



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ECONOMÍA

ANÁLISIS DE LAS FUERZAS IMPULSORAS DE
LAS EMISIONES DE CO₂ EN MÉXICO EN EL
PERIODO 1990–2015 SEGÚN EL MODELO
STIRPAT

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Economía

P R E S E N T A:

Karim Javier González Barragán

DIRECTOR DE TESIS

Mtra. Karina Caballero Güendulain



Ciudad Universitaria, Cd, Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 mis padres Soledad Patricia Barragán y Francisco J. González Ortega por apoyarme en todas y cada una de las decisiones de mi vida.

A la Mtra. Karina Caballero Güendulain por dirigir el presente trabajo de investigación.

A mis sinodales Dr. Luis Miguel Galindo Paliza, Mtro. Eduardo Vega López, Mtro. Saúl Basurto Hernández y Mtro. Carlos Alberto Francisco Cruz por sus comentarios y sugerencias para la elaboración del presente trabajo.

Índice general

	Página
Introducción	1
1 Marco teórico	4
1.1 Elementos básicos, impactos y acuerdos internacionales del Cambio Climático actual	5
1.1.1 El Clima	5
1.1.2 El Sistema Climático	6
1.1.3 El Calentamiento Global	8
1.1.4 Cambio Climático Antropogénico	15
1.1.5 Impactos potenciales del Cambio Climático	17
1.1.6 Acuerdos Internacionales	19
1.2 Antecedentes teóricos y revisión de la literatura	20
1.2.1 La identidad IPAT	21
1.2.2 El enfoque de la identidad de Kaya	23
1.2.3 El modelo STIRPAT	27
2 Emisiones de CO₂ en México y sus principales impulsores	36
2.1 Evolución de las emisiones de CO ₂ procedentes de la quema de combustible en México 1990-2015	37
2.2 Principales impulsores de las emisiones de CO ₂ en México	39
2.2.1 Crecimiento poblacional	40
2.2.2 Crecimiento económico	43
2.2.3 Consumo de energía	52
3 Metodología, datos, evidencia empírica y escenarios de emisión	57
3.1 Metodología	58

3.2	Datos	63
3.3	Evidencia empírica	64
3.3.1	Validación del modelo	70
3.4	Escenarios de emisión	73
4	Conclusiones	76
Anexos		
A	Estadístico	80
	Bibliografía	83

Índice de figuras

Figura	Página
1.1 Componentes del forzamiento radiativo del cambio climático	11

Índice de tablas

Tabla	Página
1.1 Potencial de calentamiento global y periodo de vida atmosférico de los principales gases de efecto invernadero	12
1.2 Revisión de la literatura STIRPAT	29
2.1 Emisiones de las actividades de la categoría energía (MtCO ₂)	38
2.2 Emisiones de las Industrias manufacturas y de la construcción (MtCO ₂)	39
2.3 Consumo nacional de energía por energético (Petajoules)	56
3.1 Descripción de las variables	64
3.2 Estadísticas descriptivas	64
3.3 Pruebas de raíces unitarias	65
3.4 Regresión de cointegración	66
3.5 Valores críticos para el contraste de cointegración de Engle-Granger	66
3.6 Prueba de raíz unitaria ADF de los residuos	67
3.7 Modelo de Mecanismo de Corrección de Error	67
3.8 Contribución de las variables al incremento de las emisiones de CO ₂ , 1990-2015	69
3.9 Simulaciones de tasas de crecimiento de las variables, 2016-2030	73

Índice de gráficas

Gráfica	Página
1.1 Índice global de temperatura promedio	9
1.2 Concentración atmosférica mundial de CO ₂ , 1700-2018	14
1.3 Concentración atmosférica de CO ₂ y anomalía de la temperatura 1880-2017 . .	16
2.1 Emisiones anuales de CO ₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles, México 1990-2015	37
2.2 Emisiones de CO ₂ por sector, 1990-2015	38
2.3 Población total y tasas de crecimiento en México, 1910-2050	42
2.4 Población rural y urbana en México, 1900-2015	43
2.5 Producto Interno Bruto de México y tasas de crecimiento, 1990-2015	49
2.6 Producto Interno Bruto sectorial, 1990-2015	50
2.7 Producto Interno Bruto <i>per cápita</i> de México, 1990-2015	51
2.8 Intensidad de carbono de México, 1990-2015	52
2.9 Evolución del PIB y el Consumo Nacional de Energía	53
2.10 Intensidad energética de México 1990-2015	54
2.11 Consumo de energía por sectores, México 1990-2015	55
3.1 Modelo de Mecanismo de Corrección de Error	68
3.2 Pruebas de estabilidad CUSUM y CUSUMQ	72
3.3 Proyecciones de las emisiones de CO ₂	74
A.1 Gráficas MCE	82

Introducción

El cambio climático actual es considerado (por su condición global, tendencia de largo plazo, incertidumbre y efectos potenciales) como uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad en el siglo XXI (Stern, 2007; CEPAL, 2015). Si bien el planeta ha experimentado diversos cambios en el clima a lo largo de su historia, la opinión científica mayoritaria afirma, con base en la evidencia disponible, que no puede ser explicado considerando exclusivamente mecanismos naturales y que tiene su origen en diversas actividades humanas (IPCC, 2013).

El cambio climático antropogénico es impulsado por la intensificación del efecto invernadero resultado del incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) de larga duración en la atmósfera. El incremento de las emisiones de estos gases experimentado desde la Revolución Industrial del siglo XVIII, excede la capacidad de los mecanismos naturales para absorberlos; lo que ha provocado que se acumulen en la atmósfera. Entre los gases emitidos por la acción humana, el dióxido de carbono (CO_2) es considerado el GEI más importante, por su larga vida atmosférica, su forzamiento radiativo y sus grandes volúmenes de emisión.

La consecuencia directa más clara de este incremento es la elevación de la temperatura media de la superficie terrestre la cual, a su vez, genera una serie de modificaciones en otros componentes del sistema climático con consecuencias físicas que afectan el clima y las condiciones de vida y medios de subsistencia de millones de personas alrededor del mundo (Molina et al., 2017). Los modelos y proyecciones estiman que el cambio climático originado por el incremento de la temperatura tendrá consecuencias significativas, duraderas y en algunos casos irreversibles en la economía, la sociedad y los ecosistemas. Algunas se limitarán a un sector o región particular, otras serán de escala global, y se espera que sean más graves en los países subdesarrollados y especialmente para los pobres (Stern, 2007; CEPAL, 2015). La mayoría de las consecuencias

del cambio climático perdurarán durante siglos y su magnitud dependerá del calentamiento generado a raíz de la variabilidad natural del clima y de las emisiones antropogénicas futuras. Por tal motivo, desde el año 1992 se han tomado acuerdos a nivel internacional con el objetivo de estabilizar el incremento de la temperatura media por debajo de 2° C respecto a los niveles preindustriales mediante la reducción de las emisiones mundiales de GEI, objetivo que, de alcanzarse, reduciría el riesgo de impactos graves, generalizados e irreversibles (Stern, 2007; CMNUCC, 1998).

A pesar de que las emisiones de GEI de México representaron en el año 2015 tan solo el 1.3 % de las emisiones mundiales, es considerado como un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático (ENCC, 2013; Martínez y Gay, 2015; Molina et al., 2017). Por tal motivo se comprometió en la XXI Conferencia Internacional sobre Cambio Climático (COP 21) a reducir en 22 % su generación de GEI y 51 % de carbono negro (CN) para el año 2030, lo que significa una reducción de aproximadamente 210 millones de toneladas de GEI.

En este contexto, y con la finalidad de adoptar medidas eficientes para su reducción, se vuelve indispensable analizar la evolución de las emisiones de dióxido de carbono, particularmente las derivadas del uso de combustibles fósiles que representaron en 2015 el 63 % de las emisiones nacionales. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es identificar las principales fuerzas antropogénicas impulsoras de las emisiones de CO₂ provenientes de la quema de combustible fósiles en México en el periodo 1990-2015, así como su importancia relativa.

La hipótesis del trabajo es que la variación de las emisiones de CO₂ provenientes de la quema de combustibles fósiles en México en este periodo puede ser explicada por la influencia de la población, el PIB *per cápita*, la intensidad energética y la proporción de energía proveniente de fuentes no fósiles. Para alcanzar los objetivos establecidos y validar la hipótesis planteada, se partió del modelo STIRPAT (STochastic Impacts by Regression Population, Affluence and Technology) que permite obtener un diagnóstico agregado de la relación existente entre cada fuerza impulsora y las emisiones de CO₂, así como su grado de influencia. Una de las aportaciones del presente trabajo es la incorporación de pruebas de estacionariedad y cointegración de las variables, empleando la metodología propuesta por Engle y Granger (1987) lo que permitió discriminar relaciones a largo plazo “reales” existentes entre variables de relaciones espurias.

El presente trabajo está dividido en cuatro capítulos. En el primer capítulo se definen los términos básicos relevantes para la comprensión del fenómeno del cambio climático y la influencia antropogénica en el mismo. Se presenta también una revisión de las investigaciones realizadas que analizan de manera empírica las principales fuerzas impulsoras de las emisiones de GEI. En el capítulo dos se describe, a partir de la información estadística más reciente, la evolución de las emisiones de CO₂ en México en el periodo 1990-2015, así como de la población, el PIB *per cápita*, la intensidad energética y la proporción de energía de origen no fósil. En el tercer capítulo se describe la metodología econométrica empleada para la elaboración del análisis empírico, así como la estimación del mismo. Se presentan también las pruebas de validación y diagnóstico del modelo, así como la elaboración de diversos escenarios, calculados a partir de los resultados obtenidos, de la posible evolución de las emisiones hasta el año 2030. Finalmente, en el capítulo cuatro se presentan las principales conclusiones del análisis.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1. Elementos básicos, impactos y acuerdos internacionales del Cambio Climático actual

1.1.1. El Clima

Antes de abordar la problemática del cambio climático es fundamental definir el clima. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) lo define como “las condiciones meteorológicas normales correspondientes a un lugar y periodo de tiempo determinado” (OMM, 2011, p.1). Por su parte, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático¹ (IPCC, por sus siglas en inglés) lo define como “una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante periodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años” (IPCC, 2013, p.188).

Estas definiciones hacen referencia a la descripción del clima en términos estadísticos a partir del registro de valores promedio de una serie continua de observaciones de una variable climatológica durante un periodo de tiempo, y puede referirse a escala local, regional o global. El intervalo estándar utilizado para definir las características climáticas es de 30 años y recibe el nombre de normal climatológica². La descripción estadística del clima también incluye la variabilidad típica y la frecuencia de eventos meteorológicos extremos y puede abarcar una amplia gama de variables o elementos climáticos³, siendo la temperatura y la precipitación las más usuales, pero puede incluir la humedad, la presión atmosférica, la velocidad del viento, nubosidad entre otras (WMO, 2002; Deeb et al., 2011).

Es importante no confundir el clima con el estado del tiempo⁴, que es “la condición atmosférica

¹El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, se creó en 1988 como iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para Medio Ambiente (PNUMA) con el objetivo de evaluar la información científica, técnica y socioeconómica relevante para la comprensión del cambio climático, sus impactos potenciales y las opciones de adaptación y mitigación. Actualmente lo conforman 195 países y han preparado cinco informes de evaluación técnica y científica sobre el cambio climático.

²La normal climatológica es una medida utilizada para definir y comparar el clima y representa “el valor promedio de una serie continua de observaciones de una variable climatológica durante un periodo de por lo menos 30 años” (Benavides y León, 2007). En 1935 el Comité Meteorológico Internacional recomendó que se utilizara 1901-1930 como periodo estándar mundial para el cálculo de las normales (Trewin, 2007). Los periodos 1961-1990 y 1971-2000 han sido utilizados en los últimos años como referencia del clima observado en décadas recientes (Vazquez, 2010).

³Los elementos climáticos pueden definirse como toda propiedad o condición de la atmósfera cuyo conjunto caracteriza el clima de un lugar a lo largo de un período de tiempo representativo.

⁴Casper (2009) identifica dos factores distintivos entre el estado del tiempo y el clima, éstos son: 1) el intervalo

en un solo instante de tiempo para una sola ocurrencia” (WMO, 2002, p.3) por lo que se puede decir que el clima abarca una escala cronológica suficiente para hablar del comportamiento en términos estadísticos del estado del tiempo (Vazquez, 2010).

El clima varía de manera natural en diversas escalas espaciales, ya que la combinación de elementos y factores climáticos como la latitud, la altitud, la distancia con respecto al mar, el relieve, la vegetación, la continentalidad, las corrientes marinas etc., generan una gran diversidad de climas en la Tierra (IPCC, 2007). El clima también varía en el tiempo⁵, ya que puede presentar fluctuaciones durante periodos de tiempo relativamente cortos; conocidas como variabilidad climática, o en escalas mucho más largas; como las edades de hielo. A “las variaciones estadísticamente significativas del estado medio del clima o de su variabilidad, típicamente persistentes durante décadas o más, se denominan cambio climático”. Fenómenos como El Niño, La Niña y El Niño/Oscilación Austral⁶ (ENOA) o como las sequías o las inundaciones son manifestaciones de la variabilidad y el cambio climático (IPCC, 2007). Estas variaciones u “oscilaciones”, como se denominan frecuentemente (porque oscilan entre dos estados principales), pueden tener un impacto considerable en el clima, tanto a escala regional como mundial.

1.1.2. El Sistema Climático

El clima puede ser entendido, en un sentido más amplio, como el estado promedio del sistema climático en su conjunto, incluyendo una descripción estadística de sus variaciones (IPCC, 2007). El sistema climático consta de cinco componentes principales: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera, entre los que se llevan a cabo procesos de interacción física, química y biológica, (normalmente de naturaleza cíclica) dando como

de tiempo en que se están produciendo (por ejemplo, unas horas o días frente una estación) y 2) la escala en la que están teniendo lugar (por ejemplo, una región frente a un país). El concepto de clima se ha diferenciado del de estado del tiempo y tal diferencia ha llevado a distinguir la Climatología de la Meteorología en función de sus objetos de estudio (Marín, 1990).

⁵A la desviación del clima desde un punto de vista estadístico, es decir, a la diferencia entre el valor del elemento climático analizado con respecto a la norma se le conoce como anomalía climática (Benavides y León, 2007).

⁶El ENOA es un patrón climático que ocurre, aproximadamente cada 5 años, en el océano Pacífico tropical. El Niño provoca un calentamiento notable de la superficie del océano en el Pacífico ecuatorial central y oriental, que dura tres o cuatro estaciones. Cuando la temperatura de esta región oceánica desciende a niveles inferiores a los normales, el fenómeno se denomina La Niña.

resultado un sistema extremadamente complejo, acoplado y en constante evolución (Jacobson et al., 2000).

El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de diversos factores que impulsan su modificación; por lo que se conocen como “forzamientos”. Estos pueden ser internos; es decir, aquellos originados por las interacciones entre los diversos componentes del sistema, o externos; originados por fenómenos tales como la actividad volcánica, los procesos tectónicos, las variaciones en la órbita de la Tierra, así como por las actividades humanas. Cualquier alteración impulsada por estos forzamientos se transforma en ajustes entre sus componentes en una multitud de mecanismos de retroalimentación que tienden a intensificar el cambio o a reducirlo y se denominan mecanismos de retroalimentación positiva y negativa, respectivamente. Actualmente, existe un conocimiento desigual del funcionamiento de algunos de estos mecanismos y muchos se desconocen (Ludevid, 2003).

El funcionamiento del sistema climático y, por lo tanto, la conformación del clima, depende fundamentalmente del flujo de energía en forma de radiación electromagnética que proviene del Sol (Jacobson et al., 2006). El Sol irradia enormes cantidades de energía en un amplio espectro de longitudes de onda, sin embargo, la mayor parte se disipa por el espacio y solo una pequeña parte de ésta llega a la Tierra (Rothman, 1980). La energía que recibe el planeta interactúa de diversas formas de acuerdo a la variedad de superficies con las que entra en contacto y puede ser reflejada, absorbida, conducida, almacenada o reirradiada (Casper, 2009).

Aproximadamente el 30% de la energía solar que llega a la Tierra no juega ningún papel en el sistema climático debido a que es reflejada hacia el espacio a causa de las nubes, partículas atmosféricas, hielo, nieve, desiertos y océanos. A la fracción de radiación solar reflejada se le denomina albedo (Lindsey, 2009; IPCC, 2013). La energía que no es reflejada es absorbida por la atmósfera y la superficie terrestre, provocando que el planeta se caliente e irradie simultáneamente la misma cantidad de energía en forma de calor de nuevo al espacio (Domènech, 2000). A la diferencia entre la cantidad total de energía que recibe la Tierra y la que refleja e irradia, se le conoce como balance energético terrestre. Cuando estas dos magnitudes de energía son iguales, el planeta se encuentra en equilibrio radiativo y la temperatura global es estable (Lindsey, 2009).

Un componente esencial para la configuración del clima del planeta -debido a que su

composición química desempeña un papel esencial en el balance energético terrestre- es la atmósfera, que es una fina capa de gas que cubre la Tierra (Charlson, 2006). Si bien la composición química de la atmósfera ha cambiado con la evolución de la Tierra, la composición actual de la zona que se ubica por debajo de 90 km de altitud es relativamente constante (Domènech, 2000; IPCC, 2001). En esta zona, los gases que se encuentran presentes en mayor proporción son el Nitrógeno (N₂), el Oxígeno (O₂) y el Argón (Ar), los cuales representan el 78, 21 y 0.9% respectivamente de su composición total en volumen y el 0.1% restante lo conforma una gran variedad de compuestos gaseosos a muy baja concentración que tienen la capacidad de absorber y reemitir radiación que se origina a partir de la superficie del planeta y se conocen como gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2001). Los más significativos de estos compuestos gaseosos y que se encuentran de manera natural⁷ en la atmósfera son: el Dióxido de carbono (CO₂), el Metano (CH₄), el Óxido nitroso (N₂O), el Ozono (O₃) y el vapor de agua (H₂O).

Los GEI son, en gran medida, transparentes a la luz visible de onda corta, por lo que gran parte de la energía solar penetra en la atmósfera y es absorbida por el planeta; causando su calentamiento. La luz visible se transforma en calor y es re irradiada en forma de radiación infrarroja. Nuevamente los gases presentes en la atmósfera absorben esta radiación limitando su escape al espacio e irradiándola en todas direcciones, incrementando la temperatura de la superficie. Este fenómeno es el principal responsable de que la temperatura media de la Tierra sea de aproximadamente 15° C y se le conoce como efecto invernadero natural (Ludevid, 2003). La existencia de este fenómeno es ampliamente aceptado y es de vital importancia, ya que sin él la forma de vida actual sería imposible (Common y Stagl, 2005).

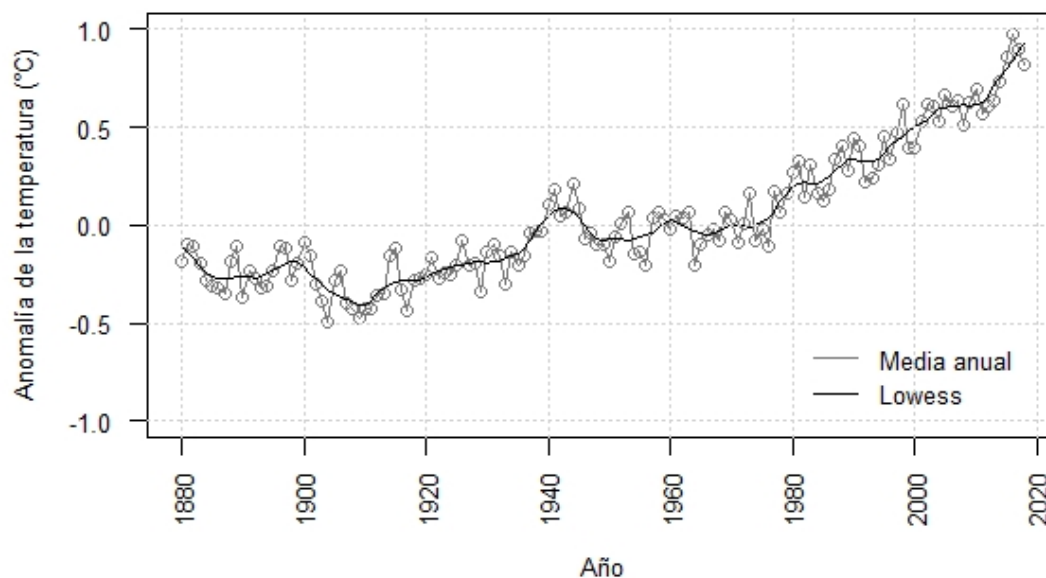
1.1.3. El Calentamiento Global

El calentamiento global hace referencia al aumento de la temperatura experimentado por el planeta en los últimos años. De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (2016), la temperatura media de la superficie del planeta ha aumentado aproximadamente 1 °C desde

⁷También existen GEI creados por el ser humano como los halocarbonos, término que designa a las especies parcialmente halogenadas e incluye a los clorofluorocarbonos (CFC), hidroclorofluorocarbonos (HFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC) (IPCC, 2013). Además de los componentes gaseosos existen partículas sólidas y líquidas en suspensión de origen y tamaño diverso que interactúan con la radiación entrante y saliente de una manera compleja y especialmente variable que reciben el nombre de aerosoles (IPCC, 2001).

finales del siglo XIX. El planeta ha experimentado periodos de calentamiento en el pasado, sin embargo, el incremento actual de la temperatura es inusualmente rápido. El registro paleoclimático combinado con modelos climáticos globales permiten conocer, por ejemplo, que a medida que la Tierra salió de las edades de hielo, la temperatura global aumentó entre 4 y 6 °C en aproximadamente 5,000 años, por lo que el incremento de la temperatura actual es aproximadamente diez veces más rápido que el promedio de calentamiento de la recuperación de las eras de hielo (Riebeek, 2011). La gráfica 1.1 muestra el cambio en la temperatura superficial global en relación con las temperaturas promedio de 1951-1980.

Gráfica 1.1: Índice global de temperatura promedio



Fuente: Elaboración propia con datos de la Nasa. Global Climate Change. Vital Signs of the Planet disponible en: https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/graph_data/Global_Mean_Estimates_based_on_Land_and_Ocean_Data/graph.txt

La temperatura media de la Tierra es regulada, en términos generales⁸, por el balance energético terrestre y puede ser modificado fundamentalmente de tres maneras: 1) debido a cambios en la energía solar entrante, 2) cambiando la fracción de radiación solar reflejada o albedo y 3) alterando la radiación de onda larga que emite la Tierra al espacio. A largo plazo el sistema climático tiende hacia el equilibrio radiativo y cualquier fenómeno que aumente o disminuya la cantidad de energía entrante o saliente, perturba este equilibrio con su respectivo efecto en la temperatura global (Lindsey, 2009).

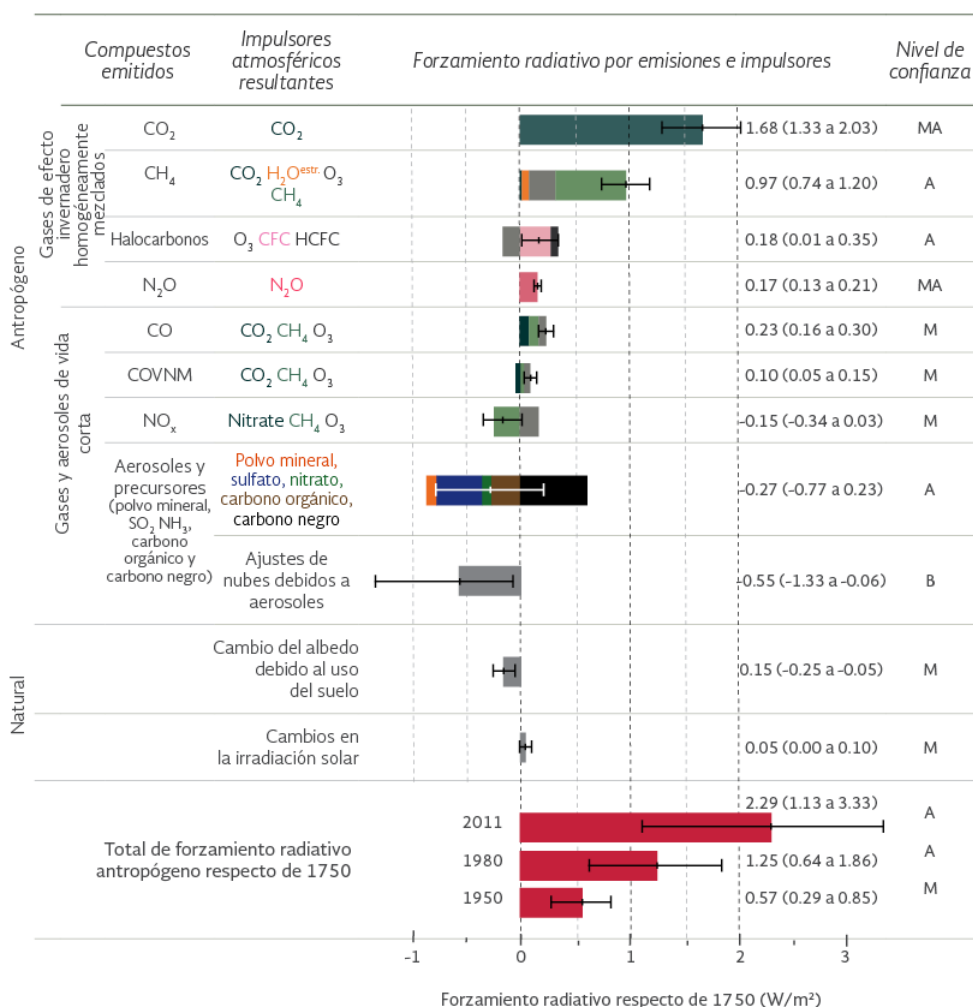
⁸Jacobson et al. (2006) menciona que también afectan procesos meteorológicos que transportan el calor dentro de la atmósfera, así como factores que lo transportan en el océano.

La influencia de diversos factores en la temperatura terrestre puede determinarse a través del concepto de forzamiento radiativo⁹. Éste permite cuantificar la influencia que un factor ejerce en la modificación del balance radiativo de la Tierra y es un índice de la importancia de un factor como mecanismo potencial del cambio climático. Cuando el forzamiento radiativo es positivo, la energía del sistema se incrementa; conduciendo a su calentamiento. Por el contrario, un forzamiento negativo disminuiría la energía; conduciendo a su enfriamiento (IPCC, 2007).

