Capítulo 12. Relación econométrica de datos panel entre las emisiones de dióxido de carbono y los niveles de producción de sectores económicos en México (2005-2021)

María de Lourdes Soto Rosales*
José Carlos Trejo García**
Salvador Monroy Saldívar***

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.176.12

Resumen

En el siglo xxi, el acelerado impacto del cambio climático en distintos ámbitos ha ido más allá de los niveles previstos provocados en gran medida por el efecto invernadero, que a su vez se atribuye como causa principal de este proceso el origen antropogénico, vinculado con actividades económicas y a los gases de efecto invernadero. Este trabajo tiene como propósito analizar el grado de causalidad que tienen las emisiones de dióxido de carbono en el producto interno bruto (pib) de los sectores económicos, considerando actividades económicas de México para el periodo de 2005 a 2021. El método propuesto es un modelo de mínimos cuadrados generalizados (gls, por sus siglas en inglés) factibles con datos panel. Los resultados arrojan una relación directa entre la producción y las emisiones de dióxido de carbono. De esta manera, se propone considerar regulación adecuada a los

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo proporcionado a través del proyecto de investigación: "Medición de la relación de emisiones CO_2 y el crecimiento económico en México, un enfoque de sustentabilidad", clave SIP-IPN 20231902.

* Maestra en Ciencias Económicas. Escuela Superior de Economía del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2446-7161

** Doctor en Ciencias Económicas. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Economía del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0046-5310

*** Maestro en Ciencias Económicas. Facultad de Economía de la Universidad Nacional Autónoma de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4080-8500

sectores y, por tanto, a las actividades económicas que emiten mayor CO_2 en el país, buscando no comprometer su nivel de producción.

Palabras clave: *cambio climático, efecto invernadero, Curva Ambiental de Kuznets, sectores económicos, datos panel, modelo de mínimos cuadrados generalizados factibles.*

Introducción

El efecto invernadero es una causa del cambio climático en la actualidad y tiene dos orígenes; por un lado, es un proceso meramente natural que garantiza la temperatura en la Tierra y, por otro, encuentra su promoción y aceleración en el desarrollo de diversas actividades humanas.

En los últimos tiempos los impactos del cambio climatológico han dado la pauta para discutir en torno a sus causas, y se apunta a que las actividades humanas son las generadoras de grandes volúmenes de emisiones de gases de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y ozono, sobre todo (Fernández, 2012). Específicamente, las actividades económicas de los sectores productivos emiten en gran medida el dióxido de carbono (CO_2) (Sánchez *et al.,* 2020).

Lo anterior ha originado una creciente preocupación por establecer la relación causa-efecto entre las emisiones de CO_2 y la productividad, como lo mencionan Chindo *et al.* (2015), Jardon *et al.* (2017) y Kumar y Narayan (2010). La innovación del presente trabajo es el análisis de la relación de ambas variables por sectores económicos. Por ello, esta investigación plantea la hipótesis de que estas emisiones tienen un impacto directo positivo en el nivel de la producción.

Esta investigación tuvo como propósito analizar la relación del producto interno bruto (PIB) con las emisiones de CO_2 de algunos sectores de México, los cuales implican algunas actividades económicas que se encuentran en el reporte del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) para el periodo de 2005 al 2021. La metodología que se utiliza es el planteamiento de un modelo de efectos aleatorios con el uso de GLS factibles.

En el contenido de la investigación, primeramente, se plantea el marco teórico donde se aborda el efecto invernadero, sus causas y consecuencias en algunos ámbitos. En seguida, se presenta una discusión sobre la Curva Ambiental de Kuznets, la cual es el sustento teórico que subyace a la hipótesis planteada. Posteriormente, se explica de manera breve la postulación del modelo de datos en panel. La siguiente sección contempla los datos utilizados, sobre todo los sectores considerados para este análisis y las actividades que los integran. Por último, se presentan las conclusiones que ayudan a corroborar y comprobar la hipótesis de la investigación.

Marco teórico

El impacto del cambio climático hacia otras esferas, más allá de la ambiental, ha dado la pauta para sumar esfuerzos para la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI). Si bien es cierto que el efecto invernadero es un fenómeno propio de la naturaleza y vital en la tierra, las actividades humanas han aportado mucho a la generación de los gases que lo provocan llevándolas a niveles excesivos y trayendo consigo consecuencias que ocasionan transformaciones ambientales, como el cambio en la temperatura de la Tierra.

El efecto invernadero garantiza que la Tierra no llegue a niveles bastante bajos de temperatura (cerca de 18° bajo cero) por tanto, este proceso es esencial para la subsistencia de las especies en la Tierra. De esta forma, cuando cierta cantidad de luz solar llega a la superficie se dispersa hacia el espacio donde se condensa por los GEI, manteniendo una temperatura idónea para la vida (CEPSA, 2015). Por lo que la cantidad total de energía establece las condiciones generales para los seres vivos y el sistema climático,[1] y a su vez es un reflejo de la cantidad, distribución y balance neto de los gases en la atmósfera (Steffen *et al.,* 2015).

