

CRECIMIENTO ECONÓMICO, ENERGÍA RENOVABLE, REGULACIÓN AMBIENTAL Y EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO: UN ENFOQUE DESDE UN PANEL VAR PARA LOS PAÍSES DE LA COMUNIDAD ANDINA

SAMANTHA SCARLETT GUTIÉRREZ ASCA
<https://orcid.org/0000-0002-7590-8692>
samanthagutierrez@bcp.com.pe
Banco de Crédito del Perú

LISETH FIORELA PALOMINO SALAZAR
<https://orcid.org/0009-0007-3640-1534>
fiorela.palomino@sura.pe
Área de Inversiones AFP Integra, Perú

JESÚS ELÍAS VALVERDE FIGUEROA
<https://orcid.org/0009-0005-3461-9420>
jesus.valverde.figueroa@bbva.com
Área de Estudios Económicos BBVA, Perú

Recibido: 21 de noviembre del 2024 / Aceptado: 25 de febrero del 2025
doi: <https://doi.org/10.26439/ddee2025.n007.7553>

RESUMEN. En este artículo se examinan los impactos del crecimiento económico, el consumo de fuentes de energía renovable y la regulación ambiental en las emisiones de gases de efecto invernadero en los países integrantes de la Comunidad Andina de Naciones, empleando datos anuales desde 1997 hasta 2020 mediante un modelo de panel de vectores autorregresivos (*panel vector autoregressive*, VAR). Los resultados exponen que el crecimiento económico incide directamente en el volumen de emisiones de gases de efecto invernadero. No obstante, este efecto resulta estadísticamente significativo solamente en el periodo inicial, ya que posteriormente tiende a atenuarse. Este fenómeno puede ser explicado por la curva ambiental de Kuznets, la cual sugiere que, a medida que las naciones se enriquecen, adquieren la capacidad de separar el crecimiento

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

económico del aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, los hallazgos identifican una asociación negativa entre el consumo de energía renovable y las emisiones de gases de efecto invernadero que solo se mantiene a corto plazo, ya que posteriormente se atenúa. Este fenómeno puede ser atribuido a los efectos secundarios inherentes al uso de esta nueva forma de energía limpia, tales como los altos costos de implementación y el denominado efecto rebote. Finalmente, en cuanto al efecto de la regulación ambiental sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, se observa una relación negativa entre ambas variables que resultó estadísticamente significativa únicamente en el periodo inicial. Esta situación puede ser explicada por la pérdida de eficacia de las medidas regulatorias directas en la reducción sostenida de las emisiones contaminantes, bajo el esquema de comando y control, a medida que transcurre el tiempo.

PALABRAS CLAVE: crecimiento económico / emisiones de gas de efecto invernadero / energía renovable / regulación ambiental / causalidad antropogénica

ECONOMIC GROWTH, RENEWABLE ENERGY, ENVIRONMENTAL REGULATION AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS: AN APPROACH FROM A VAR PANEL FOR THE ANDEAN COMMUNITY OF NATIONS COUNTRIES

ABSTRACT. This article examines the impacts of economic growth, the consumption of renewable energy sources and environmental regulation on greenhouse gas emissions in the member countries of the Andean Community of Nations, using annual data from 1997 until 2020 using a Panel VAR model. The results show that economic growth directly affects the volume of greenhouse gas emissions. However, this effect is statistically significant only in the initial period, since it subsequently tends to attenuate, a phenomenon that can be explained by the environmental Kuznets curve, which suggests that as nations become richer, they acquire the ability to separate economic growth from the increase in greenhouse gas emissions. Furthermore, the findings identify a negative association between the consumption of renewable energy and greenhouse gas emissions that is only maintained in the short term, as it is subsequently attenuated, a phenomenon that can be attributed to the secondary effects inherent to the use of this new form of energy. clean, such as high implementation costs and the so-called “rebound effect.” Finally, regarding the effect of environmental regulation on greenhouse gas emissions, a negative relationship is observed between both variables that was statistically significant only in the initial period. This situation can be explained by the loss of effectiveness of direct regulatory measures in the sustained reduction of polluting emissions, under the command-and-control scheme, as time passes.