La figura 1.1 muestra la contribución al forzamiento radiativo entre 1750 y 2011 de algunos factores, incluidos las actividades humanas y procesos naturales. Los forzamientos para todos los incrementos de los GEI fueron positivos. El aumento del CO₂ causó el mayor forzamiento en este período (1.68 Wm²) seguido de las emisiones de metano (CH₄) con 0.97 Wm². Las estimaciones del forzamiento radiativo ocasionado por los mecanismos naturales como la irradiación solar y las erupciones volcánicas fueron muy pequeñas en comparación con el forzamiento resultado de la actividad humana. Se estima que el forzamiento radiativo provocado por los cambios en la irradiación solar fueron de 0.05 Wm² (IPCC, 2013). Por otro lado, el carácter episódico del forzamiento volcánico hace difícil la comparación con otros mecanismos de forzamiento. Algunas erupciones volcánicas pequeñas entre 2008 y 2011 han causado un forzamiento de -0.11 Wm² (IPCC, 2013). Por lo que, la mayor parte del calentamiento observado se atribuye al forzamiento radiativo generado por las emisiones de GEI procedentes de la actividad humana (IPCC, 2013).

⁹Se expresa en Watts por metro cuadrado (Wm²).

Figura 1.1: Resumen de los principales componentes del forzamiento radiativo



Fuente: IPCC (2013).

Como se mencionó anteriormente, los GEI presentes en la atmósfera pueden ser de origen natural o sintetizados por el ser humano y tienen la propiedad de absorber y emitir radiación. La cantidad de calor que pueden absorber y el tiempo que permanecen en la atmósfera varían ampliamente (Ver tabla 1.1). Algunos son extremadamente potentes y siguen presentes en la atmósfera durante mucho tiempo después de haber sido emitidos. Al tiempo que transcurre desde la emisión de una molécula a la atmósfera hasta su eliminación, se le conoce como periodo de vida atmosférico (Common et al., 2008). Por otra parte, con el fin de comprender el impacto de los GEI, se clasifican en cuanto a su potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés). El GWP de un gas de efecto invernadero “es la relación entre el calentamiento global de una unidad de masa de un gas de efecto invernadero a la de una unidad

de masa de CO₂ durante un periodo de tiempo” (Casper, 2010, p. 22). En otras palabras, los GEI se clasifican según su potencia comparados con el CO₂ y tomando en cuenta la fuerza de absorción de calor y su periodo de vida atmosférico. El vapor de agua es el gas de efecto invernadero más importante, ya que representa aproximadamente el 80 % del efecto invernadero natural (Ludevid, 2003), sin embargo, como se encuentra presente en cantidades variables en el tiempo y el espacio y en función de la altitud y la latitud, se considera a los gases con un mayor periodo de vida atmosférico y volumen de concentración, como los que controlan la temperatura de la superficie terrestre (Liou, 2002; Molina et al., 2017). La tabla 1.1 muestra el potencial de calentamiento global y el periodo de vida atmosférico de los principales GEI.

Tabla 1.1: Potencial de calentamiento global y periodo de vida atmosférico de los principales gases de efecto invernadero

Gas de efecto invernadero	Periodo de vida atmosférico (años)	GWP comparado con CO ₂
Dióxido de Carbono (CO ₂)	50-200	1
Metano (CH ₄)	12	23
Óxido nitroso (N ₂ O)	120	296
Clorofluorocarbono 115 (CFC 115)	550	7,000
Hidrofluorocarbono 23 (HFC-23)	264	11,700
Hidrofluorocarbono 32 (HFC-32)	5.6	650
Hidrofluorocarbono 41 (HFC-41)	3.7	150
Hidrofluorocarbono 43 (HFC-43)-10mee	17.1	1,300
Hidrofluorocarbono 125 (HFC-125)	32.6	2,800

Fuente: Casper (2010).

Los GEI presentes de manera natural en la atmósfera como el CO₂, CH₄ y el N₂O, son reciclados mediante el intercambio y transformación cíclica de los elementos presentes en los distintos reservorios, a través de ciclos biogeoquímicos. Mediante estos procesos ocurren transformaciones cíclicas que globalmente mantienen las concentraciones de estos gases a niveles relativamente estables. A las emanaciones de un reservorio a la atmósfera se les denominan “fuentes” y a todo proceso, actividad o mecanismo que sustrae de la atmósfera un GEI, un aerosol o precursor de ellos, “sumideros”. Por lo tanto, el equilibrio entre fuentes y sumideros determinan las concentraciones atmosféricas de estos GEI y sus incrementos (IPCC, 2013).

El crecimiento de las emisiones de GEI de larga duración¹⁰ a la atmósfera experimentado desde el año 1750, excede la capacidad de los sumideros para absorberlos provocando que

¹⁰También existen contaminantes climáticos de vida corta que son sustancias con un periodo de vida atmosférico relativamente corto y que tienen un efecto de calentamiento a corto plazo sobre el clima. Los principales son el carbono negro (CN), el metano (CH₄), el ozono estratosférico (O₃) y algunos hidrofluorocarbonos (INECC, 2015).

año con año se acumulen¹¹ en la atmósfera a una velocidad sin precedentes. Tan solo en el año 2015 se emitieron a nivel mundial 46 mil millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e)¹² procedentes de las actividades humanas de las cuales, el CO₂ representó el 74% de total, seguido del CH₄, el N₂O y otros compuestos con el 16%, 8% y 2%, respectivamente (CAIT, 2015). El crecimiento demográfico, las prácticas agrícolas mas intensivas, la industrialización, el cambio en el uso del suelo, la deforestación y la obtención de energía mediante la quema de combustibles fósiles han contribuido notablemente a este proceso (OMM, 2017).

Debido a su periodo de vida atmosférico, su forzamiento radiativo y sus grandes volúmenes de emisión, el CO₂ es considerado el gas de efecto invernadero más importante. El CO₂ forma parte del ciclo del carbono, que describe la transferencia y transformación cíclica de este elemento presente en tres reservorios; en la atmósfera se encuentra principalmente como CO₂, en los océanos; en forma de carbono inorgánico disuelto y en diversas formas de carbono orgánico (materia orgánica viva) y en la superficie terrestre; como rocas y sedimentos orgánicos que incluyen los depósitos de carbón, petróleo y gas, así como en la vegetación (Benavides y León, 2007).

Los procesos por los cuales el carbono se mueve a través de los depósitos de la Tierra ocurren en diferentes escalas temporales. El ciclo de carbono a corto plazo funciona básicamente a través de procesos que transfieren carbono de un reservorio a otro en cuestión de años, como la fotosíntesis y la respiración de plantas y animales. La fotosíntesis es el proceso mediante el cual las plantas, fitoplacton y biota marina combinan el CO₂ en la atmósfera y disuelto en el mar para producir carbohidratos y liberando oxígeno en el proceso. La mayor parte del CO₂ extraído de la atmósfera se devuelve a la atmósfera durante la respiración, que es esencialmente el proceso opuesto a la fotosíntesis, es decir, el oxígeno y los hidratos de carbono reaccionan para producir CO₂ y agua. Globalmente la fotosíntesis y la respiración tienden a estar en equilibrio, sin embargo, diversos mecanismos pueden alterar temporalmente este equilibrio. Un ejemplo de estos mecanismos son los incendios, ya que consumen biomasa y materia orgánica produciendo CO₂ junto con metano, monóxido de carbono y humo o la descomposición de plantas, ya que

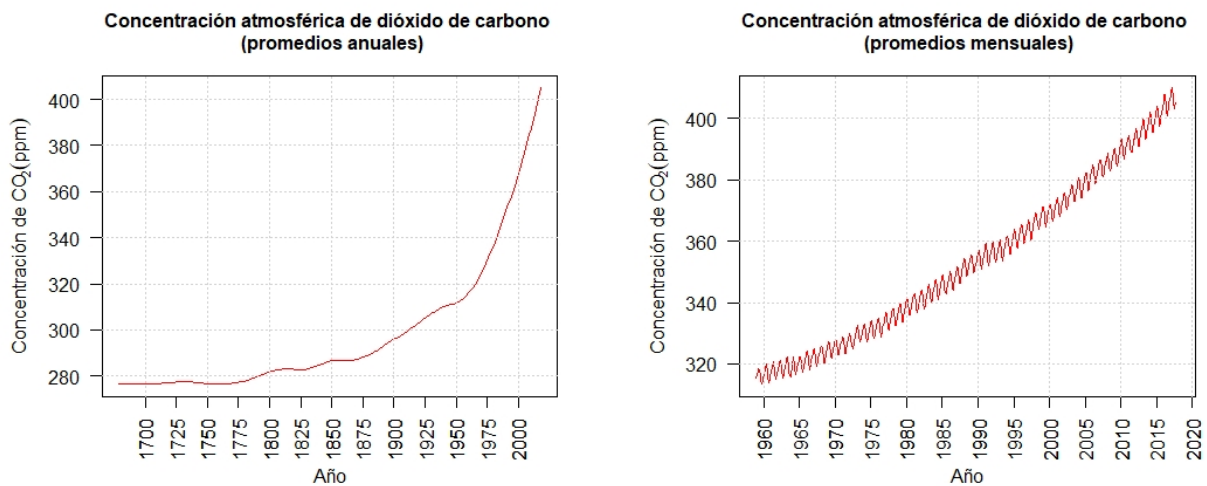
¹¹Se estima que desde la época preindustrial las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O experimentaron un crecimiento de 144%, 256% y 121% (OMM, 2017).

¹²Es una medida en toneladas de la huella de carbono, se calcula transformando los GEI distintos del CO₂ a su valor equivalente en CO₂ multiplicando la masa del gas por su GWP.

cuando las plantas mueren liberan CO_2 a la atmósfera (Riebeek, 2011). A las transferencias más lentas de carbono, se le conoce como ciclo del carbono a largo plazo e incluyen procesos geológicos como la formación de rocas sedimentarias y su reciclaje a través de la tectónica de placas, la erosión y las erupciones volcánicas (University of New Hampshire, 2019).

La actividad humana ha afectado el movimiento natural del carbono entre sus reservorios, por ejemplo, mediante la quema de combustibles fósiles para la obtención de energía, los residuos industriales y la deforestación. La gráfica 1.2 muestra la concentración histórica de CO_2 reconstruida a partir de registros de muestras de hielo y de los promedios anuales de las mediciones directas de la atmósfera obtenidas de la estación Mauna Loa y el Polo Sur, muestra también (derecha) la llamada Curva de Keeling, que contiene los promedios mensuales de la concentración de CO_2 obtenidos mediante mediciones directas desde 1958 y donde se observa que dentro del aumento de largo plazo se presentan fluctuaciones anuales conforme las plantas del hemisferio norte absorben carbono durante el verano y lo liberan mediante su descomposición en invierno (Weart, 2006). En la gráfica 1.2 se puede apreciar claramente como la redistribución antropogénica del carbono se sobrepone al funcionamiento de su ciclo natural.

Gráfica 1.2: Concentración atmosférica mundial de CO_2 , 1700-2018



Fuente: Elaboración propia con datos de Scripps Institution of Oceanography.

1.1.4. Cambio Climático Antropogénico

El ascenso de la temperatura promedio de la superficie del planeta originado por la intensificación del efecto invernadero genera cambios considerables en otros componentes del sistema climático. El IPCC afirma en su último informe de evaluación (2013), que desde 1950 se han observado cambios en el sistema climático que no tienen precedentes en los últimos milenios. Entre éstos se encuentran el incremento de la temperatura media superficial y oceánica global, el aumento del nivel del mar, el derretimiento de los glaciares y los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártida y la modificación de la frecuencia e intensidad de fenómenos hidrometeorológicos extremos. Al conjunto de estas modificaciones se le denomina cambio climático.

El IPCC define el cambio climático como una “variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo generalmente decenios o periodos más largos” (IPCC, 2013, p. 188). Esta definición difiere de la empleada por la Convención Marco de Las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que lo define como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables” (CMNUCC, 1992, p. 3).

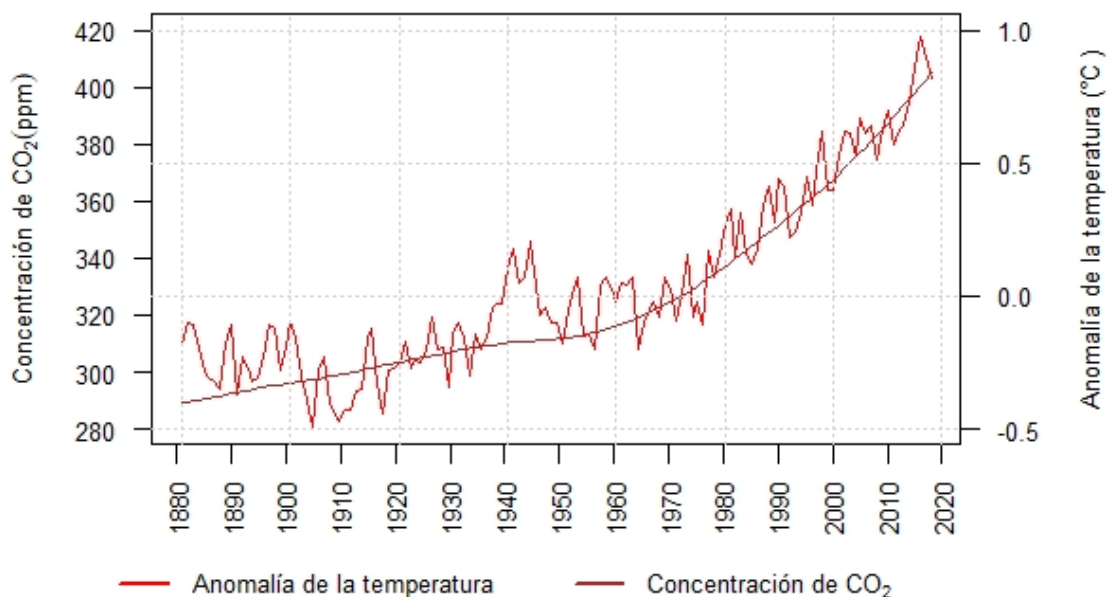
La Tierra ha experimentado diversos cambios climáticos a lo largo de su historia. Un ejemplo de estos cambios son las edades de hielo o glaciaciones que se caracterizan por temperaturas globales más frías y la expansión del hielo continental de los polos y de los glaciares. Dentro de las glaciaciones se presentan periodos más fríos y cálidos denominados periodos glaciales e interglaciales, respectivamente. Tan solo en los últimos 740,000 años se han producido ocho ciclos de avance y retroceso de los glaciares (Castro et al., 2015). Actualmente el planeta se encuentra en un periodo interglacial que comenzó hace aproximadamente 10,000 años denominado Holoceno (Lee, 2015).

Para conocer los climas del pasado o “paleoclimas” de la Tierra, los científicos han recurrido a registros “proxy”, es decir, al análisis de registros naturales que conservan características físicas o biofísicas relacionadas con las condiciones meteorológicas del pasado. Algunos de éstos son

los anillos que se forman por el crecimiento anual de los árboles, gases atrapados en los núcleos de hielo, capas de rocas sedimentarias, sedimentos oceánicos, entre otros (Riebeek, 2010). Éstos han permitido identificar diversos mecanismos que intervienen en los episodios glaciales e interglaciales; como los cambios en las características de la órbita de la Tierra o ciclos de Milankovitch, los cambios en la tectónica de placas, la actividad volcánica, los cambios en la composición atmosférica, las variaciones en la actividad solar y el albedo superficial, entre otros (Casper, 2009).

Durante el último milenio, estos mecanismos habían sido los forzamientos más importantes del sistema climático, sin embargo, la opinión científica mayoritaria¹³ afirma que, con base en la evidencia disponible, el cambio climático actual no puede ser explicado considerando exclusivamente mecanismos naturales y que tiene su origen en la intensificación del efecto invernadero originado por el incremento en la concentración de GEI de larga duración en la atmósfera (IPCC, 2013). La gráfica 1.3 muestra la relación entre el incremento de las concentraciones atmosféricas mundiales de CO₂ y el incremento de la temperatura.

Gráfica 1.3: Concentración atmosférica de CO₂ y anomalía de la temperatura 1880-2017



Fuente: Elaboración propia con datos de la NOAA

Nota: La figura muestra el cambio en la temperatura superficial global en relación con las temperaturas promedio de 1951-1980.

¹³El 97% de entre 12,000 trabajos científicos publicados entre 1991 y 2011, sostiene la existencia del cambio climático y su origen antropológico (Cook et al., 2013). Sin embargo, existen posturas como las del danés Bjorn Lomborg y el estadounidense Richard Lindzen que “ponen en duda que el problema del cambio climático global sea grave y necesite una solución” (Lovelock, 2007, p. 27).

1.1.5. Impactos potenciales del Cambio Climático

El ascenso de la temperatura promedio de la superficie del planeta genera cambios considerables en otros componentes del sistema climático que, a su vez, tienen consecuencias físicas que generan modificaciones del sistema climático y las condiciones y medios de subsistencia de millones de personas alrededor del mundo (Molina et al., 2017). Los modelos y proyecciones estiman que el cambio climático originado por el incremento de la temperatura tendrá consecuencias significativas, duraderas, y en algunos casos, irreversibles en la economía, la sociedad y los ecosistemas. Por ejemplo, se espera que el cambio climático podría afectar de manera notable el ciclo hidrológico, alterando la intensidad y la distribución espacial y temporal de la precipitación, de la escorrentía de superficie y de la recarga de agua, afectando la cantidad y calidad de los recursos hídricos disponibles. La localización geográfica de las fuentes de agua es un factor fundamental en la distribución de medios de vida para la población, por lo que el impacto sobre los recursos hídricos podría intensificar la competencia por el agua, modificar los distintos patrones de consumo y aumentar el riesgo de conflictos entre usuarios, regiones y países. El cambio en el ciclo hidrológico también afectará la producción de alimentos, ya que se estima que aproximadamente el 80% de las tierras agrícolas del mundo dependen de la lluvia y el resto, de la disponibilidad de recursos hídricos para el riego (Bates et al., 2008). La modificación del ciclo hidrológico también podría aumentar la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos con impactos diversos sobre ecosistemas naturales y actividades humanas (WWAP, 2016).

También representa una creciente amenaza para la nutrición y seguridad alimentaria a nivel mundial, debido a que los subsectores agrícolas (agricultura, ganadería, pesca, acuicultura etc.) son particularmente sensibles a sus efectos (Stern, 2007). Se prevé que el cambio climático afectará la disponibilidad de alimentos de manera directa, al imponer presiones adicionales en la productividad de los cultivos, la ganadería y la pesca, e indirecta a través de la volatilidad de precios y la interrupción del comercio, privando a millones de personas alrededor del mundo de los medios para satisfacer sus necesidades más básicas (FAO, 2016). En cuanto a los sistemas agrícolas se estima que aumentará la variabilidad de los rendimientos de los cultivos en muchas regiones (Field et al., 2014). Si bien la repercusión sobre el rendimiento dependerá de muchos factores y variará dependiendo del cultivo¹⁴ y la región, los impactos negativos serán más

¹⁴Stern (2007) menciona que la agricultura basada en el maíz tiene la probabilidad de sufrir descensos

comunes que los positivos y con el tiempo serán más adversos. También, agravarán las amenazas de la pesca de captura y la acuicultura marina y de agua dulce y es probable que sufran mayores repercusiones debido a cambios en las pautas de reproducción originados por los cambios en la temperatura del agua, el incremento del nivel del mar, el descenso del PH, entre otros (FAO, 2016). La producción pecuaria se verá afectada directa e indirectamente. Los impactos más importantes afectarán la productividad, salud y biodiversidad de los animales, así como la calidad del forraje y los pastizales (FAO, 2016).

Los ecosistemas y la biodiversidad también se verán alterados por el cambio climático y el incremento del nivel del mar, aumentando el riesgo de extinción de diversas especies mediante sus efectos sobre la estación de reproducción de plantas y animales y/o migración, en la distribución de especies y el tamaño de sus poblaciones, además de las modificación de la frecuencia de plagas y enfermedades.

Se prevé que aumentará las amenazas sobre la salud humana de manera directa, mediante una mayor probabilidad de lesión, enfermedad y muerte debido a las olas de calor, incendios, inundaciones etc., e indirectamente, a través de la modificación en los vectores de enfermedades, la disponibilidad de comida y la calidad del agua. Aumentará el ámbito geográfico de transmisión potencial de malaria y dengue, que, junto a otras enfermedades infecciosas, incrementarán su incidencia y duración estacional. Los fenómenos asociados al cambio climático como el incremento del nivel del mar, la escasez de agua y alimento, así como el incremento en la frecuencia e intensidad de inundaciones, incrementarán los desplazamientos humanos dentro de los países y a través de sus fronteras (OIM, 2008). La Organización Internacional para las Migraciones (OIM) utiliza el término “migrantes por causas ambientales” para describir a las personas que se desplazan principalmente como resultado del cambio climático y la degradación ambiental, sin embargo, no existe un consenso sobre el término a utilizar para hacer referencia a la migración causada por la degradación del medio ambiente debido a la dificultad de aislar los factores medioambientales de otras causas causantes de la migración.

sustanciales ya que la fisiología del maíz es distinta a la de la mayoría de los cultivos y no muestra la misma respuesta al efecto fertilizante del CO₂.

1.1.6. Acuerdos Internacionales

El incremento de la concentración atmosférica de CO₂ y otros GEI, ha generado cambios sustanciales en el clima. Si bien, estas concentraciones pueden reducirse mediante diversas maneras, se acepta que para evitar interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático, las emisiones netas futuras deben reducirse. El marco legal internacional establecido en la Cumbre de la Tierra realizada en 1992, para prevenir la interferencia antropogénica peligrosa en el sistema climático, ha llevado a compromisos por parte de las distintas naciones para reducir sus emisiones de GEI. Para intentar conseguir tratados específicos que cumplan con esta consigna, cada año se realiza la Conferencia de las Partes (COP).

De especial importancia fue la COP 3, celebrada en 1997 en Kioto, Japón, que culminó con la firma de y ratificación del denominado Protocolo de Kioto. El objetivo de este protocolo fue reducir, en al menos 5.5%, las emisiones de GEI entre 2008 y 2012, en relación a las emisiones registradas en 1990 a nivel mundial. Sin embargo, como el cambio climático actual se debe principalmente a emisiones históricas y las partes responsables de las fuentes dominantes de emisiones históricas no son necesariamente las mismas que las responsables de la parte dominante de las emisiones actuales, este compromiso era obligatorio únicamente para los países industrializados (Anexo I).

Durante los siguientes años, la discusión global se centró principalmente en los mecanismos de apoyo financiero y de transferencia de tecnología, desde los países industrializados hacia los países en vías de desarrollo. Durante la COP 7 realizada en la ciudad de Marrakech, se estableció un esquema de regulación y operación para el comercio de emisiones. Fue hasta la COP 15, realizada en el 2009 en Copenhague, que se llegó al consenso de que era necesario mantener el incremento de la temperatura promedio mundial por debajo de 2 °C¹⁵ para evitar el riesgo de impactos graves, generalizados e irreversibles. Así, el Acuerdo de Copenhague estableció el compromiso de reducir las emisiones hasta un nivel que permita no incrementar la temperatura mas de 2 °C y se estableció formalmente como meta en la COP 16, realizada en el año 2010 en Cancún, México. El IPCC estima que para alcanzar este objetivo es necesario reducir entre 40% y 70% de las emisiones mundiales de GEI entre 2010 y 2050 (Field et al.,

¹⁵Los niveles precisos de calentamiento para alcanzar umbrales de cambio abrupto e irreversible siguen siendo inciertos, sin embargo, se ha llegado al consenso de que se debe evitar un incremento de 2 °C y limitarlo preferentemente a 1.5 °C, con respecto a los niveles preindustriales.

2014).

Finalmente, con la COP 21 realizada en París en el año 2015, culminó un proceso de negociación que logró el acuerdo que sentó las bases para intentar detener el cambio climático y enfrentar sus consecuencias a escala global. Este acuerdo, dispone que todos los países de manera voluntaria, definan su contribución nacional en términos de reducción de emisiones y se comprometan a comunicar e implementar sus compromisos. México, a pesar de su baja participación en las emisiones mundiales de GEI, es considerado uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático ya que se estima que aproximadamente el 15 % de su territorio nacional, 68 % de su población y 71 % de su Producto Interno Bruto (PIB) se encuentran altamente expuestos a los riesgos de impactos adversos del cambio climático (Molina et al., 2017). Por tal motivo, se comprometió a reducir 22 % de sus emisiones y 51 % de carbono negro (CN) para el año 2030, lo que significa una reducción de alrededor de 210 millones de toneladas de GEI. Para cumplir con este compromiso de reducción, se requerirán para el periodo 2014-2030, de acuerdo con la Sexta Comunicación Nacional sobre el Cambio Climático, aproximadamente 126,000 millones de dólares (mdd). Por otra parte, bajo el escenario tendencial, el costo bruto de inacción para el año 2030 estimado es de aproximadamente 143, 000 mdd, lo que representa un ahorro de 17, 000 mdd. En este contexto, contar con evidencia empírica de la importancia relativa de las principales fuerzas impulsoras de las emisiones de GEI, particularmente del CO₂, puede permitir establecer estrategias eficientes para su reducción.

1.2. Antecedentes teóricos y revisión de la literatura

La modificación de la composición química de la atmósfera originada por el incremento de las emisiones de GEI de origen antropogénico, particularmente de CO₂, está alterando el clima global. Sin embargo, a pesar de que la comprensión de la influencia de los GEI en la conformación del clima nunca había sido tan clara, desde que Svante Arrhenius descubrió el cambio climático como concepto teórico en 1896, actualmente existe un conocimiento limitado de las principales fuerzas antropogénicas, comúnmente denominadas fuerzas “impulsoras” o “motrices” de su emisión (York et al., 2003; Weart, 2006). Por tal motivo, numerosos

trabajos han tratado de determinar, tanto teórica como empíricamente y mediante diversas técnicas¹⁶, las principales fuerzas impulsoras de las emisiones de GEI, así como su grado de influencia. Si bien estas involucran un conjunto complejo y dinámico de factores, el debate se ha centrado históricamente en torno a las interrelaciones existentes entre variables demográficas, económicas y tecnológicas.

1.2.1. La identidad IPAT

Uno de los primeros esfuerzos en establecer una relación funcional entre este conjunto de fuerzas y sus impactos ambientales fue la llamada identidad IPAT. Ésta surgió en la década de 1970 de los trabajos de Barry Commoner, Paul R. Ehrlich y John Holdren¹⁷ y propone que los impactos ambientales originados por las actividades humanas son resultado del producto de tres factores fundamentales, expresados como:

$$I \equiv P \times A \times T \quad (1.1)$$

Donde I representa un determinado impacto ambiental, P representa el tamaño de la población, A la “afluencia” o “riqueza” medida como el ingreso *per cápita* en unidades monetarias y T la tecnología, entendida como la cantidad de recursos utilizados o residuos generados por unidad de producción. Al resolver la expresión 1.1 para T y sustituyendo se obtiene:

$$I \equiv P \times \frac{PIB}{P} \times \frac{I}{P \left(\frac{PIB}{P} \right)} \quad (1.2)$$

Esta identidad supone que el aumento de la población genera impactos negativos en el medio ambiente debido, entre otras causas, a que supondría un mayor uso de la tierra y consumo de recursos, además, supone que el incremento del PIB *per cápita*, empleado comúnmente como una aproximación a los patrones de consumo, incrementaría el consumo y la producción, lo que eventualmente conduciría a un impacto negativo. Finalmente, un aumento en la eficiencia de

¹⁶Para el estudio de los determinantes de las emisiones de GEI se pueden distinguir en la literatura básicamente cuatro técnicas: análisis econométricos, análisis de datos agregados, análisis de descomposición de índices (Index Decomposition Analysis, IDA) y análisis de descomposición estructural (Structural Decomposition Analysis, SDA).