Los gases como el vapor del agua (H_2O), el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3) (INECC, 2018),

1 Compuesto por atmósfera, hidrósfera (océano y mares), litósfera (superficie terrestre), criósfera (glaciares y capas de hielo) y la biósfera (especies vegetales, animales y humanas).

entre otros, son gases que componen la atmósfera y provocan el efecto invernadero (CEPSA, 2015). Algunos de estos gases son de origen natural; provenientes del comportamiento de la naturaleza, como la actividad de los volcanes, el proceso del ciclo del agua, los cambios naturales, etc.; y otros son de origen antropogénico, provenientes de las actividades humanas; por ejemplo, la quema de combustibles, la generación de energía eléctrica, las actividades industriales, etc. (Trespalacios *et al.,* 2018). Los GEI que son de origen antropogénico son los principales dentro de la acumulación excesiva de gases de la atmósfera, estos temas han estado desarrollados por Benavides y León (2007), Steffen *et al.* (2015), así como por Trespalacios *et al.* (2018).

A partir de la revolución industrial los volúmenes de dichos gases se han incrementado (Sánchez *et al.,* 2020), siendo el CO_2 el gas más emitido y prevalente (Nunez, 2023). De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), de 1990 a 2015, el CO_2 representó 75 % de las emisiones totales de GEI; y desde 1700 al año 2021 los niveles de emisión han aumentado 48 % (EPA, 2023). Este incremento ha generado un desequilibrio en la composición de la atmósfera, ya que la emisión continua provoca un mayor calentamiento de la superficie (CEPSA, 2015). Ante la acumulación excesiva de gases de efecto invernadero la atmosfera no libera el calor acumulado por la luz solar; lo que provoca un cambio ascendente de la temperatura, y si perdura se provoca el calentamiento global y, por tanto, el cambio climático. Esto conduce a fenómenos meteorológicos extremos y pone en riesgo la composición de los ecosistemas y a las especies de la Tierra.

Con base en lo anterior, las emisiones excesivas de los GEI han provocado en gran medida el cambio climático, que a su vez trae consigo intensas y duraderas olas de calor a nivel mundial, el aumento de precipitaciones extremas en algunas regiones del mundo, el incremento de sequías y el aumento de la pérdida de capas de hielo en Groenlandia y la Antártida (Steffen *et al.,* 2015), acidificación de los océanos, frecuentes deforestaciones y desastres naturales, así como cambios demográficos y ambientales (CEPSA, 2015).

Los impactos del cambio climático que se han reflejado de manera explícita en la actualidad han sido pauta para que distintos organismos sumen

esfuerzos para establecer políticas que contribuyan a la disminución de las emisiones. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), a través del Protocolo de Kioto, aprobado en 1997, regulaba los GEI de origen antropogénico mediante una reducción promedio de 5 % de las emisiones, y su finalidad era que fueran lo suficientemente considerables para garantizar tanto el ritmo de la actividad humana como la adaptación de los ecosistemas (UNCC, 2023). Tras su segunda renovación y al ser considerado como ineficiente, debido a que algunos países no estaban obligados a cumplir con todos los lineamientos y por la salida de este los Estados Unidos y Canadá, se dio término a este contrato (Urquizu y Salassa, 2013). En seguida, el Acuerdo de París surgió como acuerdo para combatir el cambio climático mediante acciones y establecimiento de estrategias que coadyuvaran a garantizar emisiones bajas de carbono (UNCC, 2023). A pesar de ambos acuerdos (Protocolo de Kioto y Acuerdo de París), el cambio climático ya ha tenido un avance considerable, como lo mencionan Steffen *et al.* (2015) y Benavides y León (2007), dejando entrever que los esfuerzos son aún insuficientes, ya que los impactos han trascendido hacia otras esferas, viéndose comprometido el desarrollo de los países dadas las intensificaciones de sus consecuencias (CEPAL, 2015).

Existe evidencia de que las consecuencias del cambio climático se presentan cada vez más en las actividades del sector primario; en algunas fases del ciclo del agua: como el derretimiento de glaciares; en la biodiversidad: en el incremento en algunas zonas del nivel de mar los bosques se han visto afectados; y ha tenido afectaciones en algunas ciudades: como inundaciones a causa de lluvias extremas. En la agricultura se ha reflejado en una caída de la producción y la calidad de los alimentos, niveles bajos de ingresos y el incremento de los precios (CEPAL, 2015), por lo que se ha visto afectada la producción agrícola de algunas regiones (Duarte, 2014).

El impacto social se ha propiciado con el aumento de la pobreza y, por ende, de la desigualdad a consecuencia de la disminución de los ingresos (CEPAL, 2015) y el desplazamiento de personas (Duarte, 2014), principalmente en regiones donde se desarrollan actividades productivas que son impactadas por el cambio climático, como la agricultura.

En el ámbito empresarial, los impactos se representan por aumento de gastos y costos, especialmente de aquellos derivados del tratamiento médi-

co de enfermedades ocasionadas por la contaminación, el aumento del ausentismo laboral, la reducción de la productividad de los empleados, el aumento en los costos de distribución, los gastos que solventan daños de edificios y otros semejantes, la pérdida de cosechas y la vegetación ornamental, entre otros (Duarte, 2014).

El comercio es otro ámbito en el que el cambio climático ya ha reflejado su influencia bajo el enfoque de la oferta y la demanda; si las consecuencias del cambio climático se extienden hacia la escasez de bienes y servicios, entonces se podría recurrir al comercio para obtenerlos. Por el contrario, en las regiones en las se obtienen los productos ocuparían más recursos para atender a la demanda y, por tanto, emitirían más emisiones de gases, y se generaría más deterioro ambiental (Crespo, 2008). En este sentido, ante un incremento de importaciones y exportaciones corresponde un incremento de los GEI (Duarte, 2014).