¹⁷York et al. (2003) aclaran que Ehrlich y Holdren (1970) fueron los primeros con la idea de IPAT y la formulación de la ecuación $I = PAT$ que conduce a su acrónimo actual (1972), mientras que Commoner et al. (1971) fueron los primeros con la formulación algebraica y su aplicación al análisis de datos.

la tecnología reduciría los impactos ambientales. Sugiere también que a parte de las elecciones sobre las tasas de natalidad futuras, las únicas maneras con las que un individuo puede reducir sus impactos ambientales son reduciendo su “riqueza” o utilizando tecnologías más eficientes. Esto se observa mas claramente mediante la expresión aditiva de las tasas de crecimiento de sus componentes (Nakicenovic et al., 2000; Samaniego y Galindo, 2009).

$$\Delta I \equiv [\Delta P] + \Delta \left[\frac{PIB}{P} \right] + \Delta \left[\frac{I}{PIB} \right] \quad (1.3)$$

De la expresión 1.3 se desprende que para evitar el impacto humano en el medio ambiente, la tasa de mejora tecnológica al menos debe igualar la suma de la tasa de cambio de la población y la tasa de crecimiento del ingreso *per cápita* (Labandeira et al., 2007).

La identidad IPAT ha sido empleada por diversos autores para elaborar situaciones hipotéticas para cada uno de los factores con la finalidad de realizar simulaciones (Common et al., 2008; Samaniego y Galindo, 2009) y sentó las bases para el posterior desarrollo de otros enfoques y formulaciones similares que incorporan nuevos factores a la expresión o reinterpretan los ya existentes. Por ejemplo, Schulze (2002) afirma que los impactos ambientales también dependen del comportamiento de los individuos, variable que no se aprecia en la formulación IPAT, por lo que propone incorporarla, dando como resultado la expresión I=PBAT. De acuerdo con este autor, esta modificación capta más claramente los determinantes de los impactos ambientales, ya que si bien la “riqueza” limita los impactos ambientales potenciales y la tecnología afecta la eficiencia del consumo de recursos y la producción de desechos, las decisiones de comportamiento, ya sea en el consumo o la producción, influyen en gran medida en el alcance de los impactos. Sin embargo, de acuerdo con York et al. (2003) la aplicación de I=PBAT resulta problemática ya que esta nueva variable no está definida claramente en términos matemáticos. Por otra parte, Waggoner y Ausubel (2002) realizaron una modificación de IPAT desagregando la variable tecnológica T , para observar de manera diferenciada los efectos del “nivel de vida” y del nivel tecnológico, dando como resultado la siguiente expresión:

$$I \equiv P \times A \times C \times T \quad (1.4)$$

En donde C y T representan el consumo de un determinado bien o la fracción de la actividad económica dedicada a producirlo y el impacto ambiental de producirlo, respectivamente. Si por

ejemplo consideramos el consumo de energía y su impacto ambiental, la aplicación de ImPACT sería:

$$I \equiv P \times \frac{PIB}{P} \times \frac{E}{PIB} \times \frac{I}{E} \quad (1.5)$$

El producto $\frac{PIB}{P} \times \frac{E}{PIB}$ recogería el efecto del consumo *per cápita* de energía y $\frac{E}{PIB} \times \frac{I}{E}$ el impacto ambiental por unidad de PIB o el nivel tecnológico. Otras modificaciones como la que proponen Xu et al. (2005), al incorporar la relación entre medio ambiente y sociedad a través del nivel de desarrollo social o la capacidad de una sociedad para disminuir el impacto ambiental, han presentado dificultades a la hora de incorporarlos a la expresión debido a la dificultad de cuantificarlos (Lin et al., 2009).

Como se puede apreciar, la identidad IPAT y sus modificaciones ilustran la relación de cualquier impacto ambiental con sus impulsores antropogénicos principales, de una manera sencilla y desde una perspectiva global. Para el estudio específico del impacto de las actividades humanas en el medio ambiente en forma de emisiones de CO₂, el japonés Yoichi Kaya (1990) propuso una versión de IPAT conocida como la identidad de Kaya.

1.2.2. El enfoque de la identidad de Kaya

Entre las diversas actividades humanas que producen GEI, la quema de combustibles fósiles para la obtención de energía¹⁸ es considerada la mayor fuente de emisiones y el principal impulsor antropogénico del cambio climático ya que es responsable de aproximadamente tres cuartas partes de las emisiones totales (IEA, 2017; Molina et al., 2017). De los gases generados por esta actividad, el dióxido de carbono representa aproximadamente el 58 % de las emisiones globales de GEI, porcentaje que varía considerablemente entre países debido a las diversas estructuras nacionales (IEA, 2017).

Las fuentes para la obtención de energía han evolucionado desde la dependencia de las fuentes de energía “tradicionales” hasta el predominio de los combustibles fósiles. Tan solo en el año 2016, los combustibles fósiles representaron el 81 % del suministro total de energía primaria¹⁹

¹⁸La quema de combustibles fósiles genera energía debido a que, los combustibles fósiles son básicamente carbón e hidrógeno, por lo tanto, cuando son quemados, se oxidan liberando dióxido de carbono y agua y cuando se producen estas reacciones se libera calor (De Ambrosio, 2015).

¹⁹Se entiende por energía primaria a las distintas formas de energía tal como se obtienen de la naturaleza, ya

global, siendo el petróleo y el carbón responsables del 60% (IEA, 2018). Adicionalmente, durante los últimos dos siglos, el consumo mundial de energía primaria ha aumentado en promedio 2% anual, duplicándose aproximadamente cada 35 años (Nakicenovic, 1993). Por lo tanto, el crecimiento de la demanda mundial de energía a partir de combustibles fósiles ha desempeñado un papel clave en la tendencia a la alza de las emisiones.

La identidad de Kaya incorpora al análisis de las fuerzas impulsoras de las emisiones de CO₂ la importancia del consumo de energía primaria y la intensidad de las emisiones mediante la siguiente expresión:

$$CO_2 \equiv \frac{CO_2}{EP} \times \frac{EP}{PIB} \times \frac{PIB}{P} \times P \quad (1.6)$$

En donde $\frac{CO_2}{EP}$ representa la cantidad de CO₂ emitido por unidad de energía primaria consumida o índice de carbonización, $\frac{EP}{PIB}$ representa la cantidad de energía empleada por unidad de Producto Interno Bruto (PIB) o intensidad energética, $\frac{PIB}{P}$ representa el PIB *per cápita* y P el número total de habitantes. A su vez, el producto de los dos primeros factores expresa las emisiones de CO₂ por unidad de PIB producido o intensidad de las emisiones $\left(\frac{CO_2}{PIB}\right)$ y como menciona Alcántara y Padilla (2006), al desplazar P al lado izquierdo de la expresión se obtiene la descomposición de las emisiones *per cápita*.

El índice de carbonización está relacionado directamente con la combinación de las fuentes utilizadas para la producción de energía o “mix” energético. En el caso de los combustibles fósiles, los factores de emisión de CO₂ varían de acuerdo al tipo de combustible utilizado. Por ejemplo, en el año 2016 el carbón representó el 27% del suministro total mundial de energía primaria, pero el 44% de las emisiones globales de CO₂ debido a su alto contenido de carbono por unidad de energía liberada (IEA, 2018). En el caso de otras fuentes de energía como la solar o la eólica, los factores de emisión son nulos. Por lo tanto, un buen desempeño de este índice mostraría una tendencia a la baja, lo que significaría una disminución en el consumo de energía primaria o una preponderancia de fuentes no fósiles.

La intensidad energética mide la cantidad de energía necesaria para producir una unidad del PIB, por lo que es considerada como una medida de la eficiencia energética de un sistema económico. De acuerdo con la CEPAL (2009) la evolución de la intensidad energética de las economías

sea, en forma directa como en el caso de la energía hidráulica o solar, la leña, y otros combustibles vegetales; o después de un proceso de extracción como el petróleo, carbón mineral, geoenergía, etc.

depende de un amplio conjunto de factores, entre los que pueden mencionarse los cambios en la estructura económica, la contribución sectorial del PIB, los precios relativos de la energía, los cambios tecnológicos y modos de producción, los procesos de urbanización, el acceso a nuevas y modernas fuentes de energía, así como los modelos de transporte entre otros (Alcantara et al., 2007). Aunque es un buen indicador global de eficiencia energética debe interpretarse con cuidado ya que de acuerdo con Vide (2007) presenta serias limitaciones a la hora de asignar responsabilidades sectoriales tanto en el volumen de energía primaria consumida como en las emisiones atmosféricas que acompañan a dicho consumo.

Las trayectorias de la intensidad energética y del índice de carbonización muestran oscilaciones a lo largo del tiempo y diferencias importantes entre países. Sin embargo, de acuerdo con Nakicenovic (1993) éstas han disminuido desde la década de 1860 en la mayoría de los países. Si bien, esta tendencia se observa en todos los niveles de ingreso, generalmente las economías de ingresos altos tienen una intensidad energética más baja y un menor índice de carbonización (Samaniego y Galindo, 2009; Ritchie y Roser, 2018). Sin embargo, pese a estas mejoras, entre el año 2000 y 2016 las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de combustibles fósiles experimentaron un incremento de 40% (IEA, 2018). Autores como Nadal (2018) y García (2010) mencionan que este incremento puede deberse a que a medida que los países se desarrollan, dejan de producir ciertos bienes cuyos procesos son intensivos en contaminantes y en cambio comienzan a importarlos o producirlos en otros países con leyes y reglamentos ambientales menos estrictos o aprovechando una disminución en los costos de mano de obra, energía, transporte, etc. En otras palabras, la disminución en la emisión de un contaminante podría explicarse por el desplazamiento de las industrias contaminantes o ciertas partes un proceso productivo, hacia otros países, especialmente a países en vías de desarrollo²⁰. Otra posibilidad tiene que ver con la innovación tecnológica aplicada a los sistemas de producción y consumo de energía que genera un “efecto rebote”, el cual se refiere a que cuando el progreso tecnológico provoca un aumento en la eficiencia de un recurso, genera que el consumo total del

²⁰De acuerdo con Urquidí y Egea (2007), la relación entre apertura comercial y reducción de las emisiones es ampliamente reconocida, sin embargo, existen pocos trabajos empíricos que permitan pronunciarse al respecto. Sobre la especialización y la existencia de ventajas comparativas y su relación con las emisiones de GEI, particularmente de dióxido de carbono, Islas (2010) estudia los índices de 34 países correspondientes a cinco clases de industrias contaminantes (metales ferrosos, metales no ferrosos, sustancias químicas industriales, productos derivados del petróleo y papel y artes gráficas) a partir de cifras promedio de exportación en tres periodos 1970-1972, 1980-1982 y 1990-1992 mediante la metodología de componentes principales. Los resultados muestran que las naciones en vías de desarrollo presentan una marcada tendencia a desarrollar una ventaja comparativa en estas industrias contaminantes, en tanto que los países desarrollados presentan una tendencia hacia una pérdida de ella.

mismo aumente en lugar de disminuir (García, 2010).

De acuerdo con Nakicenovic (1993) para hacer un análisis mas profundo de los factores explicativos de las emisiones de CO₂ procedentes de la energía se deben considerar los requerimientos de energía primaria, los procesos de conversión o transformación del sector energético y el consumo energético final. Con la finalidad de considerar estos factores y realizar un análisis mas específico, Vide (2007) amplió la identidad de Kaya al desagregar la intensidad energética, dando como resultado la siguiente expresión:

$$CO_2 \equiv \frac{CO_2}{EFS} \times \frac{EFS}{EP} \times \frac{EP}{EF} \times \frac{EF}{PIB} \times \frac{PIB}{P} \times P \quad (1.7)$$

Donde *EFS* representa el consumo de energía fósil y *EF* la energía final consumida. Así, $\frac{CO_2}{EFS}$ se convierte en un indicador mas preciso de carbonización debido a que muestra el peso relativo de la energía fósil en el total de fuentes de energía primaria. El índice de intensidad energética $\frac{EP}{PIB}$ se descompone en tres coeficientes cuyo comportamiento genera tres efectos. El efecto sustitución representado por $\frac{EFS}{EP}$, recoge el peso de las fuentes fósiles en la energía primaria total, por lo que una tendencia decreciente mostraría una preponderancia de fuentes de energía menos contaminantes. El efecto transformación representado por $\frac{EP}{EF}$, muestra la cantidad de energía primaria por unidad de energía final utilizada, por lo que una disminución podría indicar un avance en la eficiencia en el sector energético. Por último, el efecto eficiencia representado por $\frac{EF}{PIB}$, que mide las necesidades de energía final utilizada por unidad de PIB generado. De acuerdo con esta desagregación, la evolución de las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de combustibles fósiles se explicaría considerando al menos los efectos recogidos por cada uno de los factores que conforman la expresión (1.7).

La Identidad de Kaya y sus modificaciones han sido utilizadas para el estudio de los determinantes de las emisiones de CO₂ (Duro y Padilla, 2005; Vide, 2007; Alcantara, 2009; Alcántara y Padilla, 2010; Li et al., 2014) y para la elaboración de escenarios sobre el consumo de energía y la generación de emisiones a mediano y largo plazo (Nakicenovic et al., 2000; Samaniego y Galindo, 2009; van Ruijven et al., 2016). Para el caso de México ha sido empleada para analizar los factores que contribuyen a las emisiones de CO₂ procedentes de los usos de la energía eléctrica (García, 2014) y para realizar proyecciones sobre el consumo de energía eléctrica a mediano y largo plazo (Sandoval, 2013). También se ha empleado para analizar lo

factores que intervienen en el incremento de las emisiones de CO₂ derivadas de un sector en específico; como el estudio de Gutiérrez et al. (2016) en el que se analizan las procedentes del sector industrial manufacturero en San Luis Potosí en el periodo 2000-2012.

A pesar de que las identidades IPAT y Kaya especifican de manera general las fuerzas impulsoras detrás del cambio ambiental e ilustran claramente la relación entre éstas y sus impactos, además de que permiten la incorporación de nuevos elementos; diversos autores han señalado sus limitaciones. Por ejemplo, York et al. (2003) y Giambona et al. (2005) indicaron que son demasiado simples y no permiten la posibilidad de interacción entre las variables, ya que sus elementos no pueden ser considerados independientes entre si debido a su conexión multiplicativa. Nakicenovic et al. (2000) indica que no permiten identificar las fuentes de impacto para consumidores específicos debido a que presentan un elevado nivel de agregación. Por otra parte, York et al. (2003) mencionan que como identidades matemáticas siempre son verdaderas y asumen proporcionalidad en la relación funcional entre los factores a priori, por lo que no permiten la realización de pruebas de hipótesis.

1.2.3. El modelo STIRPAT

Con la finalidad de superar las limitaciones de las identidades IPAT y Kaya, Dietz y Rosa (1994, 1997) propusieron una versión estocástica de IPAT que eventualmente se convirtió en STIRPAT (STochastic Impacts by Regression Population, Affluence and Technology) con la cual se agrega aleatoriedad al modelo para la conveniencia del análisis empírico y la posibilidad de modelar estadísticamente los impactos no proporcionales de las variables sobre el medio ambiente (Lin et al., 2009). El modelo STIRPAT se define de la siguiente manera:

$$I_i = \alpha P_i^\beta A_i^\gamma T_i^\delta \mu_i \quad (1.8)$$

Donde α representa el término constante, β , γ y δ son los parámetros a estimar y μ el término de error. I , P , A y T son el impacto ambiental, la población, la “riqueza” y la tecnología respectivamente y previamente definidos en la identidad (1.2). Para facilitar la estimación y

la interpretación de los coeficientes comúnmente se emplea su forma logarítmica:

$$\ln I_i = \ln \alpha + \beta \ln P_i + \gamma \ln A_i + \delta \ln T_i + \ln \mu_i \quad (1.9)$$

La ecuación 1.9 permite el cálculo de la elasticidad²¹ ecológica (EE) o “capacidad de respuesta o sensibilidad de los impactos ambientales a un cambio en cualquiera de sus fuerzas motrices” (York et al., 2003). Empleando esta definición, β representa la elasticidad de impacto de la población (EIP) o sensibilidad de un impacto ambiental a un cambio en el tamaño de la población, de manera análoga, γ y δ representan la elasticidad de impacto ambiental de la afluencia (EIA) y la elasticidad de impacto de la tecnología (EIT), respectivamente.

De esta manera elasticidades iguales a uno indicarían una relación proporcional entre la fuerza y el impacto, es decir, un cambio porcentual en la fuerza motriz genera un cambio idéntico en su impacto. Por otro lado, coeficientes mayores a uno sugerirían que el impacto aumenta más rápidamente que la fuerza motriz. Las elasticidades mayores a cero, pero menores a uno serían indicativos de una relación inelástica, donde el impacto es menos sensible a los cambios de la fuerza motriz. Las elasticidades también pueden ser negativas. Los valores iguales a menos uno indicarían que el impacto disminuye proporcionalmente en respuesta a un aumento en la fuerza motriz y los menores a menos uno indicarían que el impacto disminuye en mayor proporción a un aumento en la fuerza motriz. Debido a la posibilidad de que las elasticidades varíen en diferentes puntos del rango de la fuerza motriz, también es frecuente incluir términos cuadráticos u otros polinomios en el modelo (York et al., 2003).

Como se puede apreciar, a diferencia de IPAT²², el modelo STIRPAT permite realizar una estimación empírica de las elasticidades para cada fuerza motriz, además de que permite agregar otras para analizar su influencia en el impacto ambiental, siempre y cuando estos factores adicionales sean conceptualmente consistentes con la forma multiplicativa de la ecuación 1.8. El modelo STIRPAT ha sido empleado, desde que fue desarrollado en la década de 1990 y mediante diversos métodos econométricos, para analizar y buscar evidencia empírica de las fuerzas antropogénicas impulsoras de diversos impactos ambientales, especialmente detrás del

²¹El concepto general de elasticidad es usado ampliamente en economía y se refiere a la variación porcentual que experimenta una variable dependiente en un cambio de uno por ciento en una variable independiente (Pindyck y Rubinfeld, 2009).

²²La identidad IPAT puede considerarse como un caso particular de STIRPAT en donde $\alpha = \beta = \gamma = \delta = \mu = 1$, es decir, un cambio porcentual en la fuerza motriz produce un cambio porcentual idéntico en su impacto.

incremento de la emisiones de GEI (Ver tabla 1.2).

Tabla 1.2: Revisión de la literatura STIRPAT

Estudio	Indicador de polución	Periodo analizado	Técnica utilizada	Pais(es)	Variables
Dietz y Rosa (1997)	Emisiones industriales de CO ₂ (millones de toneladas métricas).	1989	Modelo general aditivo (incorpora la regresión no paramétrica y la no linealidad).	111 países	Población total, PIB per cápita, incorporan la tecnología al término de error.
York et al. (2003)	Emisiones de CO ₂ de la combustión de combustibles fósiles y la producción de cemento y de la huella energética (millones de toneladas métricas).	1996, 1999	Mínimos cuadrados ordinarios (MCO).	146 países (CO ₂) y 138 países (huella energética).	Población total, % de la población no dependiente (15-65 años), nivel de urbanización (% de la población que vive en zonas urbanas) y su cuadrática, PIB per cápita y su cuadrática en paridad de poder adquisitivo, US \$), nivel de industrialización (% del PIB generado por la industria), variable dicotómica tropical (1) y no tropical (0).
York y Dietz (2003)	CO ₂ , CH ₄ , así como el potencial de calentamiento global (PCG) combinado de estos dos gases.	1991	Mínimos cuadrados ordinarios (MCO).	137 países	Población no dependiente (15-65 años), nivel de urbanización (% de la población que vive en zonas urbanas), PIB per cápita, nivel de industrialización (% del PIB generado por la industria), variable dicotómica (tropical y no tropical).
Shi (2003)	Emisiones de CO ₂ de procesos industriales derivados de la quema de combustibles fósiles y la fabricación de cemento.	1975-1996	Mínimos cuadrados generalizados (MCG).	93 países	Población total a mitad año, PIB per cápita, tecnología (valor agregado del sector manufacturero y del sector servicios expresado como porcentaje del PIB), % de la población en edad de trabajar (relación de la población de 15 a 64 años sobre la población de 0 a 14 años de edad y 65 años o más), proporción del PIB no comercializado (suma del valor total de los bienes y servicios no comercializados expresado como porcentaje del PIB).
Cole y Neumayer (2004)	Dióxido de azufre (SO ₂) y CO ₂ .	1975-1998 (CO ₂) 1971-1990 (SO ₂)	Análisis de datos panel	86 países (CO ₂). 54 países (SO ₂).	Población total, Población total al cuadrado, PIB per cápita, Intensidad energética (uso total de energía por unidad de PIB), Nivel de industrialización (participación de la producción manufacturera), % de la población menor a 14 años y % de la población entre 14 y 64 años, tamaño promedio del hogar.
Fan et al. (2006)	Emisiones mundiales de CO ₂	1975-2000	MCO Ante la presencia de multicolinealidad emplean Mínimos cuadrados parciales (MCP).	149 países	Población, % de la población de entre 15 y 64 años, nivel de urbanización (% de la población que vive en zonas urbanas), PIB per cápita, tecnología expresada como intensidad energética (consumo de energía por unidad de PIB).
Martínez-Zarzoso et al. (2007)	Emisiones de CO ₂	1975-1999	Modelos de datos panel * efectos fijos * efectos aleatorios	23 países de la Unión Europea	Población total, PIB per cápita, nivel industrialización (% de la actividad industrial con respecto al PIB), intensidad energética (consumo de energía por unidad de PIB).

Revisión de la literatura STIRPAT (Continuación)

Estudio	Indicador de polución	Periodo analizado	Técnica utilizada	Pais(es)	Variables
Lin et al. (2009)	Emisiones de carbono (C), óxidos de azufre (SO _x), óxidos de nitrógeno (NO _x), partículas y compuestos orgánicos volátiles.	1978-2006	MCO Ante la presencia de multicolinealidad emplean la regresión de cresta	China	Población total, nivel de urbanización (proporción de personas que viven en zonas urbanas), PIB per cápita, nivel de industrialización (proporción del valor agregado industrial en el PIB), tecnología como intensidad energética (consumo de energía por unidad de PIB).
Liddle (2011)	Emisiones de CO ₂ originadas por el transporte y el consumo de electricidad residencial	1960-2007	Análisis de cointegración-STIRPAT	22 países de la OCDE	Población total, PIB per cápita, proporciones de la población de varios grupos de edad: 20-34, 35-49, 50-69 y 70 años y más.
Wang et al. (2013)	Emisiones de CO ₂	1980-2010	MCO Ante la presencia de multicolinealidad emplean la regresión de cresta.	Guangdong, China	Población total al final de año, PIB per cápita, nivel de urbanización (% de la población no agrícola), nivel de industrialización (% del valor agregado de la industria secundaria al PIB), grado de comercio exterior (% del valor bruto de las importaciones y exportaciones al PIB), estructura de consumo de energía (% del consumo de petróleo al consumo total de energía), nivel de servicios (% del valor agregado del sector terciario al PIB).
Bargaoui et al. (2014)	Emisiones de CO ₂	1980-2010	Modelos de datos panel * efectos fijos * efectos aleatorios	214 países	Población, PIB per cápita, tecnología como actividad industrial (participación de la industria manufacturera en el PIB total) y eficiencia energética (medida como el PIB a precios constantes de paridad de poder adquisitivo (PPA) divididos entre el uso de energía, donde el uso de energía se refiere a la producción + importaciones-exportaciones), variable dicotómica (ratificación del protocolo de Kioto).
Hassan (2016)	Emisiones de CO ₂	1972-2013	Cointegración ARDL (Modelo autoregresivo de rezago distribuido)	Bangladesh	Población total, PIB per cápita, intensidad energética (uso total de energía por dólar del PIB), nivel de urbanización (proporción de la población que vive en áreas urbanas).
Salim et al. (2017)	Emisiones de CO ₂	1980-2010	Cointegración ARDL (Modelo autoregresivo de rezago distribuido)	13 países asiáticos	Población total, PIB per cápita, intensidad energética (uso total de energía por dólar del PIB), nivel de urbanización (proporción de la población que vive en áreas urbanas).

Fuente: Elaboración propia con base en la literatura revisada.

Dietz y Rosa (1997) analizaron los efectos de la población, la afluencia y la tecnología sobre las emisiones de CO₂ de 111 países para el año 1989 mediante el modelo STIRPAT y encontraron que el impacto de la población es aproximadamente proporcional a su tamaño, por lo que concluyen que es una fuerza impulsora clave en las emisiones de CO₂. También encontraron que los efectos de la “riqueza” se estabilizan y disminuyen cuando alcanzan el nivel de 10,000 dólares, sin embargo, reconocen que este nivel es prácticamente inalcanzable para la mayoría de las naciones en un futuro cercano (York et al., 2003). Los autores incluyeron el efecto de la tecnología en el término residual debido a que, “no existe una definición operacionable y ampliamente aceptada correspondiente a este término”²³ (Dietz y Rosa, 1994). Sin embargo, reconocen la importancia de reformular *T* e incluir factores adicionales para el desarrollo de la teoría y evaluación de las estructuras causales de la degradación ambiental (York et al., 2003).

Una de las ventajas del modelo STIRPAT es que permite incluir fuerzas impulsoras adicionales que se teoriza pueden influir en los impactos ambientales y estimar sus efecto de manera independiente. Por ejemplo, debido a que el proceso de urbanización y las actividades asociadas a éste, como la industria, la generación de electricidad o el transporte, son considerados como uno de los factores mas importantes que propician las emisiones de GEI, especialmente de CO₂, diversos autores (York et al., 2003; York y Dietz, 2003; Fan et al., 2006; Lin et al., 2009; Wang et al., 2013; Bargaoui et al., 2014; Hassan, 2016; Salim et al., 2017) los han incorporado en el modelo STIRPAT.