Otra esfera que sostiene el criticable impacto de los GEI es el sector financiero. Hasta hace poco se consideraba a los riesgos ambientales como parámetros de bajo impacto dentro de la fórmula del riesgo, pero derivado del cambio de perspectiva y dadas las consecuencias, hoy en día se consideran un factor fundamental. Este cambio de perspectiva respecto al tema surgió a través de un proceso de concientización del propio sector que ha propiciado la creación de políticas y estrategias que fomentan las inversiones bajo un enfoque de desarrollo sostenible. Es entonces como la banca y el sector financiero deben considerar los riesgos ambientales a los que están sujetos los proyectos financiados. Todo el proceso de transición hacia un sector financiero sustentable llevará a redefinir el valor de los activos de las empresas y aquellas con modelos de negocios enfocados hacia el desarrollo sostenible, específicamente las que se apeguen al concepto de emisiones netas iguales a cero, se verán bien vistas por los inversionistas (Carney, 2019).

Estado del arte

Como se ha mencionado, el aumento en la generación de productos y servicios conlleva a una mayor utilización de los recursos, por tanto, las emi-

siones de GEI generados en el proceso, propiamente de CO_2, tendría que ser mayores. El punto de partida de la anterior afirmación se encuentra en la Curva Ambiental de Kuznets (Kuznets, 1955). En un inicio, Kuznets analizó la relación entre la productividad y la desigualdad en el ingreso. De acuerdo con este estudio, el crecimiento económico, basado en la productividad, tiene una relación directa con la desigualdad en el ingreso, sin embargo, esta curva llega a un punto para después reflejar una relación inversa entre las variables, es decir, a medida que la productividad aumenta, la desigualdad disminuye; este efecto genera una curva invertida.

Empero, existe un estudio que explica la relación del deterioro ambiental y la producción; en este sentido, cuando se tienen menos barreras comerciales para incrementar la actividad económica, el medio ambiente se verá comprometido para cubrir la demanda resultante (Grossman y Krueger, 1991). De igual forma, Panayatou (1993) plantea la Curva de Kuznets para establecer la relación del PIB y el impacto ambiental, por lo que afirma que la degradación ambiental aumenta cuando aumenta el crecimiento económico. Derivado de la utilización extensa de recursos en países en desarrollo, las técnicas de producción y la tecnología rezagadas originan el desgaste de recursos y la degradación ambiental, más aún, el efecto de la curva invertida podrá modificarse si se establecen políticas y proyectos en pro de la protección ambiental (Crespo, 2008).

Adicionalmente, otros estudios se han realizado para establecer la relación del medio ambiente con la productividad en discusión con la Curva de Kuznets (Selden y Song, 1994; Cavlovic *et al.,* 2000; Quinde *et al.,* 2019).

Por su parte, Hettige *et al.* (2000) encuentran una relación distinta a la concepción de Kuznets, tanto la contaminación sectorial como el uso de la mano de obra permanecen constantes cuando el crecimiento económico aumenta.

De manera análoga, Soytas y Sari (2007) establecen una relación entre el consumo de energía, el nivel de producción y las emisiones de carbono para los Estados Unidos, encontrando una relación de causalidad. Asimismo, Ang (2007) plantea esta misma relación para el caso de Malasia y concuerda con una fuerte relación de causalidad a largo plazo (Ang, 2008). Apergis y Payne (2009) llegan a la misma conclusión analizando el consumo de energía y la producción.

Falconi *et al.* (2016) analizan la relación entre emisiones de CO_2 y el ingreso, y encuentran que en niveles bajos de ingreso hay una relacion creciente; sin embargo, en niveles bajos cuando el PIB aumenta, las emisiones permenecen contantes. Contrario a esta postulación, mencionan que hay un efecto de la Curva de Kuznets entre las emisiones de CO_2 y el PIB per cápita; al inicio mantienen una relación directa, pero llega un punto donde esa relación se vuelve contraria (Campo y Olivares, 2013).

Partiendo de esta discusión teórica, el presente trabajo tiene el propósito de comprobar la relación entre el PIB de 18 sectores económicos de México y el dióxido de carbono que emiten a esos niveles de produccion.

Metodología

Mediante el método científico con análisis de datos de los sectores productivos, considerando el marco teórico revisado con el análisis de investigaciones relacionadas con el comportamiento de la productividad y las emisiones de efecto invernadero, como lo es el CO_2, se parte, primeramente, de entender la aplicación de un modelo de datos panel para comprobar la relación entre el PIB y la emisión de CO_2 de las actividades económicas. En primera instancia, se plantea el modelo de la siguiente forma:

$$y_{iy} = \alpha_{it} + x_{it}\beta + u_{it}, \quad u_{it} \sim N(0, \sigma_u^2) \tag{1}$$

Donde x representa la variable exógena del modelo, β es el parámetro estimado (regresor), i representa, en este caso, a los sectores ($i = 1, \dots, N$), t representa el tiempo ($t = 1, \dots, T$) y α_{it} el componente aleatorio y u_{it} son las perturbaciones de las combinaciones entre los datos temporales y de corte transversal.

Ahora bien, para aplicar este modelo suponemos que se descompone a α_{it}; una parte constante α, y otra aleatoria, ϵ_i. En este caso se supone que depende del sector i-ésimo. Por tanto, la composición queda:

$$\alpha_{it} = \alpha + \epsilon_i \tag{2}$$

Si se replantea la ecuación (1) se tiene:

$$y_{iy} = \alpha + x_{it}\beta + w_{it} \quad (3)$$

Nótese que lo anterior se plantea considerando que la descomposición del componente aleatorio tiene un término inobservable, ϵ_i. Lo anterior permite agrupar los términos aleatorios, de tal manera que $w_{it} = \epsilon_i + u_{it}$, y deben cumplir:

$$\epsilon_i \sim N(0, \sigma_\epsilon^2), u_{it} \sim N(0, \sigma_u^2) \quad (4)$$

El modelo de efectos aleatorios tiene el siguiente supuesto fundamental:

$$Cov(x_{it}, \epsilon_i) = 0, \qquad t = 1, \dots, T \quad (5)$$

En tal caso, las perturbaciones son homoscedásticas, $E(w_{it}^2) = \sigma_\epsilon^2 + \sigma_u^2$. No obstante, las perturbaciones de las unidades estudiadas están correlacionadas en momentos diferentes en el tiempo, por lo que:

$$corr(w_{it}, w_{is}) = \frac{\sigma_\epsilon^2}{\sigma_\epsilon^2 + \sigma_u^2} \neq 0, \forall t \neq s \quad (6)$$

Para este caso se determina un modelo con mínimos cuadrados generalizados,[2] por lo que se define:

$$\lambda = 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + T \cdot \frac{\sigma_\epsilon^2}{\sigma_u^2}}} \quad (7)$$

Con ello, el modelo queda representado como (Wooldridge, 2010):

$$y_{it} - \lambda\bar{y}_{it} = \beta_0(1 - \lambda) + \beta_1(x_{it1} - \lambda\bar{x}_{it}) + \cdots + \beta_k(x_{itk} - \lambda\bar{x}_{ik}) + (v_{it} - \lambda v_i), \quad (8)$$

[2] Dada la consideración de heteroscedasticidad y el patrón de correlación en las perturbaciones.

Bajo este contexto, el efecto inobservable no está correlacionado con algún estimador. Por su parte, el estimador de efectos aleatorios λ es consistente y tiene una distribución normal asintótica (Wooldridge, 2010).

Datos

Para fines de la comprobación de la hipótesis mediante el análisis de datos a través de técnicas de estadística y econométricas, como parte de la metodología utilizada está también considerar información de 18 sectores económicos de México del año 2005 al 2021; y las variables estudiadas son el PIB (a precios constantes 100 = 2023), los datos fueron obtenidos de la página oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023), y la emisión de CO_2 (toneladas por año) de cada sector del portal del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) (Semarnat, 2023). Cabe destacar que el RETC difunde las emisiones y transferencias de sustancias enlistadas en la NOM-165-SEMARNAT-2013 (publicada el 24 de enero de 2014). A continuación, se presentan los sectores[3] a considerar en este estudio:

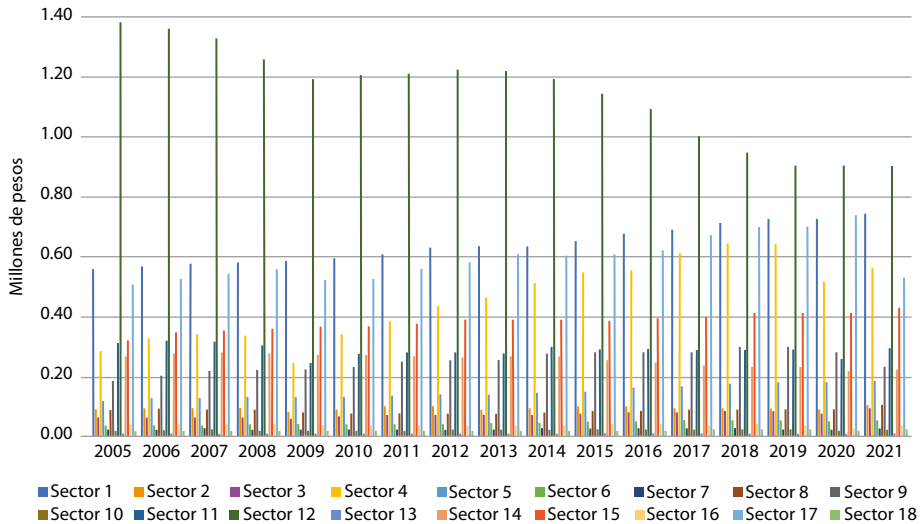
- Sector 1. Alimentos y/o consumo humano
- Sector 2. Artículos y productos metálicos
- Sector 3. Artículos y productos plásticos
- Sector 4. Automotriz
- Sector 5. Bebidas y tabaco
- Sector 6. Celulosa y papel
- Sector 7. Cemento y cal
- Sector 8. Equipos y artículos electrónicos, eléctricos y domésticos
- Sector 9. Generación de energía eléctrica
- Sector 10. Sector madera y productos
- Sector 11. Metalúrgica
- Sector 12. Petróleo y petroquímica

3 Esta consideración de sectores y sus actividades se ha retomado tal cual del registro del RETC.

- Sector 13. Pinturas y tintas
- Sector 14. Química
- Sector 15. Servicios de salud y de asistencia
- Sector 16. Textiles, fibras e hilos
- Sector 17. Tratamiento de residuos peligrosos
- Sector 18. Vidrio

En la siguiente gráfica se presenta la producción de los sectores económicos considerados.

Gráfica 12.1. *Producto interno bruto a precios constantes en millones de pesos (base 2013) de los sectores económicos, 2005-2021*



Fuente: Elaborado con datos del INEGI (2023).