Uno de los primeros estudios que incluyó una desagregación de *T* como variable explicativa fue realizado por York et al. (2003) quienes incorporaron el nivel de urbanización, expresado como el porcentaje de la población que vive en áreas urbanas, y el nivel de industrialización, expresado como el porcentaje del PIB generado por la industria para analizar las emisiones de CO₂ procedentes de la combustión de combustibles fósiles y la producción de cemento de 146 países. Esta desagregación se sustenta en la idea de que la estructura de una economía y no sólo su tamaño puede afectar su nivel de emisión. Por ejemplo, se esperaría que las economías cuya producción se derive en mayor medida de las industrias manufactureras consuman mucha energía y produzcan mayores emisiones; mientras que las economías cuya producción se derive en gran parte de los servicios sean menos intensivas en energía y por lo tanto, produzcan menos

²³Nótese que, como menciona York et al. (2003) la solución de *T* en la fórmula IPAT ($T = \frac{I}{P \times A}$) no puede ser empleada en el modelo de regresión STIRPAT debido a que vuelve al modelo tautológicamente verdadero, lo que da como resultado inevitablemente un valor de $R^2 = 1$.

emisiones (York et al., 2003; Shi, 2003).

La composición por edades de la población puede estar asociada con diferentes patrones de consumo, lo que a su vez podría afectar el nivel de emisiones; por lo que adicionalmente al tamaño de la población incluyeron el porcentaje de la población de entre 15 y 64 años, ya que se ha sugerido que países con mayor porcentaje de personas en edad de trabajar consumen más energía y recursos (Dietz y Rosa, 1994). Agregaron también una variable dicotómica como indicador del clima (tropical y no tropical), que si bien no es un factor antropogénico, puede tener un papel importante en el consumo de energía y requerimientos de recursos y por lo tanto, en el nivel de emisiones (Shi, 2003). El estudio encontró que la población tiene un efecto proporcional sobre las emisiones de CO₂, lo que coincide con los hallazgos de Dietz y Rosa (1997). El estudio también encontró que las naciones tropicales tienen un impacto considerablemente menor que las naciones no tropicales y que los indicadores de modernización como la industrialización y la urbanización están asociados con altos impactos.

Shi (2003) y Fan et al. (2006) ampliaron el estudio de las fuerzas impulsoras de las emisiones globales de CO₂ dividiendo a los países por niveles de ingreso de acuerdo con el esquema de clasificación del Banco Mundial, lo que permitió el análisis de las disparidades entre distintas economías nacionales. Estos estudios llegaron a la conclusión de que el impacto de la población, la “riqueza” y la tecnología en las emisiones de CO₂ varían de acuerdo a los distintos niveles de desarrollo (Shi, 2003; Fan et al., 2006). Shi (2003) encontró que el impacto del crecimiento de la población en las emisiones de CO₂ es heterogéneo con diferentes niveles de ingreso *per cápita* y a diferencia de los trabajos de Dietz y Rosa (1997) y York et al. (2003) concluye que en los países de ingreso medio-bajo la elasticidad impacto de la población es cercana a dos; mientras que en los países de ingresos altos es menor que uno²⁴.

Una de las aportaciones del estudio de Fan et al. (2006) fue la incorporación de la intensidad energética, expresada como el consumo de energía total por unidad de PIB como una aproximación al nivel tecnológico, ya que se esperaría que cuanto menor esa la intensidad energética mayor es la eficiencia de las actividades económicas y menor el nivel de emisiones de CO₂. El estudio encontró que el efecto de la intensidad energética es mayor para los países de ingresos medios-bajos debido a la alta inversión, costos de mantenimiento y largos ciclos

²⁴Sin embargo, los autores señalan que esta discrepancia puede deberse, al menos en parte, a la diferencia en la muestra empleada para sus estudios.

de investigación y desarrollo necesarios para la mejora en la eficiencia energética. El autor también llegó a resultados distintos a los de Dietz y Rosa (1997) y York et al. (2003) ya que encontró que los efectos del PIB *per cápita* sobre las emisiones de CO₂ siguen una tendencia a la baja a medida que los países se desarrollan hasta alcanzar un nivel de ingreso alto, donde se incrementa. Esto puede ser originado, de acuerdo con el autor, a que un mayor ingreso *per cápita* conduce a un mayor consumo de energía y por lo tanto de emisiones.

Lin et al. (2009) emplearon el modelo STIRPAT para analizar el impacto de las emisiones de GEI en China²⁵ en el periodo 1978-2006 mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO). Sin embargo, mencionan que la estimación presentó muy alta correlación entre las variables²⁶. Para obtener mejores estimaciones de los parámetros, normalmente se eliminan las variables altamente correlacionadas, lo que de acuerdo a Lin et al. (2009) daría lugar a pérdida de información y afectaría la confiabilidad de la estimación, por lo que, como alternativa a la eliminación de variables emplearon la regresión de cresta²⁷, que no requiere de la eliminación de variables y por lo tanto emplea toda la información. Los resultados muestran que la población tiene el coeficiente de regresión más alto, seguido del nivel de urbanización, nivel de industrialización, PIB per cápita e intensidad energética. Sin embargo, debido a las altas tasas de crecimiento experimentadas en el periodo analizado del PIB *per cápita*, la población y el nivel de urbanización, las convierten en las principales fuerzas impulsoras del impacto ambiental. Por otro lado, la intensidad energética y el nivel de industrialización restringieron el aumento del impacto ambiental.

Bargaoui et al. (2014) emplearon el modelo STIRPAT para analizar los determinantes de las emisiones de CO₂ de 214 países para el periodo 1980-2010 mediante la estimación de modelos de datos panel con efectos fijos y efectos aleatorios. Los países fueron agrupados de acuerdo

²⁵En ausencia de datos estadísticos confiables, los autores emplearon el consumo de energía para estimar las emisiones de los principales contaminantes. El impacto en el medio ambiente de los contaminantes producidos en el proceso de consumo de recursos energéticos está dado por: $I = BxE$, donde I es el impacto, E es el consumo total de energía y B es el coeficiente de impacto total de energía que incluye los pesos relativos para el C, SO_x, NO_x y compuestos orgánicos volátiles.

²⁶Debido a la presencia de multicolinealidad, la estimación por MCO no es un buen reflejo de las relaciones reales entre las variables, debido a que están tan correlacionadas unas con otras que no es posible analizar con precisión los efectos individuales de cada una de ellas (Greene, 1999).

²⁷Cuando en un modelo de regresión lineal existe un alto grado de multicolinealidad, los resultados obtenidos a partir del método de MCO son inestables. Como solución a esta situación, existen métodos alternativos a la estimación por MCO, entre los que se encuentran las regresiones alzada, de cresta y con variables ortogonales, así como el uso de componentes principales. Sin embargo, como menciona Greene (1999) la utilización de estas alternativas depende en última instancia del grado de compromiso del investigador con la teoría, ya que estas soluciones bien podrían ser intentos de hacer por la fuerza compatibles los datos y la teoría.

a sus diferentes niveles de ingreso y regiones geográficas e incorporaron variables adicionales como el nivel de urbanización, expresado como la proporción de la población total que vive en áreas urbanas, y de industrialización, expresado el peso de la actividad industrial en el PIB, así como una variable dicotómica que corresponde a la ratificación del protocolo de Kioto, ya que de acuerdo con los autores “la importancia de las actuales negociaciones internacionales sobre el clima y su efectividad pueden afectar la futura toma de decisiones”. El estudio mostró que la población y el PIB *per cápita* contribuyen al incremento de las emisiones para casi todos los países, independientemente de su nivel de ingreso y región geográfica, a diferencia de la eficiencia energética que contribuye a su reducción. La actividad industrial también contribuyó al incremento de las emisiones, especialmente para países desarrollados. Para el nivel de urbanización, los resultados dependieron del nivel de ingreso y el tipo de modelo estimado, ya que las elasticidades obtenidas fueron negativas para los países de ingresos altos y la estimación del modelo estático y positivas para los países de ingresos medios para la estimación del modelo con efectos aleatorios, por lo que los autores concluyen que cuando el nivel de urbanización alcanza un cierto nivel de desarrollo contribuye a la reducción de emisiones. La ratificación el protocolo de Kioto mostró un efecto negativo para todos los países, pero diferenciados por niveles de ingreso y grupos geográficos.

De acuerdo con Liddle (2011) pocos estudios basados en la metodología STIRPAT que emplean series de tiempo se han preocupado por el problema de la no estacionariedad de las variables empleadas²⁸. Estudios como los realizados por Cole y Neumayer (2004) y Martínez-Zarzoso et al. (2007) reconocieron este peligro y estimaron modelos de primera diferencia para evitarlo. Sin embargo, la principal crítica de este recurso es que al aplicar el operador diferencia se elimina la información a largo plazo que contienen los datos y se convierte en un modelo de corto plazo, además de que “los coeficientes estimados son constantes de proporcionalidad entre los cambios porcentuales en las variables independientes y los cambios porcentuales en la medida del impacto, en lugar de las elasticidades” (Liddle, 2011, p. 754). Por otra parte, Hassan (2016) y Salim et al. (2017), después de comprobar la cointegración de sus variables, emplearon la metodología ARDL (modelo autorregresivo de rezago distribuido) basado en el modelo STIRPAT, para analizar el impacto de la urbanización en le emisión de CO₂ para Bangladesh en el periodo 1972-2013 y los efectos de la urbanización, el consumo de energía

²⁸La no estacionariedad no presentó un problema para estudios como los realizados por Dietz y Rosa (1997), York y Dietz (2003) y York et al. (2003) al basarse en datos de corte transversal (Liddle, 2011)

renovable y no renovable, la liberalización sobre las emisiones contaminantes de 13 países asiáticos, respectivamente, por lo que también evitaron dicho problema.

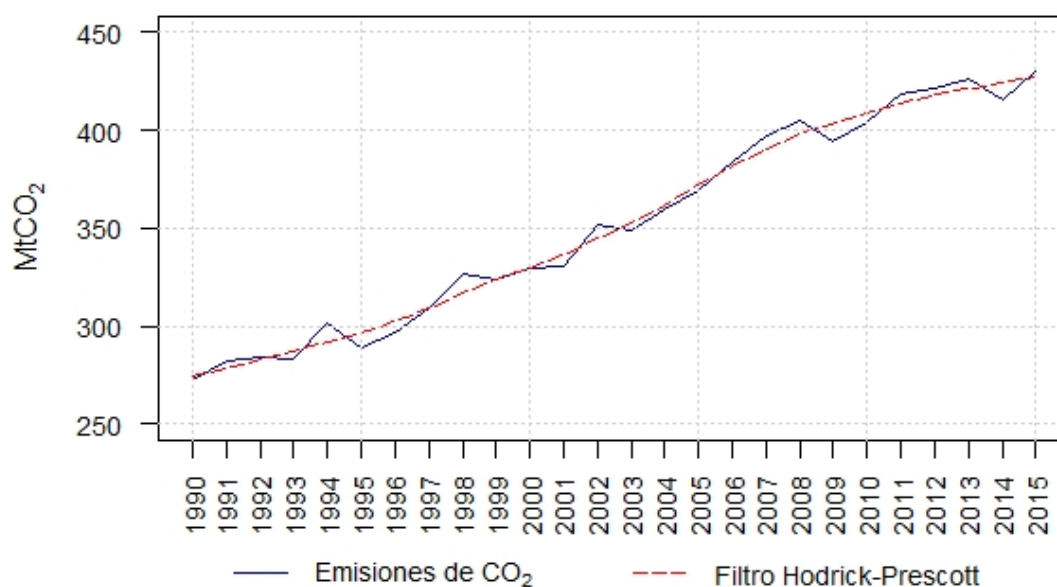
Capítulo 2

Emisiones de CO₂ en México y sus principales impulsores

2.1. Evolución de las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustible en México 1990-2015

De acuerdo con datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI), en el año 2015, México emitió a la atmósfera 430 millones de toneladas de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles, lo que representó un incremento de 58 % respecto a las emisiones de 1990 y una TCMA de 1.77 %. En este mismo año, las emisiones del país representaron el 1.3 % de las emisiones globales, con lo que se ubicó en el lugar número trece de los países con mayores volúmenes de emisiones de este gas derivadas de dicha actividad. La evolución de las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles se presenta en la gráfica (2.1).

Gráfica 2.1: Emisiones anuales de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles, México 1990-2015



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGYCEI.

Las principales actividades que contribuyeron al incremento de las emisiones de CO₂ entre 1990 y 2015 fueron el transporte y las industrias de la energía, ya que estos sectores experimentaron un crecimiento de sus emisiones de 83.6 % y 60.4 %, respectivamente. Otras actividades menos intensivas en emisiones fueron las industrias manufactureras y de la construcción y otros sectores con un crecimiento de 25.1 % y 24.6 %, respectivamente (Ver tabla 2.1).

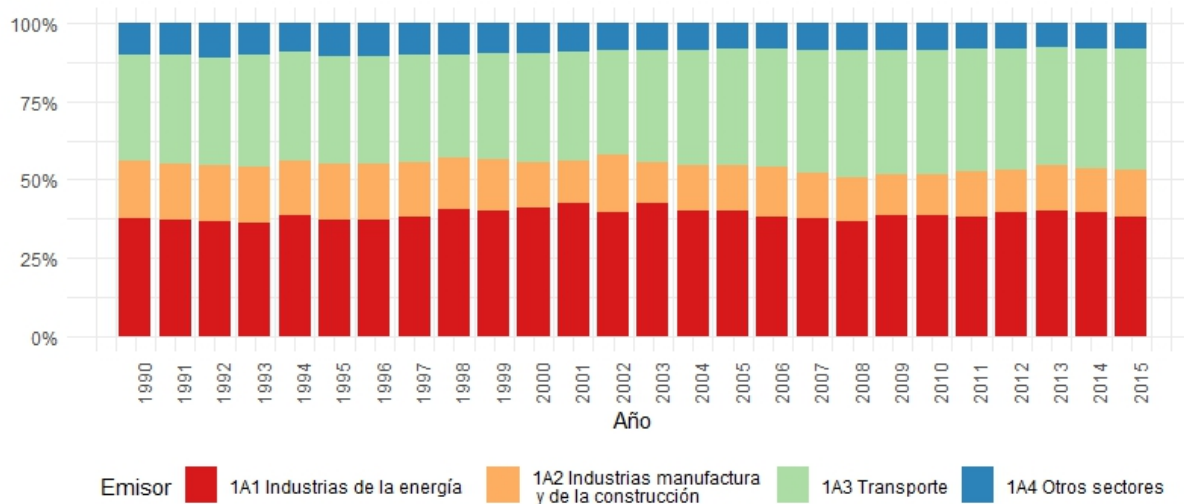
Tabla 2.1: Emisiones de las actividades de la categoría energía (MtCO₂)

	1990	2015	TC (%)	TCMA (%)
1A Actividades de quema del combustible	272,153.75	429,894.04	58.0	1.77
1A1 Industrias de la energía	102,462.90	164,307.95	60.4	1.83
1A2 Industrias manufactura y de la construcción	50,586.16	63,269.69	25.1	0.86
1A3 Transporte	91,445.84	167,855.82	83.6	2.36
1A4 Otros sectores	27,658.85	34,460.59	24.59	0.85
1A4a Comercial/institucional	3,859.67	5,262.21	36.34	1.20
1A4b Residencial	18,832.14	18,838.28	0.03	0.001
1A4c Agropecuario/silvicultura/pesca/piscifactorías	4,967.04	10,360.10	108.58	2.86

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGYCEI.

Cabe resaltar la importancia del transporte y las industrias de la energía en la generación de emisiones de CO₂, ya que en conjunto, fueron responsables de más de tres cuartas partes de las emisiones totales del año 2015; participación que se ha mantenido relativamente constante durante el periodo de análisis. La evolución de la contribución de las emisiones por sector durante 1990 y 2015 puede observarse en la gráfica 2.2.

Gráfica 2.2: Emisiones de CO₂ por sector, 1990-2015



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGYCEI .

El incremento de las emisiones del sector transporte se vio impulsado principalmente por la variación en el consumo de combustibles fósiles del sector, principalmente a una disminución del combustóleo y a un incremento del gas licuado y seco, el diésel y las gasolinas y naftas, así como un crecimiento en la importancia relativa del autotransporte. Por otra parte, el crecimiento

de las emisiones de las industrias de la energía se vio impulsado por una mayor participación del carbón y el gas natural para la generación de energía eléctrica. Finalmente, durante el mismo periodo, las industrias del Hierro y acero, Metales no ferrosos, Sustancias químicas, Pulpa, papel e imprenta y Procesamiento de alimentos, pertenecientes a la categoría de Industrias manufactureras y de la construcción, fueron las únicas que disminuyeron sus emisiones (Ver tabla 2.2).

Tabla 2.2: Emisiones de las Industrias manufactureras y de la construcción (MtCO₂)

	1990	2015	TC (%)	TCMA (%)
1A2a Hierro y acero	5,050.96	4,330.93	-14.3	-0.59
1A2b Metales no ferrosos	2,105.78	1,605.76	-23.7	-1.03
1A2c Sustancias químicas	16,715.48	8,876.68	-46.9	-2.40
1A2d Pulpa, papel e imprenta	3,347.00	2,392.70	-28.5	-1.28
1A2e Procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco	4,031.01	1,570.99	-61.0	-3.56
1A2g Equipo de transporte	198.40	444.87	124.2	3.15
1A2i Minería (con excepción de combustibles) y cantería	6,605.83	14,612.36	121.2	3.10
1A2k Construcción	341.89	871.51	154.9	3.66
1A2m Industria no especificada	12,189.83	28,563.88	134.3	3.33

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGYCEI.

2.2. Principales impulsores de las emisiones de CO₂ en México

La discusión sobre los principales fuerzas antropogénicas impulsoras de las emisiones de GEI en general, y de CO₂ en particular, involucra un conjunto complejo de factores que abarcan desde el crecimiento de la población, la tecnología, la actividad económica, las instituciones políticas y económicas, hasta las actitudes y creencias (Stern, 1992). Sin embargo, históricamente la discusión se ha centrado en torno a las relaciones existentes entre la población, la “riqueza” y la tecnología, esto debido a que no resulta sencillo encontrar datos que permitan establecer la existencia de una relación funcional estadísticamente significativa entre el valor de las variables (como las creencias) y sus impactos (Azqueta et al., 2007). Por lo tanto, a continuación se analizan los efectos del crecimiento poblacional, el crecimiento económico y el consumo de energía en las emisiones de CO₂, así como su evolución en el periodo de análisis.

2.2.1. Crecimiento poblacional

Existe una preocupación creciente de que el aumento de la población es una de las principales fuerzas impulsoras detrás del rápido incremento de las emisiones globales de CO₂ y por lo tanto, del calentamiento global. Sin embargo, no se han dedicado esfuerzos sustanciales para cuantificar su importancia o para comparar su efecto con las contribuciones de otras fuerzas impulsoras (Bongaarts, 1992). De acuerdo con Shi (2003), la preocupación sobre el impacto de la población en el incremento de las emisiones se remonta al debate sobre la relación entre el crecimiento poblacional y la escasez de recursos naturales, particularmente alimentos, y del cual se aprecian dos perspectivas teóricas principales: la malthusiana y la boserupiana. Malthus (1798) sostenía que el crecimiento de la población superaría la capacidad productiva de la tierra ya que obligaría al cultivo de tierras de menor calidad, lo que a su vez reduciría el producto marginal del trabajo y, por lo tanto, el crecimiento en el suministro de alimentos no se mantendría al nivel de la población. Por otro lado, Boserup (1965, 1981) sostiene que el aumento de la población es un requisito previo para la innovación tecnológica en la agricultura. Ésta haría posible un aumento en los rendimientos y una distribución mas eficiente de los alimentos, lo que permitiría abastecer a una población mas grande con el mismo nivel de bienestar. Si bien ninguno de estos autores estaba particularmente preocupado por la degradación ambiental, sus posiciones han sido retomadas en los recientes debates sobre población y medio ambiente (O'Neill et al., 2005). Así los estudios empíricos sobre la relación entre el crecimiento de la población y las emisiones de CO₂ proporcionan dos hipótesis comparables; por un lado están quienes afirman que la elasticidad de las emisiones con respecto al cambio poblacional es mas que proporcional, mientras que otros, de tradición boserupiana, sostienen que esta relación no existe o es negativa.

Shi (2003) identifica dos líneas de trabajo empírico sobre la relación entre la población y las emisiones de CO₂, una de naturaleza descriptiva y otra con enfoque estocástico. Los estudios descriptivos se basan en la identidad IPAT por lo que generalmente atribuyen a las variaciones de las emisiones a cambios en la población, la afluencia y la intensidad energética. La segunda línea se centra principalmente en las relaciones entre crecimiento económico y las emisiones, incluyendo elementos para probar la relación propuesta por la curva ambiental de Kuznets. Sin embargo, de acuerdo con Dietz y Rosa (1994), la mayoría de los estudios que analizan el impacto de la población utilizan la demanda como indicador de esta fuerza impulsora, lo que

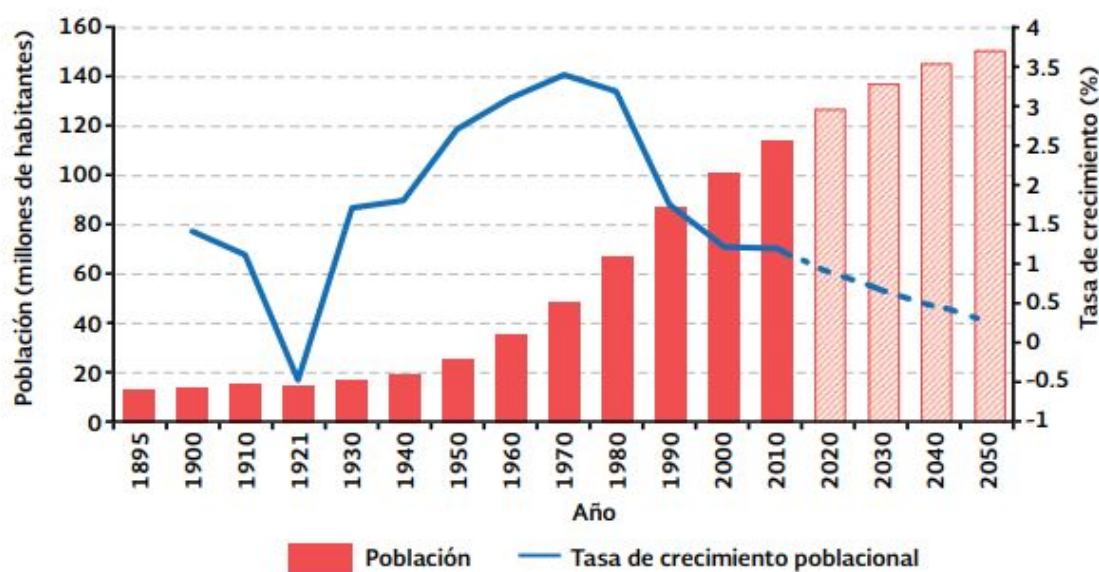
simplifica sus impactos de manera considerable ya que variables como la distribución geográfica de la población, (como el crecimiento de la población urbana y rural, la densidad de la población o los fenómenos migratorios) la estructura de edad de la población y su relación con sus patrones de consumo, así como su ritmo de crecimiento, pueden ser tan importantes como el tamaño.

Evolución de la población en México

México experimentó, al igual que el resto del mundo, un importante crecimiento de su población durante la segunda mitad del siglo XX. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el año 2015 habitaron en México aproximadamente 119.5 millones de personas, lo que representó un crecimiento de 47.2% con respecto a 1990 a una tasa promedio anual de 1.5%. La gráfica 2.3 muestra la evolución de la población en México desde 1910 hasta 2015 y las proyecciones de la población estimadas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) hasta el año 2050.

En la gráfica 2.3 se puede observar que a la caída de la población que experimentó el país entre 1910 y 1920 a causa del conflicto armado revolucionario le siguió un periodo de rápido crecimiento que alcanzó su valor máximo en la década de 1970. Sin embargo, en décadas posteriores se observó una reducción paulatina de la tasa de crecimiento de la población, originada principalmente por “la reducción de la fertilidad que sobrepasó el efecto positivo sobre la tasa de crecimiento ocasionada por la reducción de la tasa de mortalidad en el país” (SEMARNAT, 2015, p.43). Las proyecciones indican que la población seguirá creciendo para alcanzar en el año 2050 un total de 148.2 millones de habitantes, aunque a un ritmo de crecimiento cada vez menor.

Gráfica 2.3: Población total y tasas de crecimiento en México, 1910-2050



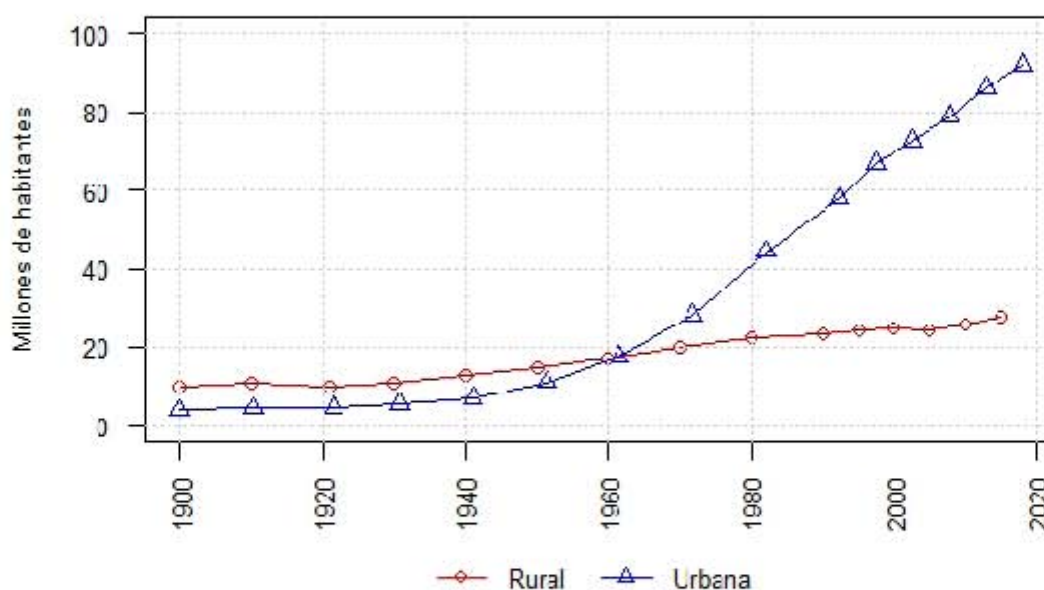
Fuente: SEMARNAT (2015).

Otro rasgo sobresaliente de la población mexicana y que comparte con el resto del mundo¹, es su concentración en zonas urbanas. La ubicación y distribución espacial de la población resulta de especial interés al analizar las ciudades como sistemas energéticos, y su relación con las emisiones de GEI². En el año 2010, la población en México se distribuía en un poco más de 192 mil localidades, de las cuales aproximadamente 189 mil eran de tipo rural, poco más de 3 mil de tipo mixto o en transición y 630 urbanas (SEMARNAT, 2015). Aún cuando la mayor parte de las localidades en el país son rurales, la población mexicana, ha tendido a la urbanización. En la grafica 2.4 se puede observar la transición hacia la urbanización ya que, en 1960, el 50.7% de la población vivía en localidades urbanas, porcentaje que creció a 77% en el año 2015.

¹Actualmente el 55% de la población mundial, es decir, aproximadamente 4.2 mil millones de personas viven áreas urbanas y se estima que este porcentaje alcance el 68% para el año 2050.

²A pesar de que representan el 2% de la superficie del planeta, las ciudades generan el 80% del PIB, consumen cerca de tres cuartas partes de la energía y son responsables del 70% de las emisiones mundiales de GEI (Banco Mundial, 2018; Naciones Unidas, 2018).

Gráfica 2.4: Población rural y urbana en México, 1900-2015



Nota: El Censo de 1910 considera localidades urbanas aquellas de 4000 o más habitantes. El Censo de 1921 considera localidades urbanas aquellas de 2000 o más habitantes. El resto de la información considera localidades urbanas de 2500 o más habitantes.

Fuente: Elaboración propia con datos de: INEGI. Estadísticas históricas de México. México. 2009.

INEGI. Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2010. México. 2011.

INEGI. Tabulados de la encuesta Intercensal 2015. México. 2016.

Una medida que permite visualizar la relación de las emisiones CO₂ con la población, son las emisiones *per cápita*. Entre 1990 y 2015 la emisión per cápita de CO₂ experimentó un incremento de 9.56% entre 1990 y 2015 al pasar de 3.23 toneladas a 3.54 toneladas en 2015. El promedio de las emisiones *per cápita* en esos 25 años fue de 3.42 ton de CO₂, cantidad por debajo del promedio mundial que de acuerdo al Banco Mundial es de 4.97 ton/habitante. Este lento aumento puede explicarse debido a que las emisiones de CO₂ han crecido a una tasa ligeramente mayor (1.77%) que la población (1.42%) lo que ha mantenido relativamente estable la emisión *per cápita* de dióxido de carbono en este periodo.

2.2.2. Crecimiento económico

A pesar de las interrelaciones existentes entre el proceso económico y el medio ambiente, la ciencia económica parece haberse consolidado olvidando esta evidencia (Naredo, 2010). Sin embargo, los síntomas del deterioro medioambiental de los años sesenta provocaron un

incremento en el interés por el análisis de estas relaciones. No existe una única visión para abordar la relación entre el proceso económico y el medio ambiente. Esto ha dado lugar a diversas escuelas de pensamiento y estrategias de gestión ambiental que van desde los ambientalistas extremos (*Deep ecology*) hasta los optimistas tecnológicos o cornucupianos (Foladori, 2005; Leff, 2008).

Desde la ciencia económica, dos son los principales enfoques que han centrado su atención en el análisis de estas interrelaciones: la Economía Ambiental y la Economía Ecológica. La Economía Ambiental es el resultado de intentar incluir los problemas medioambientales como objeto de estudio bajo el marco analítico de la escuela neoclásica. Considera que el medio ambiente, al no tener precio ni dueño, es externo al mercado. La consecuencia es una asignación ineficiente de los recursos productivos. Cuando existen externalidades, el mercado no asigna eficientemente los recursos, es decir, el mercado “falla”, puesto que existen costos externos que no son valorados adecuadamente a través de sus propios mecanismos. Su incorporación se daría mediante la internalización de esas externalidades adjudicándoles un precio, por lo que se ocupa principalmente de la valorización monetaria del medio ambiente. Así, desde la Economía Ambiental, el deterioro y agotamiento ambiental se aborda desde la perspectiva de las externalidades y las soluciones al problema pasarían por la internalización de esas externalidades basada en las teorías de Pigou (1920) y Coase (1960) (Chang, 2005).

La Economía Ecológica se consolida durante los años setenta y ochenta del siglo XX, y como respuesta a dos problemas. Por un lado, como respuesta teórica a la crisis ambiental que desde los años sesenta comienza a ser entendida como grave, y en gran parte resultado de las actividades humanas. Por otro, como un marco teórico más amplio que el que la economía neoclásica. En este último sentido, la economía ecológica se construye como crítica al tratamiento de la economía neoclásica de la problemática ambiental. Su principal característica es su carácter transdisciplinario, derivado de la necesidad de estudiar la relación entre los ecosistemas naturales y el sistema económico (Foladori, 2001).

Al debate teórico sobre la posibilidad de compatibilizar el crecimiento económico y la calidad ambiental se han sumado una serie de trabajos que han tratado de encontrar evidencia empírica sobre la misma. Mientras que algunos sostienen que existe una relación negativa, otros afirman que es la única solución para la protección del ambiente. En la década de

1970 predominaba la idea de que el crecimiento económico implicaba, inexorablemente, contaminación y agotamiento de recursos naturales, lo cual, a su vez generaría límites al crecimiento económico. Esta idea fue plasmada, entre otros trabajos, en la publicación del Club de Roma; Los límites al crecimiento, que mediante el análisis dinámico de sistemas concluyó que, de continuar con la tendencia observada en 1972 de crecimiento de la población mundial, industrialización, contaminación, producción de alimentos y agotamiento de los recursos naturales, los límites al crecimiento serían alcanzados en algún momento de los próximos cien años (Meadows et al., 1972). Esta publicación trajo consigo un enorme interés en todo el mundo y generó una gran controversia. Sin embargo, su publicación contribuyó a trasladar el debate en torno al medio ambiente de la discusión sobre los problemas locales de contaminación hacia una reflexión más sistemática sobre las tasas de utilización y explotación de los recursos naturales en todo el mundo, además de brindar una representación más rigurosa de las interdependencias entre los procesos económicos y el deterioro ambiental e inauguró la carrera para elaborar proyecciones de la economía mundial (Urquidí y Egea, 2007). Sobre esta noción se desarrolló la idea de que el crecimiento económico y de la población derivaría inevitablemente en niveles crecientes de deterioro ambiental.

En los años noventa, sin embargo, se postula un nuevo paradigma; los problemas relacionados con la calidad ambiental empeoran a medida que el ingreso *per cápita* crece, pero sólo hasta cierto punto. Cuando el ingreso alcanza un determinado nivel (*turning point*), se generan mejoras ambientales. Esta relación con forma de U invertida entre ingreso *per cápita* y calidad ambiental recibió el nombre de curva ambiental de Kuznets (EKC, por sus siglas en inglés) en referencia a la relación postulada por Kuznets (1955, 1963) entre ingreso *per cápita* y desigualdad en la distribución del ingreso. Simon Kuznets analizó los cambios a largo plazo en la distribución del ingreso de diversos países después de la Segunda Guerra Mundial y encontró que en las primeras etapas de desarrollo puede presentarse un incremento en la concentración del ingreso, pero al mantenerse el crecimiento económico ésta disminuye. De acuerdo con Urquidí y Egea (2007) la idea de que puede existir una relación análoga entre el crecimiento y la calidad del medio ambiente surgió de los trabajos de Grossman y Krueger (1991), Shafik y Bandyopadhyay (1992) y Selden y Song (1994).

La EKC parte del supuesto de que la relación entre crecimiento económico y calidad ambiental no es constante a lo largo de las diferentes etapas de desarrollo. Panayotou (1993) menciona que

en niveles bajos de desarrollo la cantidad e intensidad de la degradación ambiental es limitada debido a que la población realiza actividades económicas de subsistencia y genera cantidades limitadas de residuos biodegradables. A medida que el desarrollo económico se acelera, se produce un mayor nivel de deterioro ambiental debido a la intensificación de la agricultura y de la extracción de recursos naturales, así como al crecimiento de la industrialización y la urbanización. Finalmente, en niveles mas altos de desarrollo las tasas de degradación ambiental suelen disminuir debido al cambio estructural hacia economías terciarizadas e industrias relacionadas con la tecnología y la información, así como a cambios en los patrones de consumo, mejoras en las regulaciones ambientales y mayores gastos en protección ambiental. Estos cambios estructurales pueden explicar la relación invertida entre las emisiones y el nivel de desarrollo económico.

El hecho de que el deterioro ambiental no crezca al mismo ritmo que la actividad económica puede deberse a diversos factores. Grossman y Krueger (1991) mencionan tres efectos³: el efecto escala, el efecto composición y el efecto tecnológico. El efecto escala está relacionado con el volumen de la producción, por lo que el crecimiento de la actividad económica debería producir, *ceteris paribus*, un incremento proporcional de las emisiones contaminantes. El efecto composición está relacionado con la estructura productiva por lo que recogería el aumento o disminución de las emisiones debidas a una variación en la composición sectorial de la producción y el efecto tecnológico, el cual determina la generación de contaminantes por unidad de producto; es decir, la intensidad de contaminación de la producción de cada producto. Por lo tanto, si el crecimiento de la actividad económica va acompañado de un menor crecimiento de las emisiones se debe a que están operando otros efectos (el efecto composición y/o el efecto tecnológico) que compensan parcial o totalmente el efecto escala. Si la compensación es total, el crecimiento estaría asociado a una disminución de las emisiones, por otro lado si la compensación es parcial, iría acompañado de un aumento de las emisiones, aunque no en la misma proporción, lo que daría como resultado una disminución relativa, pero no absoluta de las emisiones (Vázquez, 2007).

La EKC invierte el debate de la década de los setenta, es decir, no solo no existen límites al crecimiento, sino que el crecimiento económico sería el camino para lograr la conservación del

³Grossman y Krueger (1991) mencionan estos tres mecanismos separados por los cuales un cambio en la política de comercio e inversión extranjera puede afectar el nivel de contaminación y la tasa de agotamiento de los escasos recursos ambientales.

medio ambiente. Las implicaciones de la EKC para la política ambiental fueron alentadoras, pues el desarrollo dejaba de estar asociado con consecuencias inexorables de contaminación y pasaba a ser compatible con el cuidado del medio ambiente, por lo que para alcanzar los objetivos ecológicos lo importante era garantizar el crecimiento económico sostenido. Desde entonces diversos estudios han tratado de encontrar evidencia empírica de la existencia de la EKC para diversos indicadores de calidad ambiental mostrando que esta relación no es única sino que varía con el problema ambiental considerado.

Este planteamiento ha recibido diversas críticas, que van desde la deficiencia en la calidad y cobertura de los datos, hasta la necesidad de mejorar los procedimientos econométricos para su estimación. Stern et al. (1996) mencionan que si bien los datos de indicadores medioambientales han mejorado en cobertura y calidad puede que los datos existentes no sean los apropiados para probar la EKC, por otro lado, los datos que más lo han hecho han sido los de aquellos contaminantes para los que se han establecido objetivos explícitos de reducción, lo que podría sesgar los resultados hacia la hipótesis EKC en la medida en que sean precisamente esos indicadores medioambientales los más utilizados en los estudios (Vázquez, 2007).

Urquidi y Egea (2007) mencionan que al suponer que la variedad de contaminantes se mantiene constante a lo largo del proceso de crecimiento no contempla que el cambio estructural que subyace la EKC traiga aparejado un reemplazo de ciertos contaminantes por otros, por lo que el efecto neto en el medio ambiente sería difícil de calcular. Además, supone una causalidad unidireccional entre crecimiento económico y calidad ambiental, es decir, considera que los niveles de contaminación tienen efectos perjudiciales sobre la calidad de vida, pero no considera que algunos tipos de degradación ambiental limiten las posibilidades futuras de crecimiento. Labandeira et al. (2007) mencionan que las estimaciones de la EKC están basadas en el ingreso per cápita medio y debido a que éste no sigue una distribución normal sino una distribución sesgada a la derecha, si se asume la relación de la curva, la mayor parte de los países estarían en fases de desarrollo inferiores a los que indicaría la media. Además, al centrar la atención en una variable específica para explicar la evolución de un indicador de deterioro ambiental se corre el riesgo de sesgo por variables omitidas (Stern y Common, 2001).

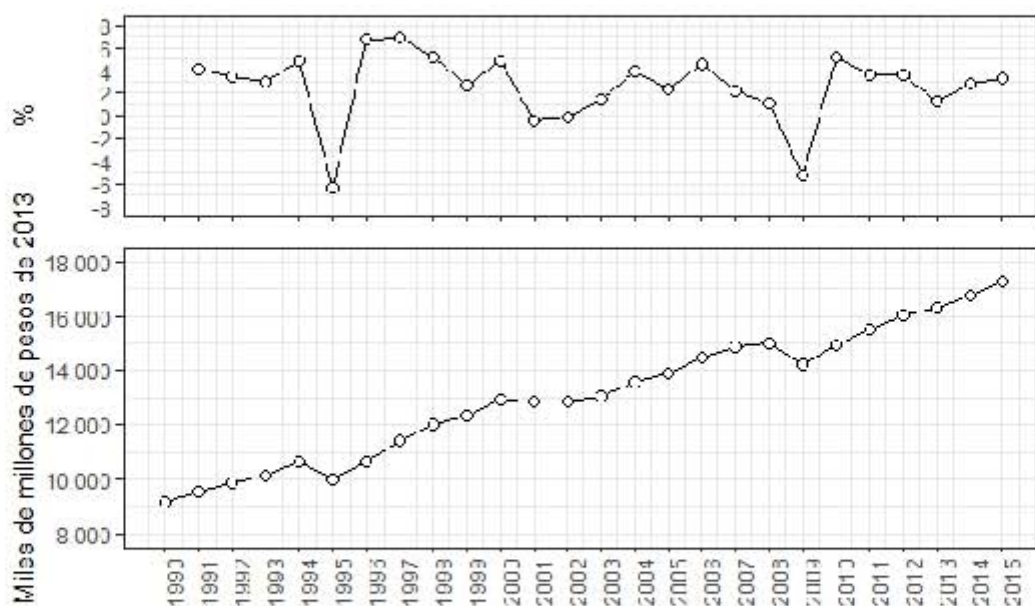
El planteamiento también asume que las relaciones comerciales asociadas con el desarrollo no tienen efectos en la calidad ambiental, es decir, no considera la posibilidad de que algunos

países exporten sus impactos ambientales mediante la relocalización geográfica de las industrias más contaminantes hacia países con regulaciones ambientales más laxas o debido a los costos relativos de los factores (Stern et al., 1996). A esta posibilidad se le ha nombrado como efecto desplazamiento. Éste se produce cuando en un país se reducen las emisiones porque también lo hacen las actividades productivas intensivas en energía y recursos, pero sin que se modifiquen sus pautas de consumo, sino que su demanda se satisface con importaciones. Si la explicación a la reducción de las emisiones de los países con mayores niveles de ingreso per cápita estuviera en el efecto desplazamiento, no habría una disminución de las emisiones globales, sino solo un desplazamiento geográfico de las mismas. Debido a esto, es claro que no todos los países podrían lograr una transformación similar, independientemente del nivel de ingreso alcanzado (Vázquez, 2007). Finalmente, considera que los problemas ambientales no son acumulables y son reversibles por lo que de existir la EKC, el turning point de la curva podría ser mayor que el umbral de pérdida de resiliencia de un ecosistema, lo que generaría daños irreversibles independientemente del ingreso alcanzado.

Evolución de la actividad económica en México, 1990-2015

La actividad económica consiste, de manera general, en la producción de bienes y servicios para su consumo. Sin embargo, a lo largo de este proceso pueden surgir diversos mecanismos que contribuyan a la generación de impactos ambientales. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística (INEGI), entre 1990 y 2015 la economía mexicana creció a una tasa promedio anual de 2.47%, sin embargo, su desempeño ha variado a lo largo de este periodo, ya que el país ha experimentado los efectos negativos de las crisis y recesiones económicas acontecidas en el siglo XXI (Ver gráfica 2.5).

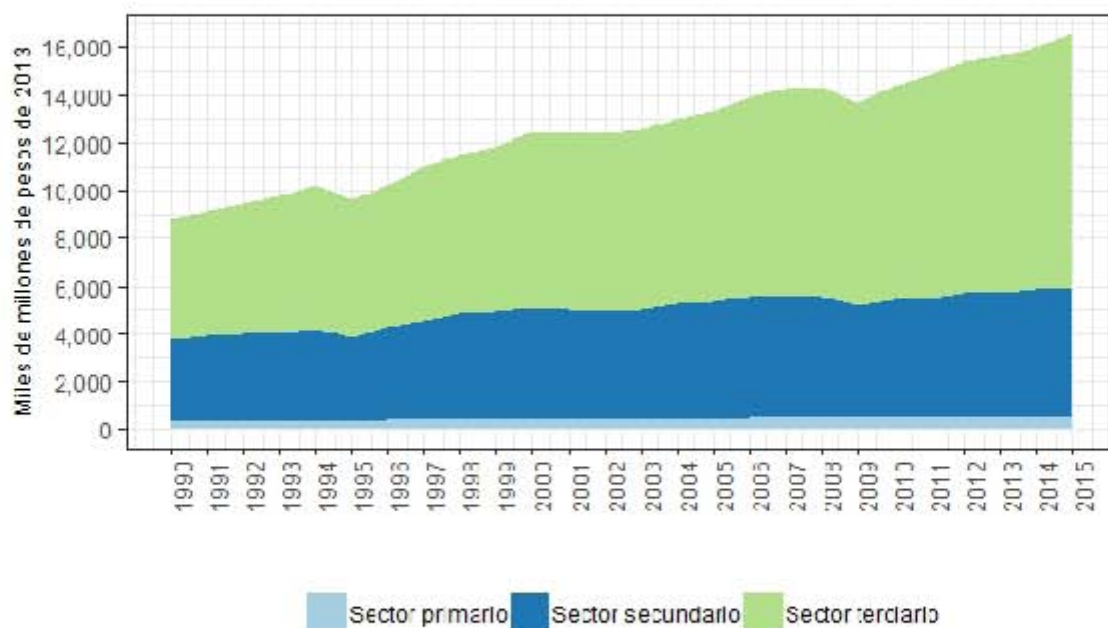
Gráfica 2.5: Producto Interno Bruto de México y tasas de crecimiento, 1990-2015



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGYCEI y el INEGI.

En relación a la estructura sectorial del PIB, el sector primario experimentó un crecimiento de 53.6% entre 1990 y 2015 a una tasa promedio anual de 1.7%. Sin embargo, históricamente este sector ha representado una baja participación en el total de la economía. El sector secundario experimentó un crecimiento de 57% para el mismo periodo y una tasa promedio anual de 1.7%. Por su parte el sector terciario creció 111% a una tasa media anual de 3%, por lo que fue el sector productivo con mayor crecimiento de la economía. Las ramas que conforman este sector, representaron en promedio 6 de cada 10 pesos generados por el PIB entre 1990 y 2015. En la gráfica 2.6, se puede observar como la economía mexicana se ha ido terciarizando cada vez más, es decir, ha experimentado una transformación en su estructura basada en el sector servicios.

Gráfica 2.6: Producto Interno Bruto sectorial, 1990-2015

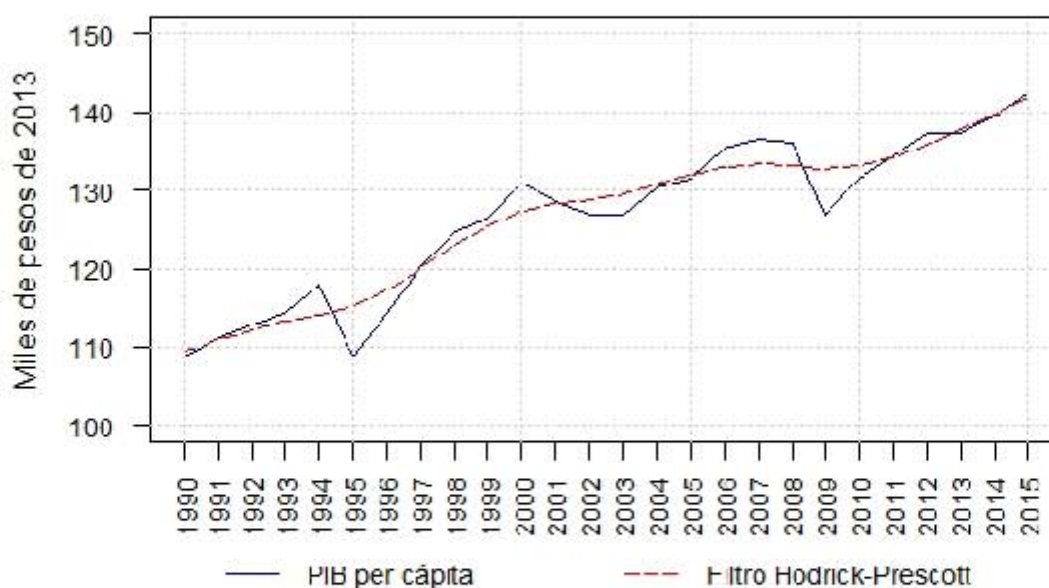


Nota: No incluye impuestos a los productos.

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI sistema de cuentas nacionales.

Diversos estudios empíricos han tratado de mostrar que la condición socioeconómica de la población puede tener un impacto relevante en la degradación del medio ambiente, en especial aquellos que se basan en la EKC, y que sostienen que la degradación ambiental podría crecer hasta cierto límite, para luego disminuir a medida que el PIB *per cápita* aumenta. El PIB *per cápita* representa el valor monetario de todos los bienes y servicios finales generados en el país que le correspondería a cada habitante en un año si la riqueza se repartiera igualmente y se utiliza como una medida indirecta de la calidad de vida de la población en una economía. En el año 2015 el PIB *per cápita* de México fue de 142.4 miles de pesos, lo que representó un incremento de 30.9% con respecto al año 1990 y una TCMA de 1.04%. (Ver Gráfica 2.7).

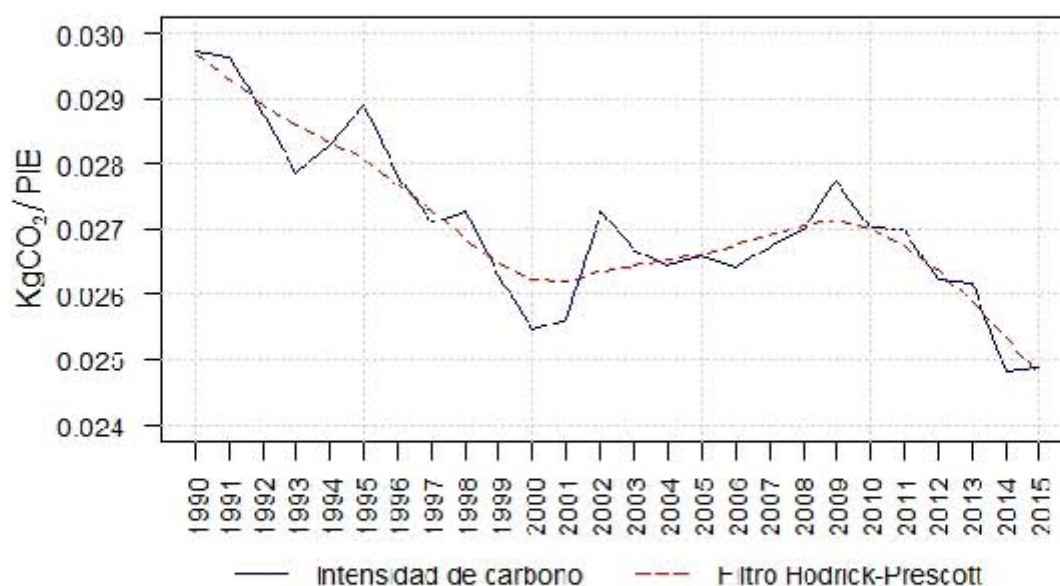
Gráfica 2.7: Producto Interno Bruto *per cápita* de México, 1990-2015



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGYCEI y el INEGI sistema de cuentas nacionales.

Las emisiones de CO₂ también pueden analizarse considerando el crecimiento económico del país medido a través del PIB. El indicador de intensidad de carbono muestra las emisiones de CO₂ generadas por unidad del PIB nacional. La intensidad de carbono en 1990 fue de 0.029 KgCO₂/PIB, mientras que en 2015 fue de 0.024; es decir 16.3% menor, con una TCMA de -0.72%. Este indicador muestra que existe una tendencia en México de una disminución de la cantidad de emisiones de CO₂ en relación con la magnitud de la economía que las genera. La evolución de la intensidad de las emisiones puede verse en la gráfica (2.8).

Gráfica 2.8: Intensidad de carbono de México, 1990-2015



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGYCEI y el INEGI.

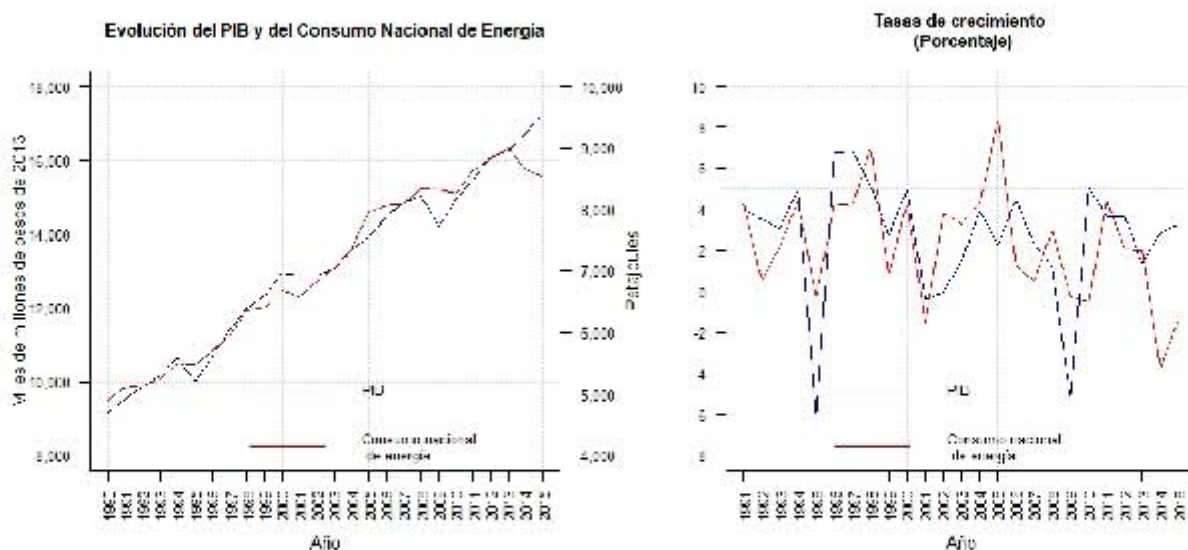
2.2.3. Consumo de energía

La energía se ha convertido en un factor esencial para el funcionamiento de las economías modernas y el acceso a una mejor calidad de vida de la sociedad (Escalante, 2005; Catalán y Sánchez, 2009). Sin embargo, los procesos de producción y consumo de energía representan una de las principales fuentes de emisiones de GEI, particularmente de CO₂. En este sentido surge la necesidad de analizar su evolución y su relación con las principales variables macroeconómicas.