Como se pueda observar, el sector que más producción anual tiene a lo largo del periodo de estudio es el Sector 12. Petróleo y petroquímica: su producción promedio fue de $1.07 millones, no obstante, ha mostrado un retroceso en la producción durante todo el periodo de estudio, representó una tasa de crecimiento negativa de 2.26 %. Específicamente en el año 2009 muestra un valor bajo pronunciado con una tasa de crecimiento negativa de 5.05 %;,derivado de la recesión económica internacional que se suscitó en ese año, representada por una disminución de la demanda de los Estados

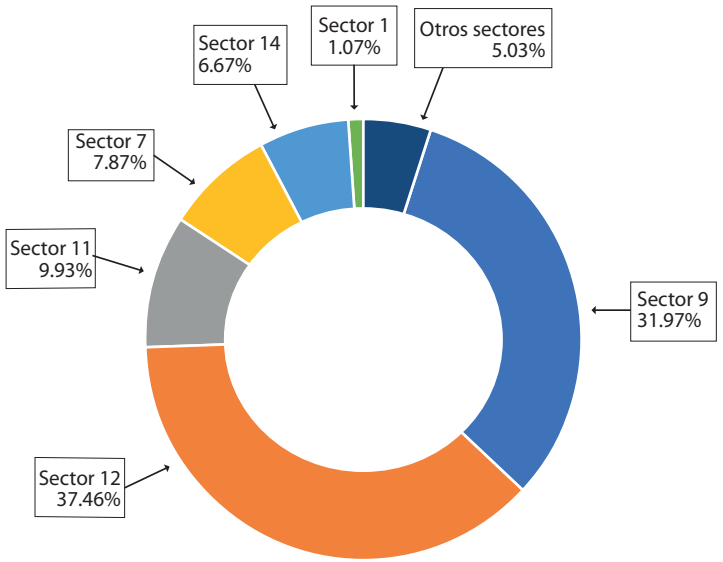
Unidos, la epidemia de influencia A/H1N1, la caída del comercio internacional, una baja en los precios del petróleo, y particularmente en México se reflejó en una disminución de la producción de crudo (Pemex, 2009). En ese mismo año casi todos los sectores de la economía tuvieron una tasa de crecimiento negativa, los principales fueron el Sector 4. Producción automotriz (−26.90 %) y el Sector 11. Metalúrgica (−19.36 %); mientras que otros sectores con caídas bajas, aunque con crecimiento positivo en el mismo año fueron el Sector 1. Alimentos y/o consumo humano (0.42 %), el Sector 9. Generación de energía eléctrica (1.40 %) y el Sector 15. Servicios de salud y asistencia (1.96 %).

Para el año 2020, nuevamente la mayoría de los sectores mantuvo una tasa de crecimiento negativa. En este periodo, sobre todo la pandemia por COVID-19 fue la causa de una crisis global donde los sectores se vieron afectados; además el ambiente internacional se vio afectado por tensiones comerciales entre los Estados Unidos y China, una caída de los precios del petróleo, altas tasas de inflación, industrias severamente afectadas por la pandemia (como la de la aviación) y la salida del Reino Unido de la Unión Europea (SHCP, 2020).

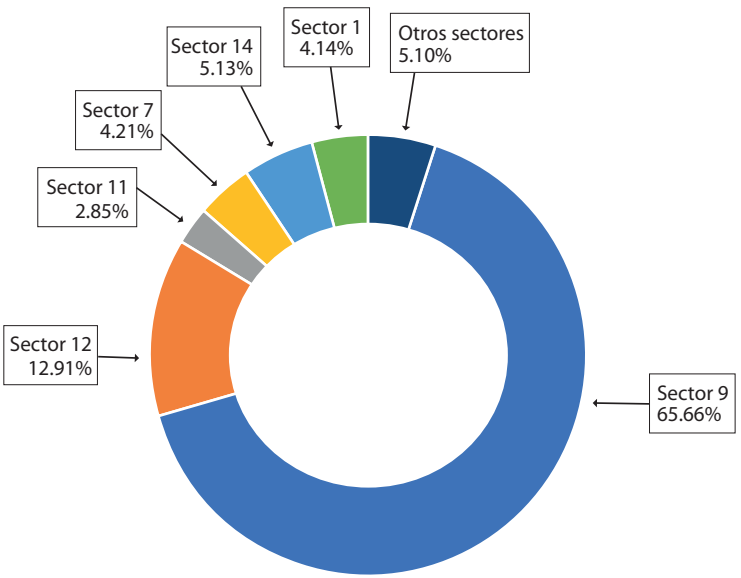
Del año 2005 al 2021 el Sector 4. Automotriz, fue el que alcanzó una tasa de crecimiento más alta, esto derivado de un incremento en las emisiones de CO_2 en el año 2012; en este año tanto las ventas internas de automóviles como las ventas al exterior se incrementaron, además de las actividades de transporte, correos y almacenamiento de esta industria, así como el estímulo que Bancomext otorgó a este sector durante ese año (SHCP, 2012).

A pesar de ello, el sector que emitió más CO_2 por año, a excepción del año 2012, fue el Sector 9. Generación de energía eléctrica, mostrando una tasa promedio anual de 11.98 %; en segundo lugar está el Sector 12. Petróleo y petroquímica, con una tasa promedio anual de 0.42%. En el año 2005 los sectores 9 y 12 emitían 69.43 % del total de las emisiones de CO_2 en el año (gráfica 12.2.a), siendo el Sector 9 el que más emitía; mientras que en el año 2021 ambos sectores emitieron 78.57 % del total del mismo tipo de emisiones, no obstante, el Sector 9 aumentó a casi el doble de emisiones, mientras que el Sector 12 se redujo en la misma proporción (gráfica 12.2.b).