Evolución del consumo de energía en México

De acuerdo con datos del Sistema de Información Energética (SIE), entre 1990 y 2015, el consumo de energía en México experimentó un crecimiento de 74 %, con un promedio anual de 2.2 %. El incremento del consumo de energía durante este periodo ha obedecido a la dinámica y estructura de la economía nacional y muestra una estrecha relación con el crecimiento económico que puede apreciarse en la gráfica 2.9.

Gráfica 2.9: Evolución del PIB y el Consumo Nacional de Energía

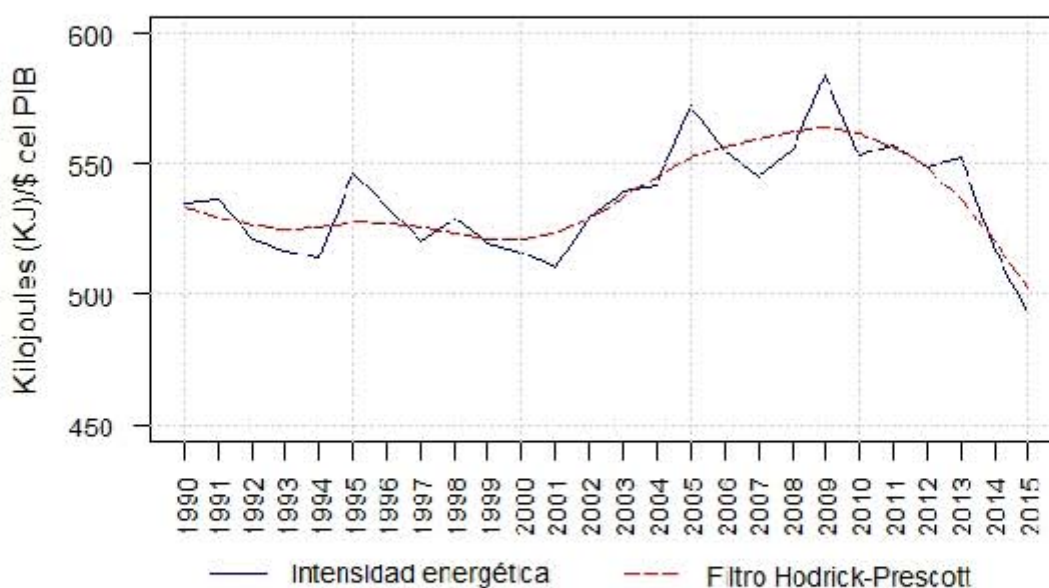


Fuente: Elaboración propia. INEGI. Sistema de Cuentas Nacionales de México, SIE Sistema de información energética.

Si bien el consumo energético muestra una trayectoria ascendente, que sigue con cierto rezago los cambios en la trayectoria del PIB, la relación no siempre se mantiene, esto debido a que, durante los periodos de desaceleración de la economía, las centrales y plantas de producción industrial necesitan permanecer encendidas, situación que impide que el consumo energético disminuya a la par de la actividad económica (SENER, 2018).

A pesar de la estrecha relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico que persiste en el país, durante los últimos años se observó un proceso de desacoplamiento entre ambas. Este proceso se hace evidente al analizar la evolución de la intensidad energética (IE) del país. La IE es un indicador que mide la cantidad de energía requerida para producir un peso del PIB, por lo que provee un panorama general del desempeño de la eficiencia energética. Durante los 25 años de estudio, la IE de México disminuyó a una tasa media anual de 0.31 % y pese a la irregularidad en su comportamiento, a partir del año 2011 mostró una marcada tendencia a la baja, originada entre otras causas, por la creciente terciarización de la economía, así como al crecimiento de las actividades económicas del sector industrial menos intensivas en consumo energético (SENER, 2018). La evolución de la intensidad energética de México se presenta en la gráfica 2.10.

Gráfica 2.10: Intensidad energética de México 1990-2015

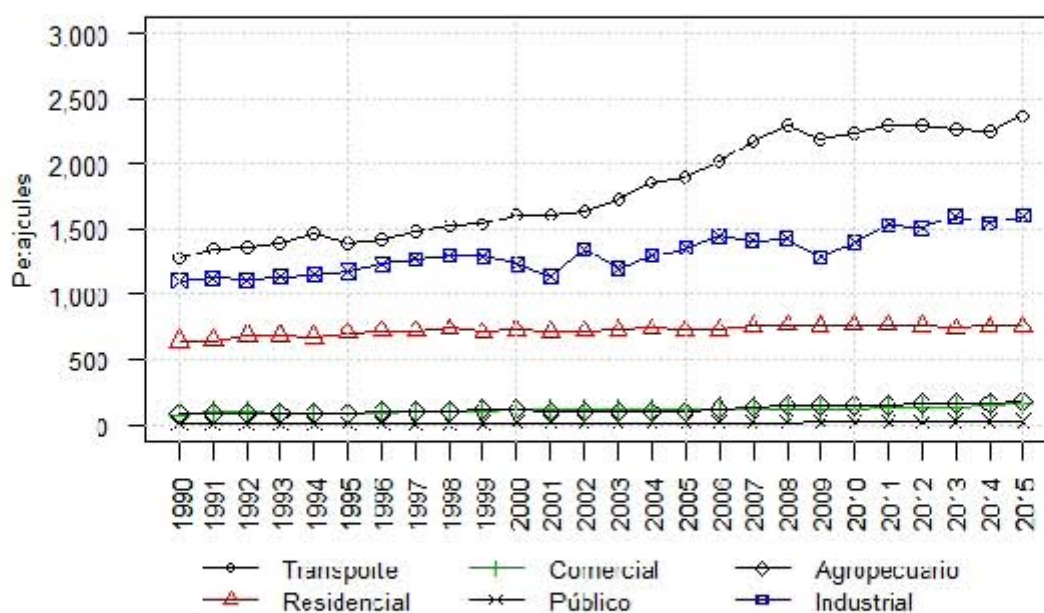


Fuente: INEGI. Sistema de Cuentas Nacionales de México, SIE Sistema de información energética y cálculos propios.

La relación entre consumo de energía y población puede analizarse mediante el consumo de energía *per cápita* y puede dar una idea general de las pautas del uso de energía de una sociedad. Este indicador fue de 70.28 gigajoules (GJ) en el año 2015, lo que representó un crecimiento de 20.7% con respecto de 1990, lo que sugiere que la población se ha hecho más intensiva desde el punto de vista energético.

A nivel sectorial, el consumo de energía se concentró principalmente en tres sectores; el transporte (27.7%), la industria (18.8%) y el sector residencial (8.9%). Además, entre 1990 y 2015, estos tres sectores experimentaron un crecimiento sostenido en su consumo energético. El consumo del sector transporte creció 85.2%, el sector industrial, 44.8% y finalmente el residencial, 17.7%. Cabe resaltar el papel del sector transporte que representó aproximadamente el 28% del consumo nacional de energía y se estima que en el año 2015 su consumo fue de 2,361 PJ; de los cuales el 90.5% se concentró en el transporte automotor. (Ver gráfica 2.11).

Gráfica 2.11: Consumo de energía por sectores, México 1990-2015



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética, SIE.

En relación a la estructura del consumo de energía por tipo de energético, entre 1990 y 2015 se observaron cambios en la mezcla de fuentes de energía utilizadas para satisfacer las necesidades energéticas del país. Por ejemplo, las fuentes de origen fósil incrementaron su participación en el total nacional impulsados por el crecimiento del carbón y el gas natural. Además, durante el mismo periodo, el país experimentó un proceso de sustitución del petróleo por gas natural originado, entre otras causas, por el auge en el uso de tecnologías de ciclo combinado para la generación de electricidad y las políticas de fomento a la explotación de los recursos gasíferos del país (SENER, 2018). Por otra parte, las energías renovables experimentaron un crecimiento de 45 %, sin embargo, su participación en el total nacional se redujo de 9.1 % a 7.6 %.

Como se puede apreciar en la tabla (2.3), México sigue siendo un país altamente dependiente de los combustibles fósiles; ya que más del 90 % de su consumo energético dependió del petróleo, el gas natural y el carbón. En contraparte, el porcentaje de energía proveniente de fuentes no fósiles disminuyó 10.3 % a una tasa media anual de 0.4 %.

Tabla 2.3: Consumo nacional de energía por energético
(Petajoules)

	1990	2015	TC (%)	TCMA 1990-2015 (%)	Estructura 1990 (%)	Estructura 2015 (%)
Total	4,900.66	8,528.87	74.03	2.15	100	100
Combustibles fósiles	4,424.02	7,784.73	75.97	2.20	90.27	91.28
Carbón y coque de carbón	141.27	531.54	276.26	5.23	2.88	6.23
Crudo y petrolíferos	2,782.20	3,462.18	24.44	0.84	56.77	40.59
Gas natural y condensados	1,500.56	3,791.01	152.64	3.63	30.62	44.45
Nuclear	31.05	120.41	287.73	5.35	0.63	1.41
Renovables	445.59	647.91	45.41	1.45	9.09	7.60
Biogás	ND	1.87	-	-	-	0.02
Hidro	88.13	111.21	26.19	0.90	1.80	1.30
Geo, eólica, solar	0.73	176.17	2,4038.23	23.50	0.01	2.07
Biomasa	358.13	358.67	0.15	0.005	7.31	0.04
Comercio neto de electricidad	ND	-24.18	-	-	-	0.28

Nota: ND: No disponible

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética, Sener.

El análisis descriptivo de las principales relaciones existentes entre las variables nos permitió observar que el incremento en el consumo de energía a base de combustibles fósiles, impulsado principalmente por el transporte automotor, la industria y el sector residencial, se ha traducido en un aumento de las emisiones de CO₂. También permitió observar que pese a las mejoras en indicadores tales como la intensidad energética y descarbonización, las emisiones y consumo de energía *per cápita* experimentaron un crecimiento. Para obtener evidencia empírica más sólida se procedió al análisis econométrico.

Capítulo 3

Metodología, datos, evidencia empírica y escenarios de emisión

3.1. Metodología

Debido a las limitaciones en el acceso y calidad de la información, los primeros análisis que emplearon el modelo STIRPAT se basaron en datos de corte transversal (Dietz y Rosa, 1997; York et al., 2003; York y Dietz, 2003). Sin embargo, Dietz y Rosa (1997) mencionan que, para avanzar en la comprensión de los impactos de las fuerzas antropogénicas en el medio ambiente, se vuelve necesario analizar cómo varían éstas en diversos contextos espaciales y temporales, para lo cual se han incorporado análisis de datos de series de tiempo. Éstos permiten la estimación de modelos en los que los coeficientes cambian con el tiempo y pueden brindar evidencia empírica más sólida. Sin embargo, como menciona Liddle (2011), pocos estudios basados en el modelo STIRPAT que emplean series de tiempo se han preocupado por el problema de la no estacionariedad de las variables empleadas. Esto podría representar un problema ya que la inferencia estadística asociada con los procesos estacionarios¹ ya no es válida si las series de tiempo son realizaciones de procesos no estacionarios. Granger y Newbold (1974) mostraron, a partir de un experimento de simulación que, la estimación² entre series no estacionarias e independientes unas de otras originaban un importante número de rechazos de la no significancia de los parámetros estimados, además de un elevado coeficiente de determinación (R^2) y un bajo valor Durbin Watson³ (d), indicativo de una fuerte autocorrelación de los residuos. Con esto demostraron que los resultados de este tipo de estimaciones pueden a menudo sugerir la existencia de una relación estadísticamente significativa en variables donde en realidad no la hay, es decir, de tipo espurio (Granger y Engle, 2004). Sin embargo, la regresión no sería espuria si existiera una relación a largo plazo entre ellas, es decir, si dos o más series no estacionarias están cointegradas.

El concepto de cointegración fue desarrollado por Engle y Granger (1987) y lo definen de la siguiente forma:

¹Un proceso estocástico (y_t) es estrictamente estacionario si sus propiedades estadísticas o probabilísticas no cambian con el tiempo; esto es, si su función de distribución acumulativa es independiente del tiempo: $F(y_1, y_2, \dots, y_n) = F(y_{1+\tau}, y_{2+\tau}, \dots, y_{n+\tau})$, para todo n y rezago τ finitos admisibles (Montenegro, 2010). Se considera estacionario en sentido débil si tiene momentos de primer y segundo orden (media, varianza y covarianzas) finitos y no varían en función del tiempo.

²Montenegro (2010) menciona que este problema puede presentarse en estimaciones por mínimos cuadrados ordinarios, mínimos cuadrados no lineales, máxima verosimilitud o método generalizado de momentos.

³La prueba Durbin Watson (d) se utiliza para detectar la autocorrelación de los residuos (también llamada correlación serial) de un análisis de regresión. Se ha propuesto como regla práctica que si $R^2 > d$ puede ser indicativo de una posible regresión espuria (Gujarati y Porter, 2010).

Los componentes de un vector $Y_t(m \times 1)$ se dice que están cointegrados de órdenes d y b , y se denota por $Y_t \sim I(d, b)$, si

- todos los componentes de Y_t son integrables del mismo orden $d, I(d)$,
- existe un vector α no nulo, tal que $\alpha'Y_t \sim I(d - b)$, con $b > 0$.

Al vector α se le denomina vector de cointegración (Engle y Granger, 1987, p.253).

Existen diversos métodos para comprobar la existencia de cointegración entre series de tiempo⁴. Debido a la sencillez de su procedimiento, en el presente trabajo se empleó la metodología de dos etapas propuesta por Engle y Granger (1987). Ésta permite estimar consistentemente mediante MCO el vector de cointegración y modelar tanto las relaciones de largo plazo como la dinámica a corto plazo de las variables mediante el Mecanismo de Corrección de Error (MCE). La metodología econométrica propuesta por Engle y Granger (1987) consiste en primer lugar en identificar el orden de integración de las series utilizadas. Se dice que una variable está integrada de orden d , y se denota como $I(d)$, si debe diferenciarse d veces para ser estacionaria. Por lo tanto, una variable estacionaria es integrada de orden cero, es decir, $I(0)$, y una variable que debe diferenciarse una vez para volverse estacionaria es integrada de orden uno o $I(1)$. Un procedimiento frecuentemente utilizado para este fin es el basado en contrastes o tests de raíces unitarias⁵. Entre los más usuales se encuentran las desarrolladas por Fuller (1976), Dickey y Fuller (1979, 1981), Phillips y Perron (1988) y Kwiatkowski, Phillips, Schmidt y Shin (1992).

El contraste Dickey-Fuller (DF) parte del supuesto de que el proceso generador de datos (PGD) de la serie es de la forma:

$$y_t = \rho y_{t-1} + u_t \quad (3.1)$$

⁴Hernández et al. (2005) mencionan que algunos de estos métodos son: la estimación por MCO (Engle y Granger, 1987), modificaciones de la estimación por MCO incluyendo como regresores retardos y adelantos de las variables integradas diferenciadas (Henry y Richard, 1982, Henry y Richard, 1983, Stock, 1987, Phillips y Loretan, 1991, Saikkonen, 1991), estimación con variables instrumentales (Phillips y Hansen, 1990), estimadores Fully-Modified (Park y Phillips, 1988, Park y Phillips, 1989, Phillips y Hansen, 1990), cointegración canónica (Bossaerts, 1988), regresiones canónicas de cointegración no paramétricas (Park, 1992), estimación en tres etapas (Engle y Yoo, 1991), regresión espectral (Phillips, 1991), estimación por componentes principales (Phillips y Ouliaris, 1988, Stock y Watson, 1988), estimación por máxima verosimilitud de modelos vectoriales autorregresivos en diferencias (Ahn y Reinsel, 1988, Johansen, 1998, Ahn y Reinsel, 1990, Johansen 1991, Johansen, 1995).

⁵Cuando un proceso estocástico (y_t) es integrado de orden $d \geq 1$ suele decirse que (y_t) tiene d raíces unitarias. Así, si una serie de tiempo tiene una raíz unitaria, la primera diferencia de tal serie será estacionaria.

Restando y_{t-1} a ambos lados de la ecuación (3.1):

$$\begin{aligned} y_t - y_{t-1} &= \rho y_{t-1} - y_{t-1} + u_t \\ &= (\rho - 1)y_{t-1} + u_t \end{aligned} \quad (3.2)$$

Finalmente, reescribiendo (3.2):

$$\Delta y_t = \delta y_{t-1} + u_t \quad (3.3)$$

Donde $\delta = (\rho - 1)$ y Δ el operador diferencia. Para verificar que y_t es estacionario se plantea la hipótesis nula, $H_0 : \delta = 0$, frente la hipótesis alternativa, $H_a : \delta < 0$. Si $\delta = 0$, entonces $\rho = 1$ y y_t presentará una raíz unitaria, es decir, no será estacionaria. Gujarati y Porter (2010) mencionan que, cuando $\delta = 0$, la prueba t usual no es apropiada⁶ para probar hipótesis sobre δ . En su lugar, el valor estimado de t de δ en la expresión (3.3) sigue el estadístico τ (tau). Si el valor absoluto de tau ($|\tau|$) excede el valor crítico; se rechaza H_0 y la serie es estacionaria. Por otra parte, si $|\tau|$ calculado no excede el valor crítico, no se rechaza la hipótesis nula y la serie presenta una raíz unitaria. La prueba DF permite incluir una constante y/o tendencia, en cuyo caso los valores críticos de τ para probar H_0 son diferentes para cada una de las especificaciones.

La prueba DF parte del supuesto que u_t no está correlacionada, por lo que Dickey y Fuller desarrollaron una prueba para contemplar esta posibilidad. La prueba es conocida como Dickey-Fuller aumentada (ADF, por sus siglas en inglés) ya que “aumenta” la expresión (3.3) incorporando valores rezagados de la variable y_t , y consiste en estimar:

$$\Delta y_t = \delta y_{t-1} + \sum_{i=1}^m \alpha \Delta y_{t-i} + u_t \quad (3.4)$$

Donde u_t es ruido blanco y el número de términos de diferencia rezagados debe ser suficiente para que el término de error en (3.4) no esté serialmente relacionado (Gujarati y Porter, 2010). Al igual que la prueba DF, la prueba ADF puede incluir una constante y/o tendencia.

Phillips y Perron (1988) proponen una variante de la prueba DF en la cual se permite que los errores (u_t) no sean ruido blanco. La prueba parte de

$$\Delta y_t = \delta y_{t-1} + u_t \quad (3.5)$$

⁶En el caso de que la serie de tiempo sea estacionaria, esto es, si se rechaza $H_0 : \delta = 0$, se puede usar la prueba usual t (de Student) usual (Gujarati y Porter, 2010).

donde u_t puede estar autocorrelacionado. El estadístico de prueba es ajustado por los efectos de la autocorrelación de u_t , sin embargo, asintóticamente los valores críticos son los mismos que los de la prueba DF y también permiten agregar una constante y/o tendencia.

Quintana y Mendoza (2016) mencionan que cuando el parámetro autorregresivo es muy cercano a uno, las pruebas ADF y PP tienen dificultades para definir la existencia de una raíz unitaria, por lo que para confirmar los resultados se puede emplear la prueba KPSS. Kwiatkowski et al. (1992) desarrollaron una prueba en la cual se prueba la hipótesis nula de que la serie y_t es estacionaria alrededor de una tendencia, frente la hipótesis alternativa de que la serie es estacionaria en diferencias (tiene una raíz unitaria). El estadístico de prueba es proporcional a la suma acumulada del cuadrado de los residuos de una regresión de la variable y_t contra variables determinísticas (constante y/o tendencia). Un estadístico de prueba más grande que los valores críticos es indicativo de no estacionariedad en tendencia (Montenegro, 2010).

Una vez que se comprueba que las variables presentan el mismo orden de integración, se estima mediante MCO la regresión de cointegración:

$$\ln CO_{2t} = \beta_0 + \beta_1 \ln P_t + \beta_2 \ln A_t + \beta_3 \ln IE_t + \beta_4 \ln ENF_t + u_t \quad (3.6)$$

La estimación de (3.6) proporciona parámetros superconsistentes⁷ aunque sesgados y no eficientes sobre los que no se podrá hacer inferencia, pero permitirá contrastar una raíz unitaria en el proceso residual de la regresión de cointegración (Montenegro, 2010). La segunda etapa consiste en probar la existencia de una raíz unitaria en el proceso residual de la regresión de cointegración:

$$\hat{u}_t = \ln CO_{2t} - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 \ln P_t - \hat{\beta}_2 \ln A_t - \hat{\beta}_3 \ln IE_t - \hat{\beta}_4 \ln ENF_t \quad (3.7)$$

Así, si las variables no están cointegradas, los residuos (3.7) presentarán una raíz unitaria, es decir, no serán $I(0)$. La prueba usual de cointegración es la misma que la de raíz unitaria (ADF), pero aplicada a los residuos \hat{u}_t . Algunos autores emplean los mismos valores críticos que para la prueba de raíz unitaria mientras que otros (Greene, 1999; Sjö, 2008; Gujarati y Porter, 2010; Montenegro, 2010) afirman que probar cointegración no es lo mismo que estacionariedad⁸, por

⁷En el sentido que los parámetros convergen al valor poblacional a una velocidad superior (al aumentar la muestra) que las estimaciones con variables estacionarias (Caralt, 1995).

⁸Caralt (1995) menciona que la razón es que la estimación MCO proporciona los residuos de menor varianza

lo que sugieren que cuando se empleen las pruebas de raíces unitarias para probar cointegración se utilicen valores críticos más exigentes.

Por último, si las variables están cointegradas, entonces debe existir un mecanismo de corrección de error (MCE) que preserve el equilibrio. A este resultado se le conoce como Teorema de Representación de Granger (Montenegro, 2010). Por lo que, una vez estimada y contrastada la relación de cointegración, se procede a estimar el modelo de MCE introduciendo los residuos de la regresión estática rezagados un periodo en una regresión en primeras diferencias:

$$\begin{aligned} \Delta \ln CO_{2t} = & \alpha_0 + \alpha_1 \Delta \ln P_t + \alpha_2 \Delta \ln A_t + \alpha_3 \Delta \ln IE_t + \alpha_4 \Delta \ln ENF_t + \\ & \lambda (\ln CO_{2t} - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 \ln P_t - \hat{\beta}_2 \ln A_t - \hat{\beta}_3 \ln IE_t - \hat{\beta}_4 \ln ENF_t) + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (3.8)$$

Donde la expresión entre paréntesis son los residuos obtenidos mediante la ecuación de cointegración, pero rezagados un periodo (\hat{u}_{t-1}) y Δ el operador diferencia. Al término $\lambda (\ln CO_{2t} - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 \ln P_t - \hat{\beta}_2 \ln A_t - \hat{\beta}_3 \ln IE_t - \hat{\beta}_4 \ln ENF_t)$ se le denomina mecanismo de corrección de error (MCE) (Wooldridge, 2006). El coeficiente del MCE mide la velocidad de corrección de los errores de equilibrio y el signo que le precede indica que el ajuste se un periodo se realiza en el sentido opuesto al error en el periodo anterior, de modo que los desequilibrios tienden a eliminarse (Hernández et al., 2005). De este modo, las variaciones de las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la quema de combustibles fósiles ($\Delta \ln CO_{2t}$) dependen de las variaciones experimentadas en la población, el PIB *per cápita*, la intensidad energética y la energía no fósil y del equilibrio que se produjo en el periodo anterior (\hat{u}_{t-1}), a través del término de corrección de error (MCE).

$$\Delta \ln CO_{2t} = \alpha_0 + \alpha_1 \Delta \ln P_t + \alpha_2 \Delta \ln A_t + \alpha_3 \Delta \ln IE_t + \alpha_4 \Delta \ln ENF_t + MCE + \varepsilon_t \quad (3.9)$$

por lo que tienden a aparecer lo más estacionarios posible aunque no haya cointegración.

3.2. Datos

Para el análisis se emplearon datos anuales para México de las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la quema de combustibles fósiles, de la población total, el PIB *per cápita*, la intensidad energética y la proporción del consumo de energía de origen no fósil, para el periodo 1990-2015. Todas las variables en logaritmos. Se empleó este periodo debido a que es el intervalo de tiempo más reciente para el cual existe información actualizada⁹ de las emisiones de GEI.

El nivel de agregación del análisis fue nacional, ya que se puede considerar al país como el principal actor colectivo en la generación de emisiones y en el desarrollo de soluciones. Los datos de las emisiones anuales de CO₂ se obtuvieron del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) 1990-2015. Debido a la ausencia de información con periodicidad anual de la población total, se emplearon los datos de las proyecciones de la población a mitad de año para el periodo 1950-2050 realizadas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO). El PIB *per cápita* se obtuvo mediante el cociente del PIB a precios constantes de 2013, reportado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y las proyecciones de la población del CONAPO. La intensidad energética se obtuvo mediante el cociente del PIB y el consumo nacional de energía, obtenido del Sistema de Información Energética (SIE). Finalmente, la proporción del consumo nacional de energía de origen no fósil, se obtuvo como el cociente de la energía de origen no fósil (incluye biogás, hidroeléctrica, geotérmica, eólica, solar, biomasa y nuclear) y el consumo nacional de energía, ambos obtenidos del SIE. La tabla (3.1) muestra la descripción de las variables y sus fuentes.

⁹En México la primera estimación nacional de las emisiones de GEI se publicó en 1997 con datos de 1990 y se han publicado cuatro estimaciones más desde entonces. La información más reciente se presenta en el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) 1990-2015.

Tabla 3.1: Descripción de las variables

Símbolo	Descripción	Fuente
lnCO ₂	Emisiones de dióxido de carbono procedentes de la quema de combustibles fósiles	Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) 1990-2015
lnP	Población total a mitad de año	Consejo Nacional de Población (CONAPO)
lnA	Producto Interno Bruto per cápita en pesos a precios constantes de 2013	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y Consejo Nacional de Población (CONAPO)
lnIE	Intensidad energética expresada como consumo nacional de energía por unidad de PIB	Sistema de Información Energética (SIE) e INEGI
lnENF	Proporción de la energía de fuentes no fósiles en el consumo nacional de energía	SIE

Fuente: Elaboración propia.

Para un primer acercamiento al comportamiento y evolución de las series empleadas, se presentan en la tabla (3.2) las principales estadísticas descriptivas, así como su tasa de crecimiento (TC) y su tasa de crecimiento media anual (TCMA). La base de datos completa puede consultarse en el Anexo A.

Tabla 3.2: Estadísticas descriptivas

Variable	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	TC	TCMA 1990-2015
CO ₂	352,026.6	349,970.4	429,894.0	272,153.8	52,876.2	57.9	1.7
P	102,588.9	102,192.2	121,347.8	84,169.6	11,258.5	44.2	1.4
A	126.6	127.8	142.4	108.8	10.0	30.9	1.0
IE	536.4	535.7	584.8	493.5	20.8	-7.78	-0.3
ENF	0.09	0.09	0.12	0.07	0.01	-10.29	-0.4

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Evidencia empírica

Con el propósito de analizar empíricamente la importancia relativa de las fuerzas antropogénicas que conducen al incremento de las emisiones de CO₂ en México en el periodo 1990-2015 se partió del modelo STIRPAT. Para evitar la posibilidad de relaciones espurias se incorporaron pruebas de estacionariedad y cointegración siguiendo la metodología propuesta por Engle y Granger (1987). El primer paso consistió en determinar el orden de integración de las variables, para lo cual se emplearon las pruebas ADF, PP y KPSS. Las pruebas ADF y PP

se realizaron incluyendo un término constante (C) y constante y tendencia (CyT). El número de rezagos se seleccionó utilizando el criterio de información de Schwarz (SIC). La tabla (3.3) presenta los resultados de las pruebas de raíces unitarias.

Tabla 3.3: Pruebas de raíces unitarias

Variable	ADF			PP		KPSS	
	C(1)	CyT(1)	N(1)	C(2)	CyT(2)	η_u	η_t
lnCO ₂	-0.755	-2.178	3.689	-0.903	-3.064	0.956	0.121
Δ CO ₂	-4.453	-4.443	-2.417	-7.252	-7.174	0.112	0.073
lnP	-0.698	-1.361	1.333	-3.903	-3.447	0.965	0.181
Δ P	-1.493	-2.535	-1.196	-1.704	-1.862	0.610	0.157
lnA	-1.159	-2.602	1.679	-1.243	-2.777	0.877	0.139
Δ A	-3.919	-3.828	-3.375	-5.439	-5.320	0.072	0.052
lnIE	-1.570	-1.203	-0.530	-1.721	-1.388	0.269	0.115
Δ IE	-3.386	-3.487	-3.461	-5.043	-5.119	0.220	0.144
lnENF	-1.138	-2.362	0.303	-1.544	-2.714	0.638	0.136
Δ ENF	-4.109	-4.024	-4.159	-6.729	-6.633	0.115	0.097

Nota: Los valores en negritas representan el rechazo de la hipótesis nula al 5%. Los valores críticos al 5% para las pruebas Dickey-Fuller Aumentada y Phillips-Perron, en una muestra de T=25, son de -2.98 incluyendo la constante (C), -3.60 incluyendo constante y tendencia (CyT) y -1.95 sin constante y sin tendencia (N). Los valores entre paréntesis representan el número de rezagos utilizados en cada prueba. η_u y η_t representan los estadísticos de la prueba KPSS, donde la hipótesis nula considera que la serie es estacionaria en nivel, o alrededor de una tendencia determinista, respectivamente. Los valores críticos a 5% en ambas pruebas son de 0.463 y 0.146, respectivamente (Kwiatkowski et al., 1992).

Los resultados de la tabla (3.3) sugieren que el conjunto de las series son no estacionarias. Para poder determinar si presentan un orden de integración $I(1)$ se incluyeron las pruebas para la primera diferencia de las series. Los estadísticos de las pruebas permiten concluir que, con excepción de ΔP , las series pueden considerarse como estacionarias con orden de integración $I(1)$. Debido a la ausencia de datos anuales de la población en México y a la naturaleza de la construcción de la serie, se decidió probar si su utilización permitía configurar relaciones estacionarias entre las variables y en donde fuera posible la inferencia estándar¹⁰. Siguiendo la metodología propuesta por Engle y Granger (1987); se estimó la regresión de cointegración mediante MCO:

¹⁰La combinación lineal de dos procesos con el mismo grado de integración es, en general, del mismo grado de integración, esto es: $z_t = y_t + \alpha x_t \quad x_t, y_t \sim I(d) \Rightarrow z_t \sim I(d)$. Sin embargo, puede darse el caso que la combinación lineal de procesos no estacionarios produzcan uno estacionario $I(0)$. A esta excepción se le denomina cointegración.

Tabla 3.4: Regresión de cointegración

	Variable dependiente: lnCO ₂
lnP	0.909*** (0.079)
lnA	0.469*** (0.102)
lnIE	0.355*** (0.087)
lnENF	-0.128*** (0.034)
Constant	-2.529*** (0.588)
Observations	26
R ²	0.992
Adjusted R ²	0.991
Residual Std. Error	0.014 (df = 21)
F Statistic	692.428*** (df = 4; 21)

Notas: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Error estándar entre paréntesis.

En la tabla(3.4) se muestran los resultados obtenidos y se observa que todos los coeficientes mostraron el signo esperado y fueron significativos al nivel de 0.01 %. También se observó un elevado valor para R^2 lo que podría ser indicativo de una posible regresión espuria; por lo que se procedió a probar la cointegración de las series utilizando el proceso residual de la regresión de cointegración, esto es, comprobar que $\hat{u}_t \sim I(0)$ mediante un prueba de raíz unitaria. Sin embargo, Mauricio (2007) menciona que la distribución asintótica del estadístico t para δ no es la distribución DF del estadístico τ en el contraste ADF correspondiente, ya que en este caso particular la distribución depende de la dimensión de (y_t) , por lo que los valores críticos de la distribución DF de τ no son aplicables en este caso. Los valores críticos adecuados para el caso de cinco variables se presentan en la tabla (3.5).

Tabla 3.5: Valores críticos para el contraste de cointegración de Engle-Granger (caso cinco variables)

N° de Obs.	Sin tendencia			Con tendencia		
	1 %	5 %	10 %	1 %	5 %	10 %
20	-6.159	-5.153	-4.678	-6.704	-5.628	-5.132
21	-6.098	-5.116	-4.652	-6.629	-5.583	-5.098
22	-6.042	-5.082	-4.628	-6.561	-5.542	-5.067
23	-5.992	-5.052	-4.606	-6.500	-5.505	-5.039
24	-5.946	-5.024	-4.585	-6.444	-5.470	-5.013
25	-5.904	-4.998	-4.567	-6.393	-5.439	-4.990
26	-5.865	-4.974	-4.550	-6.346	-5.410	-4.968
27	-5.830	-4.953	-4.534	-6.303	-5.384	-4.948
28	-5.797	-4.933	-4.520	-6.263	-5.359	-4.930
29	-5.766	-4.914	-4.506	-6.226	-5.336	-4.912
30	-5.738	-4.897	-4.493	-6.192	-5.315	-4.896

Fuente: Watson y Teelucksingh (2002)

Los resultados de la prueba ADF aplicada a los residuos se presentan en la tabla (3.6). En ésta se observa que el valor del estadístico (-4.712) es menor que el valor crítico para 24 observaciones sin tendencia (-4.585), por lo que se rechaza la hipótesis nula de presencia de raíz unitaria en los residuos al 10% de significancia.

Tabla 3.6: Prueba de raíz unitaria ADF de los residuos

	Variable dependiente: \hat{u}_t
\hat{u}_{t-1}	-1.2955*** (0.2749)
$\Delta\hat{u}_t$	0.3839 (0.2112)
Observations	24 after adjustments
R ²	0.539
Adjusted R ²	0.4981
Residual Std. Error	0.01292 (df = 22)
F Statistic	12.91 (df = 2; 22)
Value of test-statistic is:	-4.7122
<i>Notas:</i>	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01
	Error estándar entre paréntesis.

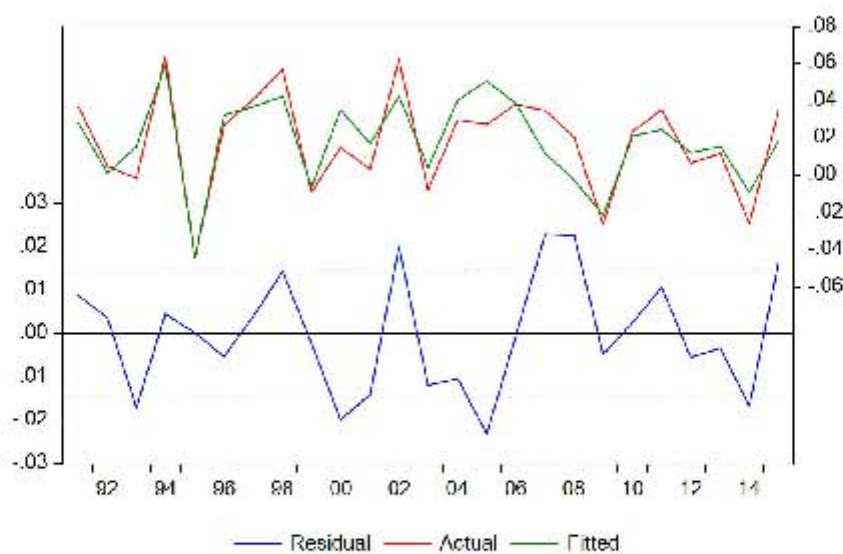
Finalmente, se calculó el modelo de Mecanismo de Corrección de Error.

Tabla 3.7: Modelo de Mecanismo de Corrección de Error

	Variable dependiente: $\Delta\ln\text{CO}_2$
$\Delta\ln\text{P}$	0.865*** (0.216)
$\Delta\ln\text{A}$	0.580*** (0.149)
$\Delta\ln\text{IE}$	0.409*** (0.122)
$\Delta\ln\text{ENF}$	-0.099** (0.043)
MCE	-0.935*** (0.235)
Observations	25
R ²	0.842
Adjusted R ²	0.802
Residual Std. Error	0.014 (df = 20)
F Statistic	21.252*** (df = 5; 20)
<i>Notas:</i>	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01
	Error estándar entre paréntesis.

La tabla (3.7) muestra los resultados obtenidos de la estimación del modelo de Mecanismo de Corrección de Error. En esta se observa que todas las variables fueron significativas al nivel de 0.5% y con excepción de la energía no fósil (ENF) mostraron una relación positiva. El MCE fue negativo y significativo, por lo que se acepta que la relación de corto plazo tiende a largo plazo. También se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.84, indicativo de un buen ajuste del modelo y que se puede apreciar en la gráfica (3.1).

Gráfica 3.1: Modelo de Mecanismo de Corrección de Error



En relación a los valores de las elasticidades de las fuerzas impulsoras, la elasticidad impacto de la población (EIP) mostró el coeficiente mas alto con 0.86, lo que significa que el incremento en un 1 % de la población genera en promedio un incremento de 0.86 % de las emisiones. Entre 1990 y 2015 la población creció a una tasa media anual de 1.42 % lo que resultó en un aumento de 1.22 % de las emisiones. Por otro lado, la elasticidad impacto de la afluencia (EIA) fue de 0.58; lo que coincide con el resultado común en la literatura que empleo el modelo STIRPAT, esto es, que las emisiones de CO₂ son más sensibles a cambios en la población que a cambios en el PIB *per cápita*. El PIB *per cápita* creció a una tasa media anual de 1.04 % lo que resultó en un amento de 0.60% de las emisiones. La elasticidad impacto de las intensidad energética (EIIE) mostró un coeficiente de 0.40. Durante el mismo periodo la proporción de energía consumida por unidad de PIB disminuyó a una tasa promedio anual de 0.31 % lo que restringió las emisiones en un 0.12 %. Por otro lado, la elasticidad impacto de la energía no fósil (EIENF) mostró un coeficiente negativo de 0.10, lo que significa que el incremento en un 1 % de la proporción de energía de origen no fósil en el consumo nacional de energía reduce en promedio 0.10% las emisiones de CO₂. Durante el periodo de estudio esta proporción disminuyó a una tasa promedio anual de 0.42 % por lo que tuvo un efecto positivo de 0.04 % en el incremento de las emisiones. Finalmente, otros factores no incluidos en el modelo originaron un 0.05 % de las emisiones. Las contribuciones individuales al incremento de las emisiones de CO₂ entre 1990 y 2015 se presentan en la tabla (3.8).

Tabla 3.8: Contribución de las variables al incremento de las emisiones de CO₂, 1990-2015

Variable	TCMA (%)	Coefficiente de regresión	Efecto sobre las emisiones de CO ₂ (%)	Grado de contribución al cambio de las emisiones (%)
Emisiones de CO ₂	1.77			
Población	1.42	0.86	1.22	68.8
PIB per cápita	1.04	0.58	0.60	34.0
Intensidad energética	-0.31	0.40	-0.12	-7.0
Energía no fósil	-0.42	-0.10	0.04	2.4

Nota: Efecto sobre las emisiones = Tasa de crecimiento media anual \times Coeficiente de regresión.
 Grado de contribución al cambio de las emisiones = Efecto sobre las emisiones \div Tasa de crecimiento media anual de las emisiones (Lin et al., 2009).

El análisis anterior indica, dentro del modelo STIRPAT, que el crecimiento de las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles en México en el periodo 1990-2015, se debió en 68.8% a la evolución de la población, 34% al ingreso *per cápita* y 2.4% a la disminución de la proporción del consumo nacional de la energía de origen no fósil, mientras que la reducción de la intensidad energética contribuyó en -7%. Los resultados obtenidos coinciden con el resultado común en la literatura, esto es, que la población es una fuerza impulsora clave en las emisiones de CO₂. Sin embargo, como menciona York et al. (2003), este resultado muestra que el tamaño de la población tiene algún impacto en el crecimiento de las emisiones, pero cuya escala depende de otros factores. Por otra parte, la disminución de la intensidad energética (impulsada por el crecimiento de las actividades económicas del sector industrial menos intensivas en el consumo de energía, así como la creciente terciarización de la economía) fue el principal factor que impidió el incremento de las emisiones durante el periodo analizado. Sin embargo, este proceso de desacoplamiento fue insuficiente para contrarrestar los efectos de la población y el PIB *per cápita*.

3.3.1. Validación del modelo

Después de la estimación de los parámetros es necesario realizar un conjunto de pruebas de validación de los resultados obtenidos con la finalidad de lograr estimadores eficientes, insesgados y consistentes.

Prueba de normalidad de los residuos.

La prueba Shapiro-Wilk se emplea para contrastar la normalidad de los residuos cuando el número de observaciones es menor a 50. Se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: los residuos siguen una distribución normal

Ha: los residuos no se distribuyen de manera normal

Shapiro-Wilk normality test

data: residMCE

W = 0.97032 p-value = 0.6531

Debido a que el valor obtenido es mayor que $\alpha=0.05$ ($p>0.05$) se concluye que no existe evidencia estadística para rechazar Ho y podemos afirmar que los residuos siguen una distribución normal.

Prueba de heterocedasticidad

Uno de los principales análisis que se realizan sobre la violación de los supuestos en que se basa el método de MCO para determinar el valor y por consiguiente la calidad de los estimadores, se refiere a la verificación de si las perturbaciones son homocedásticas, es decir, que tienen varianza constante. Ahora bien, cuando dichos errores no observan una misma varianza se dice que hay heterocedasticidad o que las perturbaciones son heterocedásticas. El test Breusch-Pagan se utiliza para determinar la heterocedasticidad de un modelos de regresión lineal. Se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: presencia de homocedasticidad

Ha: presencia de heterocedasticidad

Studentized Breusch-Pagan test

data: MCE
BP = 2.0788 df = 4 p-value = 0.7213

Debido a que el valor obtenido es mayor que $\alpha=0.05$ ($p>0.05$) se concluye que no existe evidencia para rechazar H_0 y podemos afirmar que los errores son homocedásticos.

No correlación de los residuos

El estadístico Durbin-Watson se utiliza para detectar la presencia de autocorrelación en los residuos en el análisis de regresión. Se plantean las siguientes hipótesis:

H_0 : no existe autocorrelación

H_a : existe autocorrelación

Durbin-Watson test

data: MCE
DW = 1.8035, p-value = 0.6057
alternative hypothesis: true autocorrelation is not 0

Dado que el valor DW es cercano a 2 y el valor obtenido es mayor que $\alpha=0.05$ ($p>0.05$) se concluye que no existe evidencia estadística para rechazar H_0 y podemos afirmar que no existe correlación en los residuos.

La prueba de Breusch-Godfrey se utiliza para determinar si existe o no autocorrelación de orden superior a uno. Se plantean las siguientes hipótesis:

H_0 : no existe autocorrelación

H_a : existe autocorrelación

Breusch-Godfrey test for serial correlation of order up to 2

data: MCE
LM test = 2.8503, df1 = 2, df2 = 18 p-value = 0.08407

La probabilidad asociada al estadístico F es mayor que 0.05%, por lo que se concluye que no existe evidencia estadística para rechazar H_0 y podemos afirmar que no existe correlación en los residuos.

Pruebas de estabilidad

Para probar la existencia de estabilidad de los coeficientes se han desarrollado diferentes pruebas entre las cuales están las conocidas como CUSUM y CUSUMQ. Estas pruebas se basan en el análisis gráfico de la evolución de los llamados residuos recursivos, W_t . Si los valores de W_t cambian de manera sistemática se tomará como evidencia de inestabilidad de los parámetros del modelo. Las pruebas plantean las siguientes hipótesis:

Ho: estabilidad

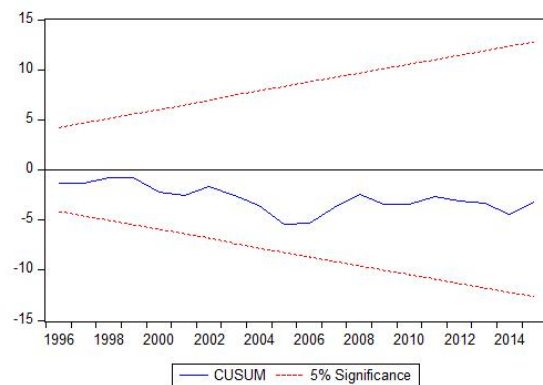
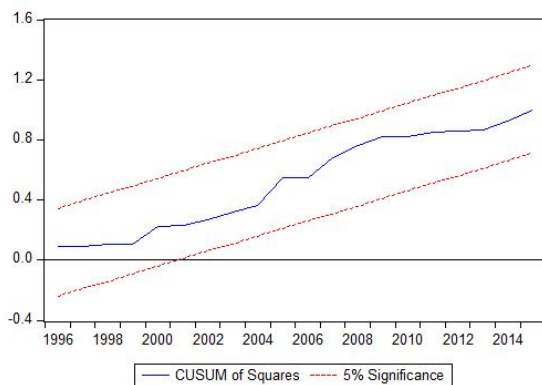
Ha: inestabilidad

Si W_t no se sale de las bandas de confianza, entonces no existe evidencia para rechazar Ho.

Gráfica 3.2: Pruebas de estabilidad CUSUM y CUSUMQ

CUSUMQ

CUSUM



La gráfica 3.2 muestra los resultados de las pruebas de estabilidad y se concluye que no existe evidencia para rechazar Ho y los coeficientes estimados son estables durante 1990 y 2015.

3.4. Escenarios de emisión

Para concluir el análisis, se empleó el modelo estimado para realizar diversas simulaciones y proyecciones hasta el año 2030, de los efectos de los cambios en la población, el PIB *per cápita*, la intensidad energética y la energía no fósil, en las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles. Se propusieron cuatro escenarios que se presentan en la tabla (3.9).

Tabla 3.9: Simulaciones de tasas de crecimiento de las variables, 2016-2030

Año	Escenario 1				Escenario 2				Escenario 3				Escenario 4			
	ΔP	ΔA	ΔIE	ΔENF	ΔP	ΔA	ΔIE	ΔENF	ΔP	ΔA	ΔIE	ΔENF	ΔP	ΔA	ΔIE	ΔENF
2016	1.42	1.04	-0.31	-0.42	1.13	1.04	-0.31	-0.42	1.13	1.04	-1.0	-0.42	1.13	1.04	-1.0	1.0
2017	1.42	1.04	-0.31	-0.42	1.08	1.04	-0.31	-0.42	1.08	1.04	-1.0	-0.42	1.08	1.04	-1.0	1.0
2018	1.42	1.04	-0.31	-0.42	1.04	1.04	-0.31	-0.42	1.04	1.04	-1.0	-0.42	1.04	1.04	-1.0	1.0
2019	1.42	1.04	-0.31	-0.42	1.00	1.04	-0.31	-0.42	1.00	1.04	-1.0	-0.42	1.00	1.04	-1.0	1.0
2020	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.96	1.04	-0.31	-0.42	0.96	1.04	-1.0	-0.42	0.96	1.04	-1.0	1.0
2021	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.92	1.04	-0.31	-0.42	0.92	1.04	-1.0	-0.42	0.92	1.04	-1.0	1.0
2022	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.89	1.04	-0.31	-0.42	0.89	1.04	-1.0	-0.42	0.89	1.04	-1.0	1.0
2023	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.85	1.04	-0.31	-0.42	0.85	1.04	-1.0	-0.42	0.85	1.04	-1.0	1.0
2024	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.82	1.04	-0.31	-0.42	0.82	1.04	-1.0	-0.42	0.82	1.04	-1.0	1.0
2025	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.79	1.04	-0.31	-0.42	0.79	1.04	-1.0	-0.42	0.79	1.04	-1.0	1.0
2026	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.76	1.04	-0.31	-0.42	0.76	1.04	-1.0	-0.42	0.76	1.04	-1.0	1.0
2027	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.73	1.04	-0.31	-0.42	0.73	1.04	-1.0	-0.42	0.73	1.04	-1.0	1.0
2028	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.70	1.04	-0.31	-0.42	0.70	1.04	-1.0	-0.42	0.70	1.04	-1.0	1.0
2029	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.67	1.04	-0.31	-0.42	0.67	1.04	-1.0	-0.42	0.67	1.04	-1.0	1.0
2030	1.42	1.04	-0.31	-0.42	0.64	1.04	-0.31	-0.42	0.64	1.04	-1.0	-0.42	0.64	1.04	-1.0	1.0

Fuente: Elaboración propia.

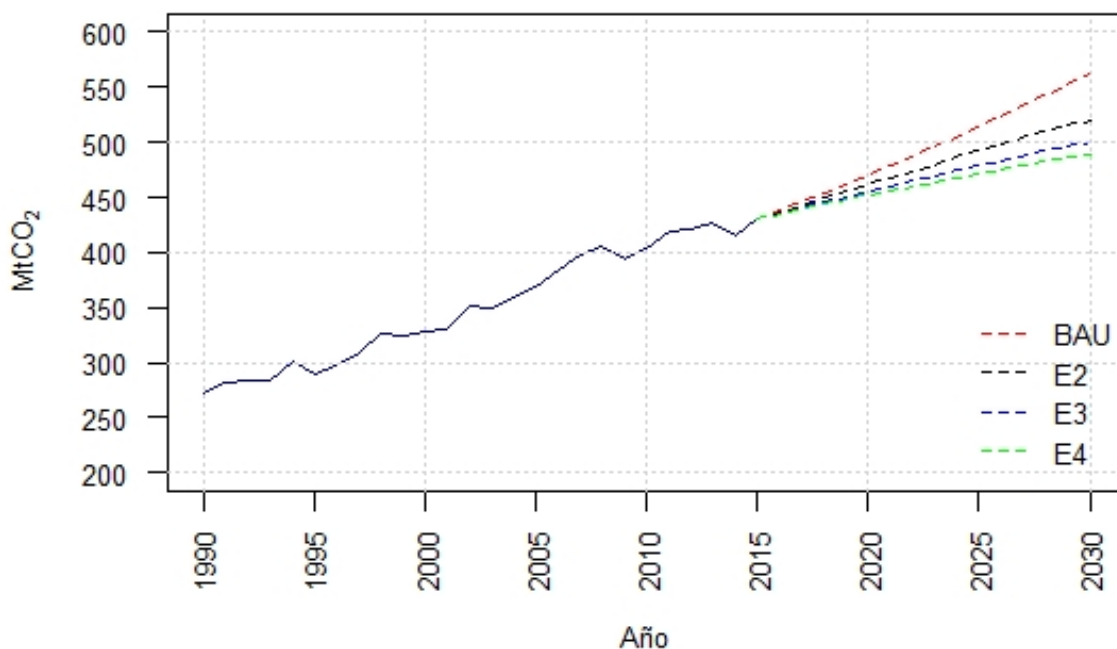
El primer escenario es tendencial (*Business as usual*, BAU), es decir, considera constantes las tasas de crecimiento promedio experimentadas por las variables entre 1990 y 2015. Bajo este escenario las emisiones tenderán a seguir aumentando a una tasa anual de 1.74% hasta alcanzar en el año 2030 la cantidad de 557 MtCO₂. A modo de comparación, el escenario tendencial carente de medidas para combatir el cambio climático, para el total de las emisiones de GEI para el año 2030 reportado en el documento “Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el periodo 2020-2030” es de 973 MtCO_{2e}.

El segundo escenario (E2) considera las proyecciones del crecimiento de la población realizadas por el CONAPO, también asume que el PIB *per cápita*, la intensidad energética y la participación de las fuentes no fósiles de energía, mantienen la misma tasa de crecimiento promedio anual del periodo 1990-2015, esto es 1.04%, -0.31% y -0.42%, respectivamente. Bajo los supuestos de este escenario, las emisiones de CO₂ para el año 2030 serían de 519 MtCO₂. Este escenario permite observar que el proceso de estabilización demográfica previsto

para los próximos años puede dar paso al PIB *per cápita* como principal factor dinamizador de las emisiones (Samaniego y Galindo, 2009). Este proceso de estabilización representaría un “ahorro” de 38 MtCO₂ respecto al escenario tendencial (BAU) para el año 2030.

El tercer escenario (E3) considera las proyecciones de la población y una reducción de 1 % anual de la intensidad energética, manteniendo el PIB *per cápita* y la energía no fósil constantes. Por último, y con la finalidad de ilustrar la importancia de la mejora conjunta de la intensidad energética y la proporción de energía proveniente de fuentes no fósiles en la reducción de emisiones, el cuarto escenario (E4) considera las proyecciones del crecimiento de la población y supone una reducción de la intensidad energética a una tasa promedio de 1 %, así como un incremento de 1 % anual en la proporción de fuentes de energía no fósil en el consumo nacional de energía, manteniendo el crecimiento del PIB *per cápita* constante. Este escenario muestra una reducción adicional de 31 MtCO₂ para el año 2030, si solo se considera la reducción de la población (E2). La gráfica 3.3 presenta la evolución de las emisiones ante los escenarios propuestos.

Gráfica 3.3: Proyecciones de las emisiones para los diferentes escenarios



Fuente: Elaboración propia.

El conjunto de simulaciones realizadas muestran que es muy posible que las emisiones de CO₂ continúen aumentando durante los próximos años, esto debido a que las tasas de desacoplamiento de la actividad económica y el consumo energético y la participación de las fuentes de energía no fósil en el consumo nacional de energía, no han sido suficientes para compensar el incremento generado por el crecimiento de la población y el PIB *per cápita*. También permiten observar el potencial de reducción de la mejora conjunta en la intensidad energética y la participación de la energía no fósil en la reducción de emisiones.