Gráfica 12.2. *Participación de emisiones de CO_2 por sector económico (toneladas por año), 2005 y 2021*



(a) Emisiones de CO^2 en el año 2005



(b) Emisiones de CO^2 en el año 2021

Fuente: Elaborado con datos del RECT (Semarnat, 2023)

Resultados

Para el planteamiento del modelo, dados los niveles reportados, las variables estudiadas se expresan en términos de logaritmo natural. El modelo propuesto con las variables de estudio tiene la siguiente representación:

$$LnPIB_{iy} = \alpha_{it} + LnCO2_{it}\beta + u_{it} \quad (9)$$

En primer lugar, para probar la heterogeneidad no observada se aplica la prueba Breusch-Pagan (Breusch y Pagan, 1979), que a través del multiplicador de Lagrange evaluará que $\epsilon_i = 0$ con $\sigma_\epsilon^2 = 0$, siendo esta suposición la hipotesis nula a comprobar.

Cuadro 12.1. *Prueba de Breusch-Pagan*

Estimadores:	*Varianza*	*Desviación*
lnPIB	1.672192	1.293133
E	0.0141822	0.1190892
U	1.679349	1.295897
Test: Var(u) = 0		
	Chibar2(01) = 2335.47	
	Prob > chibar2 = 0.0000	

Fuente: Elaborado con Stata 16.

El valor p (<0.05) es suficiente para rechazar la hipótesis nula de esta prueba, por tanto, existe heterogeneidad no observada en el modelo y consecuentemente el uso de datos panel es adecuado.

Posteriormente, se estimaron dos modelos de datos panel: efectos fijos y aleatorios, y se aplicó la prueba de Hausman (Hausman, 1978) para discernir entre el más adecuado.

En este caso, el valor p (<0.05) indica el uso del modelo de efectos aleatorios, por lo que el efecto inobservable no está correlacionado con las variables explicativas, esto cumple: $cov(\epsilon_i, x_{bit}) = 0$. De esta forma, se esperan coeficientes distintos para cada uno de los sectores con el modelo planteado.

Cuadro 12.2. *Prueba de Hausman*

	Coeficientes			
	Efectos fijos	Efectos aleatorios	Diferencia	Desviación estándar
$lnCO_2$	−0.0063558	−0.0058638	−0.000492	0.0003615
	Chi2 (1) = (b − B)´ [V_b − V − B)^(−1)] (b − B) = 1.85 Prob > Chi2 = 0.1735			

Fuente: Elaborado con Stata 16.

En seguida, tomando en consideración el modelo de efectos aleatorios, se realizó la comprobación de autocorrelación serial.

Cuadro 12.3. *Correlación serial con la prueba Wooldridge*

D.LnPIB	*Coeficientes*	*Error estándar robusto*	*t*	*P > |t|*	*[95% conf. Interval]*	
lnCO2 D1.	−0.0024603	0.0026465	−0.93	0.366	−0.008044	0.0031233
	F(1, 17) = 34.772 Prob > F = 0.0000					

Fuente: Elaborado con Stata 16.

El valor p (>0.05) de la prueba Wooldridge (2010) indica que el modelo presenta correlación serial. En la existencia de autocorrelación se opta por un modelo de GLS factibles considerando el modelo de efectos aleatorios. La ecuación que representa este planteamiento es la siguiente:

$$LnPIB_{it} - LnPIB\bar{y}_{it} = \beta_0(1-\lambda) + \beta_1(LnCO2_{it1} - \lambda\overline{LnCO2}_{it}) + (w_{it} - \lambda w_i), \quad (10)$$

Entonces, aplicando el modelo de GLS se tiene que λ es cambiada por $\hat{\lambda}$, y dada la ecuación (7), se tiene que la siguiente representación del estimador es:

$$\hat{\beta} = \left(X'\hat{\Sigma}^{-1}X\right)^{-1}X'^{\hat{\Sigma}^{-1}}Y \quad (11)$$

Por tanto,

$$\hat{u} = Y_1 - X_1\hat{\beta}_{1,MCGF} \quad (12)$$

En seguida, se presentan los resultados de dos modelos con estimadores calculados con efectos aleatorios y GLS factibles (para corregir el problema de la autocorrelación).

Cuadro 12.3. *Modelo de efectos fijos, variable dependiente lnPIB*

	Efectos aleatorios	***GLS factibles***
Variable	***Coeficiente***	***Coeficiente***
$lnCO_2$	−0.0058638 (0.358)	0.1491571 (0.000)
Constante	11.76835 (0.000)	9.682992 (0.000)
Sigma_u	1.2958971	
Sigma_e	0.11908922	
Rho	0.99162564	

Fuente: Elaborado con Stata 16.

Nótese que el coeficiente negativo del modelo de efectos aleatorios; lo que lleva a suponer que ante un incremento de 1 % de las emisiones de CO_2 trae una reducción del PIB en 0.005 %, no obstante, en este modelo esta variable no es estadísticamente significativa. Es importante precisar que el uso de los GLS factibles para corregir la autocorrelación serial, aumenta los niveles del coeficiente de la pendiente del modelo, invierte la relación estable entre las variables de estudio y vuelve significativa la variable explicativa, como bien se observa en los resultados de los coeficientes. Con esta corrección de autocorrelación, los estimadores del modelo de GLS factibles se vuelven más consistentes.[4]

[4] De acuerdo con Wooldridge (2010), el parámetro $\hat{\lambda} = 1 - \sqrt{\frac{1}{1+T\cdot\frac{\hat{\sigma}_\epsilon^2}{\hat{\sigma}_u^2}}}$ que es calculado con GLS factibles, en lugar de λ, es un estimador no insesgado y con distribución normal asintótica. De manera que, aunque ϵ_i tenga correlación con x_{ij}, la correlación se atenúa por el factor $(1 - \hat{\lambda})$.

Conclusiones

Ante los acontecimientos imprevisibles ambientales se ha generado cierto grado de concientización respecto a las causas y efectos que pudieran tener sobre diversos ámbitos. Mientras hace algunos años se consideraban los riesgos ambientales como factores que influían sólo en el ámbito climatológico, los riesgos de salud y sociales ahora han provocado mayor concientización en los fuertes impactos hacia otras esferas como la economía (con influencia en diversas actividades y, por tanto, en sectores económicos) y las finanzas.

En este sentido, la Curva Ambiental de Kuznets plantea una relación positiva entre la productividad y la degradación ambiental a corto plazo, esta última medida mediante la emisiones de GEI, como el CO_2 (Panayotou, 1993; Selden y Song 1994; Cavlovic *et al.,* 2000; Quinde *et al.,* 2019; Kumar y Narayan, 2010; Chindo *et al.,* 2015), mientras que otros estudios contradicen esta afirmación (Hettige *et al.,* 2000), ya que las condiciones económicas y productivas son factores importantes para los distintos niveles de relación.

Los resultados de este trabajo para el caso mexicano arrojan que existe una relación causa-efecto entre el PIB y las emisiones de CO_2 de las actividades económicas. Mediante el uso de GLS para el planteamiento de un modelo econométrico de datos panel, con efectos aleatorios para corregir la fuerte correlación serial entre paneles, se considera que cuando las emisiones de CO_2 aumentan en 1 %, el PIB lo hará en 0.15 %, aproximadamente. Estos resultados concuerdan con el planteamiento de Falconi *et al.* (2016) y (Campo y Olivares, 2013). Con los resultados presentados se afirma la hipótesis de que las emisones de CO_2 mantienen un impacto positivo en el nivel de producción de los sectores económicos.

Cabe destacar que los resultados de este trabajo son consistentes ante los supuestos del modelo de afectos aleatorios, no obstante, se considera que la disponibilidad de información pudo haber influido en los mismos, Por tanto, se espera que las próximas investigaciones puedan tener más registros sobre las emisiones de las actividades económicas para un análisis más profundo y conciso.

Finalmente, es recomendable que se genere por parte del gobierno mexicano una regulación adecuada hacia las actividades que emiten más CO_2 en el país. Esto es, sin comprometer los niveles de producción para evitar desequilibrios en la oferta y la demanda, pero sí con el propósito de llevar un control de producción, de competencia y de las emisiones, para que exista un equilibrio sustentable y sostenible en la economía mexicana. También es recomendable considerar el uso de tecnología con la que las actividades económicas están produciendo para optar por herramientas más sustentables.

Referencias

Ang, J. (2008). Economic development, pollutant emissions and energy consumption in Malaysia. *Journal of Policy Modeling, 30*(2), 271-278. https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2007.04.010

Apergis, N., y Payne, J. (2009). CO2 emissions, energy usage, and output in Central America. *Energy Policy, 37*(8), 3282-3286. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.048

Benavides, H., y León, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. *Instituto de Hidrologia, Meteorologia y Estudios Ambientales*. https://www.bing.com/search?q=Informaci%C3%B3n+t%C3%A9cnica+sobre+gases+de+efecto+invernadero+y+el+cambio+clim%C3%A1tico&cvid=c61107c1939c4c9eb6a307d23bbad172&aqs=edge..69i57j69i11004.473j0j4&FORM=ANAB01&PC=U531

Breusch, T., y Pagan, A. (1979). A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation. *Econometrics, 47*(5). https://doi.org/10.2307/1911963

Campo, J., y Olivares, W. (2013). Relación entre las emisiones de CO2, el consumo de energía y el PIB: el caso de los CIVETS. *Universidad de Medellín*. https://www.redalyc.org/pdf/1650/165028418002.pdf

Carney, M. (2019). El mundo necesita un sistema finanicero nuevo y sostenible para frenar el cambio climático desmedido. *Finanzas y Desarrollo. FMI*. https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/spa/fda.htm

Cavlovic, T., Baker, K., Beerens, R., y Gawande, K. (2000). A meta-analysis of Environmental Kuznets Curve studies. *Agricultural and Rosource Economics Review, 29*(1), 32-42. https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20001810179

CEPAL. (2015). *La economía del cambio climático en America Latina y el Caribe*. Santiago Chile: Naciones Unidas. https://repositorio.cepal.org/handle/11362/37310#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20del%20cambio%20clim%C3%A1tico%20en%20Am%C3%A9rica%20Latina,el%20Caribe%3A%20paradojas%20y%20desaf%C3%ADos%20del%20desarrollo%20sostenible

CEPSA. (2015). El cambio climático y los gases de efecto invernadero (GEI) en CEPSA. https://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/Coorp_Comp/Medio%20Ambiente_Seguridad_Calidad/Art%C3%ADculos/Dossier-Cambio-Climatico-y-GEI.pdf

Chindo, S., Abdulrahim, A., Waziri, S., Huong, W., y Ahmad, A. (2015). Energy consumption, CO2 emissions and GDP in Nigeria. *GoeJournal, 80*(3), 315-322. http://www.jstor.org/stable/24432621

Crespo, P. (2008). *Decisiones ambientales y liberalismo.* Quito: Abya-Yala. https://core.ac.uk/download/pdf/48026601.pdf