Capítulo 4

Conclusiones

El sistema terrestre es un sistema extremadamente complejo, acoplado y en constante evolución, sus propiedades atmosféricas, biológicas y geológicas han cambiado en una amplia gama de escalas espaciales y temporales. Sin embargo, las actividades humanas han alterado drásticamente el sistema terrestre a escala global y de manera tan intensa; que amenaza los procesos y componentes bióticos y abióticos de los que depende su existencia (York et al., 2003; Charlson, 2006; Steffen et al., 2006). Si bien el ser humano ha modificado el sistema terrestre desde su aparición, su influencia había sido hasta el siglo XVIII, de ámbito local y por lo general de escasa magnitud. Solo a partir de la Revolución Industrial y especialmente en la segunda mitad del siglo XX, la humanidad ha modificado el medio ambiente a escala global y a una velocidad sin precedentes. Uno de los fenómenos globales en el que más se ha centrado la atención a nivel internacional debido a su efectos potenciales es el cambio climático. Si bien, el clima no es geográficamente uniforme, ni es inherentemente estable, se acepta que la intensificación del efecto invernadero originado por el incremento en la concentración de CO₂ y otros GEI generados por la actividad humana, está alterando el clima mundial a una velocidad sin precedentes. El reconocimiento de las consecuencias del cambio climático dio origen a una serie de acuerdos internacionales en los que se acordó limitar la emisión futura de estos gases para evitar consecuencias irreversibles.

La estimación del modelo STIRPAT para México en el periodo 1990-2015 permitió obtener evidencia empírica de la importancia relativa de las principales fuerzas antropogénicas

impulsoras de las emisiones de CO₂ originadas por la quema de combustibles fósiles, lo que puede contribuir a establecer estrategias eficientes para su reducción. Adicionalmente, la naturaleza estocástica del modelo STIRPAT permitió estimar el efecto individual de cada fuerza impulsora y la utilización de métodos de estimación estándar. La incorporación de pruebas de estacionariedad y cointegración propuestas por Engle y Granger (1987), permitieron diferenciar relaciones verdaderas de largo plazo de relaciones espurias, así como la modelización de largo y de corto plazo de las variables, lo que puede aportar evidencia empírica más sólida a la hora de probar hipótesis sobre la existencia de determinadas relaciones postuladas por la teoría. Sin embargo, también presenta algunas limitaciones. Por ejemplo, la estimación por MCO de la primera etapa de la metodología de Engle y Granger (1987) ofrece un único vector de cointegración, sin embargo, existe la posibilidad de que varias relaciones de cointegración dirijan la dinámica de largo plazo del conjunto de variables cointegradas, por lo que el análisis deberá complementarse con métodos más sofisticados que contemplen la posibilidad de que el rango de cointegración sea mayor a uno.

El nivel de agregación del estudio también impone algunas limitaciones, ya que no permite identificar fuentes de impacto específicas (por ejemplo consumidores o sectores), sin embargo, el desarrollo del debate en torno a la importancia relativa de cada fuerza impulsora requiere de un determinado nivel de agregación, por lo que, en la medida que mejore la disponibilidad, calidad y cobertura espacial y temporal de la información, corresponderá a una nueva etapa del análisis la “desagregación” de los modelos.

Los resultados obtenidos de este análisis, muestran que la población fue la principal fuerza impulsora de las emisiones de CO₂ durante el periodo analizado. Sin embargo, este resultado debe interpretarse como un intento para cuantificar la importancia del tamaño de la población en la escala de las emisiones y comparar su efecto con las contribuciones de otros factores, así como su potencial para establecer medidas de reducción. Para comprender los efectos directos e indirectos de la población en el incremento de las emisiones de CO₂ se vuelve necesario realizar nuevos análisis que incorporen otros aspectos; como su distribución espacial, su composición por edad y sexo y su relación con los patrones de consumo y movilidad, entre otros.

El desempeño del PIB *per cápita* tuvo una importancia relativamente menor que la población en el incremento de las emisiones, hallazgo que coincide con otros trabajos empíricos y que

muestra que la evolución de las emisiones es más sensible a cambios en la población que a cambios en el PIB *per cápita*. Sin embargo, las proyecciones previstas del crecimiento económico y de la población en México, muestran que en los próximos años, el PIB *per cápita* puede tomar una mayor importancia como factor dinamizador de las emisiones. Por lo que se volverá necesario el estudio de los patrones de consumo de los agentes económicos y sus efectos en las emisiones, así como de la viabilidad y eficiencia de la implementación de instrumentos económicos que favorezcan su modificación. Por otra parte, pese al proceso de desacoplamiento entre el consumo de energía y la actividad económica observado en el año 2011, se espera que la estrecha relación entre ambas se mantenga durante los próximos años. Las fuentes de abastecimiento de combustibles para la generación de energía del país se basaron en su mayoría en combustibles de origen fósil, sobre todo gas natural, lo que implica que si permanecen constantes las tendencias observadas, el crecimiento del consumo de energía, impulsado principalmente por el transporte y las industrias energéticas, implicaría un aumento en la demanda de estos combustibles, con sus respectivo incremento de las emisiones.

Las simulaciones y proyecciones realizadas indican que, con las actuales tasas de crecimiento de las variables analizadas, las emisiones de CO₂ seguirán creciendo en los próximos años. Debido a la fuerte relación entre el consumo de energía y la actividad económica, y el papel del crecimiento económico en el desarrollo económico y social del país, la importancia del incremento de la participación de las fuentes de energía no fósil toma especial relevancia en la estrategia de reducción de emisiones. Actualmente, más del 90% del consumo de energía en México proviene de la quema de combustibles fósiles, por lo que un aumento de la participación de recursos renovables en la generación de energía, disminuiría las emisiones de forma significativa.

Del análisis anterior se concluye que para alcanzar una trayectoria de desarrollo sostenible es indispensable continuar el proceso de desacoplamiento de la actividad económica del consumo de energía y la descarbonización, a través de una mejora tecnológica en los procesos de producción, distribución y consumo de energía, así como una sustitución progresiva de combustibles fósiles en sectores intensivos en el consumo de energía, particularmente el transporte y las industrias de la energía.

Anexos

Anexo A

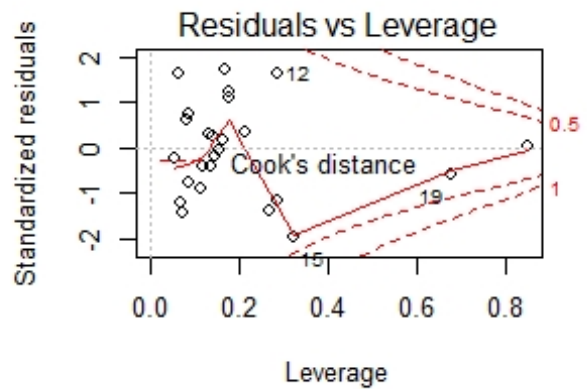
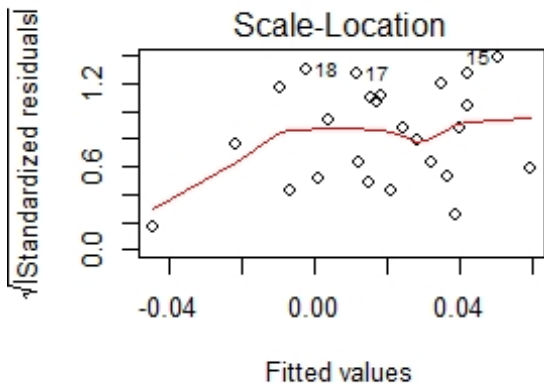
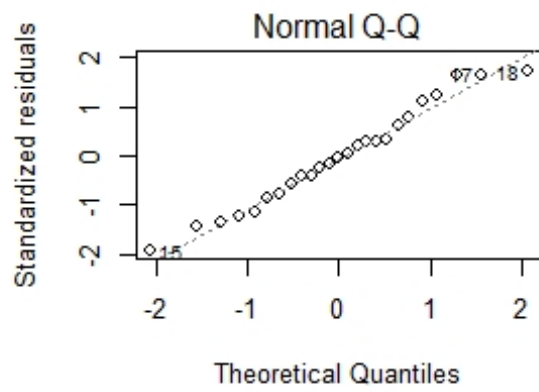
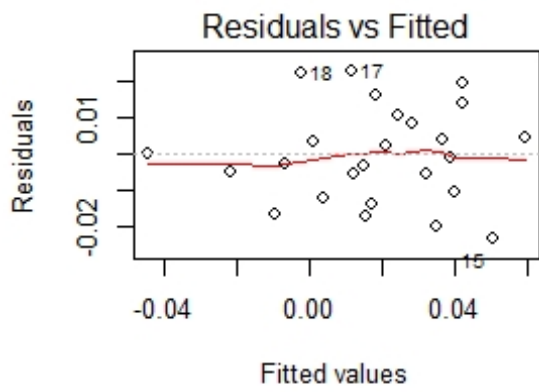
Estadístico

Base de datos

Año	Emisión de CO ₂ (Ton)	Población (Habitantes)	PIB per cápita (Miles de pesos/hab)	Intensidad energética ^a	Energía no fósil (%)
1990	272,153.75	84,169.57	108.81	535.08	9.73
1991	282,379.17	85,748.74	111.12	536.41	9.69
1992	283,725.35	87,312.34	112.96	521.03	9.93
1993	283,302.83	88,850.86	114.41	516.60	9.86
1994	301,957.49	90,362.71	118.06	514.10	8.67
1995	288,940.82	91,843.91	108.85	546.66	12.24
1996	296,837.48	93,294.78	114.41	533.74	11.87
1997	309,077.27	94,720.54	120.40	520.33	11.63
1998	327,128.96	96,116.96	124.78	529.56	10.70
1999	324,146.52	97,482.58	126.42	519.91	11.09
2000	329,142.81	98,785.28	130.92	516.54	10.48
2001	330,153.16	100,105.30	128.67	510.51	10.15
2002	351,362.26	101,493.99	126.86	530.14	9.63
2003	348,578.61	102,890.47	126.95	539.60	9.59
2004	359,124.82	104,272.44	130.18	541.30	9.30
2005	369,147.73	105,669.37	131.42	573.01	9.17
2006	383,461.09	107,155.39	135.42	555.16	8.91
2007	397,021.81	108,744.85	136.50	545.16	8.90
2008	405,137.31	110,405.45	135.99	555.35	8.92
2009	394,622.23	112,095.39	126.86	584.75	8.31
2010	404,058.51	113,748.67	131.41	553.33	8.29
2011	418,466.28	115,367.45	134.31	557.48	8.42
2012	421,233.48	116,935.67	137.34	548.88	7.90
2013	426,269.31	118,453.93	137.41	552.21	8.20
2014	415,369.04	119,936.41	139.52	516.96	8.57
2015	429,894.04	121,347.80	142.43	493.46	8.72

Nota: ^a Expresado en KJ/\$.

Gráfica A.1: Gráficas MCE



Bibliografía

- Alcantara, V. (2009). Evolución de las emisiones de gases efecto invernadero en España. situación actual y factores explicativos. *Papeles de Economía Española* nº 121.
- Alcántara, V. y Padilla, E. (2006). Análisis de las emisiones de CO₂ y sus factores explicativos en las diferentes áreas del mundo.
- Alcántara, V. y Padilla, E. (2010). Determinantes del crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (1990-2007). *Revista Galega de Economía*, 19(1).
- Alcantara, V., Padilla, E., y Roca, J. (2007). Actividad económica y emisiones de CO₂ derivadas del consumo de energía en Cataluña, 1990-2005. *Análisis mediante el uso de los balances energéticos desde una perspectiva input-output*.
- Azqueta, D., , Ramírez, A., Villalobos, D., et al. (2007). *Introducción a la economía ambiental*.
- Bargaoui, S. A., Liouane, N., y Nouri, F. Z. (2014). Environmental impact determinants: An empirical analysis based on the stirpat model. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 109:449–458.
- Bates, B., Kundzewicz, Z., y Wu, S. (2008). *Climate change and water*. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat.
- Benavides, H. y León, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales–IDEAM*.
- Bongaarts, J. (1992). Population growth and global warming. *population and Development Review*, pages 299–319.
- Boserup, E. (1965). The conditions of agricultural growth alaine Chicago.

- Boserup, E. (1981). Population and technological change: A study of long-term trends.
- CAIT (2015). *Climate Data Explorer*. World Resources Institute.
- Caralt, J. S. (1995). *Análisis económico regional: nociones básicas de la teoría de la cointegración*. Antoni Bosch Editor.
- Casper, J. (2010). Global warming, greenhouse gases: Worldwide impacts. facts on file. *Inc. Publisher*.
- Casper, J. K. (2009). *Climate Systems: Interactive Forces of Global Warming*. Infobase Publishing.
- Castro, T., Muñoz, L., y Peralta, Ó. (2015). *Cambio global: causas y consecuencias*. Universidad Nacional Autónoma de México, Dirección General de Divulgación de la Ciencia.
- Catalán, H. y Sánchez, L. (2009). Prospectiva del consumo de energía y su impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero (gei). el caso de México. *Economía Informa, Septiembre-Octubre*, (360).
- CEPAL (2009). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: síntesis 2009.
- CEPAL (2015). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: paradojas y desafíos del desarrollo sostenible.
- Chang, M. Y. (2005). La economía ambiental. *Sustentabilidad*, pages 165–178.
- Charlson, R. (2006). *Earth System Science: from biogeochemical cycles to global changes*, pages 132–158. Oxford University Press, United States of America.
- CMNUCC (1998). Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *Naciones Unidas*, 25:27.
- Coase, R. H. (1960). The problem of social cost. In *Classic papers in natural resource economics*, pages 87–137. Springer.
- Cole, M. A. y Neumayer, E. (2004). Examining the impact of demographic factors on air pollution. *Population and Environment*, 26(1):5–21.
- Common, M. y Stagl, S. (2005). *Ecological economics: an introduction*. Cambridge University Press.

- Common, M., Stagl, S., et al. (2008). *Introducción a la economía ecológica*. Reverté Barcelona, España;.
- Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S. A., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., Way, R., Jacobs, P., y Skuce, A. (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental research letters*, 8(2):024024.
- De Ambrosio, M. (2015). *Todo lo que necesitas saber sobre el cambio climático*. Ediciones Culturales Paidós.
- Deeb, A., French, A., Heiss, J., Jabbour, J., LaRochelle, D., Levintanus, A., Kontorov, A., Markku, R., Martinez, G. S., McKeown, R., et al. (2011). *Climate change starter?s guidebook: An issues guide for education planners and practitioners*.
- Dietz, T. y Rosa, E. A. (1994). Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. *Human ecology review*, 1(2):277–300.
- Dietz, T. y Rosa, E. A. (1997). Effects of population and affluence on co2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(1):175–179.
- Domènech, X. (2000). *Química de la atmósfera: Origen y destino de los contaminantes*. Miraguano S.A Editores.
- Duro, J. y Padilla, R. (2005). Análisis de los factores determinantes de las desigualdades internacionales en las emisiones de co2 per cápita aplicando el enfoque distributivo: una metodología de descomposición por factores de kaya. Technical report.
- ENCC (2013). Estrategia nacional de cambio climático. *Versión Digital*: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php.
- Engle, R. F. y Granger, C. W. (1987). Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, pages 251–276.
- Escalante, R. (2005). Economía ambiental: una revisión temática y bibliografía actual. *Economía Informa, Marzo-Abril*, (333).
- Fan, Y., Liu, L.-C., Wu, G., y Wei, Y.-M. (2006). Analyzing impact factors of co2 emissions using the stirpat model. *Environmental Impact Assessment Review*, 26(4):377–395.

- FAO (2016). *Climate Change and Food Security: Risks and Responses*.
- Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D., Mach, K., Mastrandrea, M., Bilir, T., et al. (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad–resumen para responsables de políticas. *Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)*.
- Foladori, G. (2001). La economía ecológica. *Sustentabilidad*, pages 189–195.
- Foladori, G. (2005). Una tipología del pensamiento ambientalista. *Sustentabilidad*, pages 83–136.
- García, R. (2014). Usos de energía eléctrica y mitigación del cambio climático en México: La necesidad de una nueva política pública. pages 213–247.
- García, R. (2010). Hacia una perspectiva de la sustentabilidad energética. *Los grandes problemas de México, IV Medio Ambiente, El colegio de México, México, D. Fpp*, pages 337–372.
- Giambona, F., Jacono, V. L., y Scuderi, R. (2005). The ipat model: an empirical evidence. In *Convegno intermedio della Società Italiana di Statistica (SIS)*, pages 125–128. CLEUP.
- Granger, C. y Engle, R. (2004). Econometría de las series de tiempo, cointegración y heteroscedasticidad condicional autoregresiva.
- Granger, C. W. y Newbold, P. (1974). Spurious regressions in econometrics. *Journal of econometrics*, 2(2):111–120.
- Greene, W. H. (1999). *Análisis econométrico*. Pearson Education, Madrid.
- Grossman, G. M. y Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a north american free trade agreement. Technical report, National Bureau of Economic Research.
- Gujarati, D. y Porter, D. (2010). Econometría (quinta edición). *México: Editorial Mc. Graw Hill*.
- Gutiérrez, M., Milán, P. M., y Góngora, C. J. Á. (2016). Factores determinantes de las emisiones de CO₂ asociadas al uso de combustibles en el sector industrial de San Luis Potosí. *Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (68):22–28.

- Hassan, M. (2016). Urbanization and co2 emission in bangladesh: The application of stirpat model. *A paper presented at the Insearch*, 2016:3rd.
- Hernández, J. J. C., Rodríguez, G. M., y Álvarez, F. J. M. (2005). *Introducción al análisis univariante de series temporales económicas: enfoque clásico, modelos. Arimaz aproximación estructural*.
- IEA (2017). Co2 emissions from fuel combustion.
- IEA (2018). *CO2 Emissions from Fuel Combustion 2018*.
- IPCC (2001). Climate change 2001: The physical science basis. contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- IPCC (2007). Climate change 2007: The physical science basis. contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- IPCC (2013). Resumen para responsables de políticas. en: Cambio climático 2013: Bases físicas. contribución del grupo de trabajo i al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.
- Islas, C. (2010). *Ambiente e industria en México: tendencias, regulación y comportamiento empresarial*. El Colegio de Mexico AC.
- Jacobson, M. C., Charlson, R. J., y Rodhe, H. (2000). Introduction: Biogeochemical cycles as fundamental constructs for studying earth system science and global change. In *International Geophysics*, volume 72, pages 3–13. Elsevier.
- Jacobson, M. C., Charlson, R. J., y Rodhe, H. (2006). *Introduction: Biogeochemical cycles as fundamental constructs for studying earth system science and global change*. Elsevier.
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American economic review*, 45(1):1–28.
- Kuznets, S. (1963). Quantitative aspects of the economic growth of nations: Viii. distribution of income by size. *Economic development and cultural change*, 11(2, Part 2):1–80.
- Kwiatkowski, D., Phillips, P. C., Schmidt, P., y Shin, Y. (1992). Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of econometrics*, 54(1-3):159–178.

- Labandeira, X., León, C. J., y Vázquez, M. X. (2007). *Economía ambiental*. Pearson Educación.
- Lee, H. (2015). *The Climate System and Climate Change*, pages 13–153. Academic Press.
- Leff, E. (2008). *Discursos sustentables*. Siglo XXI.
- Li, W., Ou, Q., y Chen, Y. (2014). Decomposition of china's co₂ emissions from agriculture utilizing an improved kaya identity. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(22):13000–13006.
- Liddle, B. (2011). Consumption-driven environmental impact and age structure change in oecd countries: A cointegration-stirpat analysis. *Demographic Research*, 24:749–770.
- Lin, S., Zhao, D., y Marinova, D. (2009). Analysis of the environmental impact of china based on stirpat model. *Environmental Impact Assessment Review*, 29(6):341–347.
- Lindsey, R. (2009). Climate and earth's energy budget: Feature articles.
- Liou, K.-N. (2002). *An introduction to atmospheric radiation*, volume 84. Elsevier.
- Lovelock, J. (2007). *La venganza de la tierra: la teoría de Gaia y el futuro de la humanidad*. Planeta México.
- Ludevid, M. (2003). *El cambio global en el medio ambiente: introducción a sus causas humanas*. Alfaomega.
- Malthus, T. R. (1798). An essay on the principle of population. *New York: Modern Library*.
- Marín, M. (1990). Normalidad y anomalía en la investigación climatológica actual. *Revista de geografía*, 24(1):35–41.
- Martinez, B. y Gay, C. (2015). *Reporte Mexicano de Cambio Climático. Grupo I. Bases científicas. Modelos y modelación*, volume 2.
- Martínez-Zarzoso, I., Bengochea-Morancho, A., y Morales-Lage, R. (2007). The impact of population on co₂ emissions: evidence from european countries. *Environmental and Resource Economics*, 38(4):497–512.
- Mauricio, J. (2007). *Introducción al análisis de series temporales*. Universidad Complutense de Madrid.

- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., y Behrens, W. W. (1972). Los límites del crecimiento: informe al club de roma sobre el predicamento de la humanidad. Technical report, fondo de cultura económica.
- Molina, M., Sarukhán, J., y Carabias, J. (2017). *El cambio climático: Causas, efectos y soluciones*. Fondo de Cultura Económica.
- Montenegro, A. (2010). Análisis de series de tiempo. *Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana*.
- Nadal, A. (2018). Emisiones de gases de efecto invernadero: producción versus consumo. *La Jornada*.
- Nakicenovic, N. (1993). Decarbonization as a long-term energy strategy.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Grubler, A., Riahi, K., Roehrl, R., Rogner, H.-H., y Victor, N. (2000). *Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Naredo, J. M. (2010). *Raíces económicas del deterioro ecológico y social*. Siglo XXI de España Editores, SA.
- OMM (2011). *Guía de prácticas meteorológicas OMM-Nº 100*. Ginebra.
- OMM (2017). Boletín de la omm sobre los gases de efecto invernadero. 13.
- O'Neill, B. C., MacKellar, F. L., y Lutz, W. (2005). *Population and climate change*. Cambridge University Press.
- Organización Meteorológica Mundial (2016). *Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial*. Ginebra, Suiza.
- Panayotou, T. (1993). Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. Technical report, International Labour Organization.
- Pindyck, R. S. y Rubinfeld (2009). *Microeconomía*. Pearson.
- Quintana, L. y Mendoza, M. (2016). Econometría aplicada utilizando r. *Ciudad de México: Universidad*.

- Riebeek, H. (2010). Global warming. nasa. *National Aeronautics and Space Administration*.
http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalWarming/(29.8.2013).
- Riebeek, H. (2011). *http://globecarboncycle.unh.edu/carboncyclebackground.shtml*, 22 de Junio de 2019.
- Ritchie, H. y Roser, M. (2018). Energy production and changing energy sources. *OurWorldInData.org*.
- Rothman, H. (1980). *La barbarie ecológica. Estudio sobre la polución en la sociedad industrial*. Editorial Fontamara.
- Salim, R. A., Rafiq, S., y Shafiei, S. (2017). Urbanization, energy consumption, and pollutant emission in asian developing economies: An empirical analysis. Technical report, ADBI Working Paper Series.
- Samaniego, J. y Galindo, L. (2009). Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero asociados a combustibles fósiles en américa latina. *Economía Informa*, (360).
- Sandoval, E. (2013). Proyección sobre energía eléctrica en México mediante la identidad de Kaya. *Economía Informa*, 380:41–53.
- Schulze, P. C. (2002). I= pbat. *Ecological Economics*, 40(2):149–150.
- Selden, T. M. y Song, D. (1994). Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, 27(2):147–162.
- SENER (2018). *Balance Nacional de Energía, 2017*. México.
- Shafik, N. y Bandyopadhyay, S. (1992). *Economic growth and environmental quality: time-series and cross-country evidence*, volume 904. World Bank Publications.
- Shi, A. (2003). The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975–1996: evidence from pooled cross-country data. *Ecological Economics*, 44(1):29–42.
- Sjö, B. (2008). Testing for unit roots and cointegration. *Lectures in Modern Econometric Time series Analysis*.

- Steffen, W., Sanderson, R. A., Tyson, P. D., Jäger, J., Matson, P. A., Moore III, B., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H.-J., Turner, B. L., et al. (2006). *Global change and the earth system: a planet under pressure*. Springer Science & Business Media.
- Stern, D. I. y Common, M. S. (2001). Is there an environmental kuznets curve for sulfur? *Journal of Environmental Economics and Management*, 41(2):162–178.
- Stern, D. I., Common, M. S., y Barbier, E. B. (1996). Economic growth and environmental degradation: the environmental kuznets curve and sustainable development. *World development*, 24(7):1151–1160.
- Stern, N. (2007). El informe stern. *La verdad del cambio climático*. Barcelona: Ediciones párdos Ibérica, SA.
- Trewin, B. C. (2007). Función de las normales climatológicas en un clima cambiante. *Programa mundial de datos y vigilancia del clima. Documento WCDMP,(61)*.
- University of New Hampshire (2019). An introduction to the global carbon cycle. <http://globecarboncycle.unh.edu/CarbonCycleBackground.shtml>. Consultado 22-06-2019.
- Urquidi, V. L. y Egea, A. N. (2007). *Desarrollo sustentable y cambio global*. El Colegio de Mexico AC.
- van Ruijven, B. J., Daenzer, K., Fisher-Vanden, K., Kober, T., Paltsev, S., Beach, R. H., Calderon, S. L., Calvin, K., Labriet, M., Kitous, A., et al. (2016). Baseline projections for latin america: base-year assumptions, key drivers and greenhouse emissions. *Energy Economics*, 56:499–512.
- Vazquez, J. (2010). Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. *Instituto Nacional de Ecología. México*.
- Vázquez, M. R. D. (2007). *Estudio empírico de las causas subyacentes en la hipótesis de la curva de Kuznets ambiental: influencia de factores exógenos y análisis de descomposición*. Univ Santiago de Compostela.
- Vide, J. M. (2007). *Aspectos económicos del cambio climático en España*. Caixa Cataluya.
- Waggoner, P. E. y Ausubel, J. H. (2002). A framework for sustainability science: A renovated ipat identity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(12):7860–7865.

- Wang, P., Wu, W., Zhu, B., y Wei, Y. (2013). Examining the impact factors of energy-related co2 emissions using the stirpat model in guangdong province, china. *Applied Energy*, 106:65–71.
- Watson, P. K. y Teelucksingh, S. S. (2002). *A practical introduction to econometric methods: Classical and modern*. University of West Indies Press.
- Weart, S. (2006). El calentamiento global. historia de un descubrimiento científico. *Navarra: Laeotoli*.
- WMO (2002). *Introduction to climate change: Lecture notes for meteorologists*. Secretariat of the World Meteorological Organization Geneva, Switzerland.
- Wooldridge, J. M. (2006). *Introducción a la econometría: un enfoque moderno*. Editorial Paraninfo.
- WWAP (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y empleo*. UNESCO, Paris, Francia.
- Xu, Z., CHENG, G., y QIU, G. (2005). Impacts identity of sustainability assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2:003.
- York, R. y Dietz, T. (2003). A rift in modernity? assessing the anthropogenic sources of global climate change with the stirpat model. *International Journal of Sociology and Social Policy*, 23(10):31–51.
- York, R., Rosa, E. A., y Dietz, T. (2003). Stirpat, ipat and impact: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological economics*, 46(3):351–365.