Duarte, F. (2014). Efectos del cambio climático en la economía, el comercio internacional y la estrategia empresarial. *Contabilidad y Negocios, 9*(18), 75-98. https://doi.org/10.18800/contabilidad.201402.005

EPA. (2023). Climate Change Indicators: global greenhouse gas emissions. *United States Envorinmentak Protection Agency*. https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-global-greenhouse-gas-emissions

Falconi, F., Burbano, R., y Cango, P. (2016). La discutible curva de Kuznets. *Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales*. https://www.researchgate.net/publication/340464956_La_discutible_curva_de_Kusnetz

Fernández, J. (2012). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. *Consejería de Sanidad de la Junta de Castilla y León*. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4817473

Grossman, G., y Krueger, A. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement. *National Bureau of Economic Research*. https://www.nber.org/system/files/working_papers/w3914/w3914.pdf

Hausman, J. (1978). Specification Tests in Econometrics. *Econometrics, 46*(6). https://doi.org/10.2307/1913827

Hettige, H., Muthukumara, M., y Wheeler, D. (2000). Industrial pollution in economic development: the environmental Kuznets curve revisited. *Journal of Development Economics, 62*(2(, pp. 445-476. https://doi.org/10.1016/S0304-3878(00)00092-4

INECC. (2018). *Gases y compuestos de efecto invernadero*. https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero

INEGI. (2023). *Producto Interno Bruto.* https://www.inegi.org.mx/temas/pib/

Jardon, A., Kuik, O., y Tol, R. (2017). Economic growth and carbon dioxide emissions: an analysis of Latin America and the Caribbean. *Atmósfera, 30*(2), 87-100. https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.02.02

Kumar, P., y Narayan, S. (2010). Carbon dioxide emissions and economic growth: panel data evidence from developing countries. *Energy Policy, 38*(1), 661-666. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.005

Kuznets, S. (1955). Economic Growth and Income Inequality. *The American Economic Review, 45*(1), 1-28. http://www.jstor.org/stable/1811581

Nunez, C. (2023). *¿Qué son los gases de efecto invernadero y cuáles son sus efectos?* https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/gases-efecto-invernadero-que-son-efectos

Panayotou, T. (1993). Empirical Test and Policy Analysis of Environmental Degradation

al different Stages of Economic Development. *Technology and Employment Programme*. https://ideas.repec.org/a/spr/endesu/v12y2010i2p159-177.html

Pemex (2009). *Informe Anual*. https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/Informe-Anual.aspx

Quinde, V., Vaca, G., Quinde, F., y Lazo, L. (2019). Análisis de cointegración entre el crecimiento económico y deterioro medio-ambiental. Un análisis empírico del desarrollo sostenible de América Latina y el Caribe. *Revista de Economía del Caribe,* (24), p. 8-25. https://doi.org/10.14482/ecoca.24.338.98

Sánchez, B., Flores, S., Rodríguez, E., Anaya, A., y Contreras, E. (2020). Causas y consecuencias del cambio climático en la producción pecuaria y salud animal. Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 11*, 126-145. https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4742

Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) (2012). *Criterios generales de política económica para la iniciativa de la ley de ingresos y el proyecto de presupuesto de egresos de la federación correspondientes al ejercicio fiscal de 2013*. https://www.cesf.gob.mx/work/models/Finanzas_Publicas/docs/paquete_economico/cgpe/cgpe_2013.pdf

Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) (2020). *Criterios generales de política económica para la iniciativa de ley de ingresos y el proyecto de presupuesto de egresos de la federación correspondientes al ejercicio fiscal 2021*. Ciudad de México. https://www.finanzaspublicas.hacienda.gob.mx/es/Finanzas_Publicas/Paquete_Economico_y_Presupuesto

Selden, T., y Song, D. (1994). Environmental Quality and Development: is there a Kuznets Curve for air pollution emissions? *Journal of Environmental Economics Management, 27*(2), 147-162. https://doi.org/10.1006/jeem.1994.1031

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) (2023). *Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes*. http://sinat.semarnat.gob.mx/retc/retc/index.php

Soytas, U., y Sari, R. (2007). The relationship between energy and production: evidence from Turkish manufacturing industry. *Energy Economics, 29*(6), 1151-1165. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2006.05.019

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries W. de, Wit, C. A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, Jens, Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B. y Sverker, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science, 347*(6223). https://www.science.org/doi/10.1126/science.1259855

Trespalacios, J., Blanquicett, C., y Carrillo, P. (2018). *Gases y efecto invernadero*. Instituto de Desarrollo Sustentable. https://www.researchgate.net/publication/357622199_Gases_efecto_invernadero_Parte_1_-V01docx_Capitulo_Gases_efecto_invernadero_-_Parte_1_Gases_efecto_invernadero_-Parte_1/citation/download

UNCC. (2023). Key aspects of the Paris Agreement. https://unfccc.int/most-requested/key-aspects-of-the-paris-agreement

UNCC. (2023). *What is the Kyoto Protocol?* https://unfccc.int/es/kyoto_protocol#:~:text

=En%20concreto%2C%20el%20Protocolo%20de%20Kyoto%20pone%20en,%28GEI%29%20de%20conformidad%20con%20las%20metas%20individuales%20acordadas.

Urquizu, A., y Salassa, R. (2013). *Políticas de protección ambiental en el siglo XXI*. España. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=832372#:~:text=Se%20pretende%20dar%20una%20visi%C3%B3n%20real%20y%20normativa,el%20trabajo%20se%20ha%20dividido%20en%20dos%20partes.

Wooldridge, J. (2010). *Introducción a la econometría*. Cengage.