KEYWORDS: economic growth / greenhouse gas emissions / renewable energy / environmental regulation / anthropogenic causality

1. INTRODUCCIÓN

La concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en el planeta emerge como una preocupación de suma importancia, principalmente por su incidencia directa en el sistema climático global y sus repercusiones económicas. La Organización de las Naciones Unidas (2023) señaló que los GEI responsables de retener el calor en la atmósfera han alcanzado niveles sin precedentes en el 2022, con una media global de dióxido de carbono (CO₂) de 50 % mayor que en niveles preindustriales. Estas concentraciones han continuado en aumento sin evidencia alguna que sugiera una posible reversión de esta tendencia.

En ese contexto, aparece el debate sobre el impacto del crecimiento económico en las emisiones de GEI. Como señala Ortiz-Ospina (2022), las posturas en torno a este tema divergen desde aquellas que sostienen que el crecimiento económico puede conducir a una reducción de emisiones mediante tecnologías más limpias y eficientes, hasta perspectivas que argumentan que el crecimiento perpetúa un modelo insostenible que intensifica las emisiones. De esta manera, si bien hay ejemplos de países que han logrado mantener un crecimiento económico constante a la par que han reducido significativamente sus emisiones de GEI (como Suecia y Dinamarca), también existen economías en rápido crecimiento (como China e India) que han enfrentado dificultades para reducir sus emisiones de manera proporcional a su crecimiento.

Por otro lado, la relación entre el uso de energía renovable y las emisiones de GEI también es compleja. Si bien existen investigaciones que destacan el potencial de su uso en la mitigación de las emisiones contaminantes gracias a su capacidad para producir electricidad sin generar cantidades significativas de GEI durante su ciclo de vida (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2011), a la vez existen algunos autores que argumentan que el despliegue masivo de energías renovables puede estar acompañado por efectos indirectos —como el denominado efecto rebote—, que implican que la implementación de estas fuentes limpias puede conllevar a un aumento inesperado en el consumo total de energía o en las emisiones, lo que contrarresta parcialmente los beneficios ambientales previstos (Fiorito, s. f.).

De igual forma, el papel de las regulaciones ambientales ha sido objeto de debate. Si bien la imposición de estándares de emisiones más estrictos para las industrias incentiva la adopción de tecnologías más limpias y la implementación de prácticas de producción más sostenibles, estas también pueden imponer cargas financieras significativas a las industrias, lo que, a su vez, puede desplazar la producción hacia regiones con estándares ambientales más laxos y resultar en una transferencia de emisiones más que en su reducción global (Ortiz-Ospina, 2022).

Dado esto, el presente estudio contribuye a la literatura al evaluar los efectos del crecimiento económico, el consumo de energía renovable y la regulación ambiental

en las emisiones de GEI en los países miembros de la Comunidad Andina de Naciones (CAN) durante el periodo de 1997 al 2020, mediante el uso de un modelo panel de vectores autorregresivos (*panel vector autoregressive*, pVAR). Esta metodología resulta particularmente adecuada porque permite evitar posibles problemas de endogeneidad y usar eficientemente la información recopilada en forma de panel.

El resto de este artículo se estructura de la siguiente manera: la sección 2 efectúa un análisis de la literatura, la sección 3 detalla la metodología empleada en este estudio, la sección 4 muestra y analiza los datos recopilados junto con los resultados obtenidos. Finalmente, la sección 5 ofrece conclusiones fundamentadas en los hallazgos y realiza recomendaciones.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Crecimiento económico y emisiones de GEI

Con respecto a esta relación, la literatura se centra en la evaluación de la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets (CAK). Según esta hipótesis, existe una relación en forma de U invertida entre el ingreso per cápita y las emisiones de GEI. En otras palabras, se postula que la calidad ambiental se degrada en las etapas iniciales del crecimiento económico (debido a un aumento en las emisiones de GEI), pero que, a medida que los ingresos crecen, la presión ambiental tiende a disminuir (Kuznets, 1955). Así, quienes respaldan esta hipótesis argumentan que el crecimiento económico en las fases iniciales del desarrollo conlleva un incremento en la contaminación, ya que en dichas fases se prioriza el aumento de la producción física y la generación de empleo e ingreso, mientras que la preocupación por la calidad ambiental queda en segundo plano (Bimonte, 2002).

Posteriormente a ello, a medida que la economía se ve afectada por los efectos de la industrialización, las preocupaciones ambientales se vuelven más evidentes, lo que conlleva la promulgación de regulaciones más estrictas y una disminución de las emisiones y la contaminación (Dinda, 2004). Sin embargo, es importante destacar que estudios recientes han demostrado que la hipótesis de la CAK no siempre se cumple. Los críticos de esta hipótesis argumentan que esta se enfoca exclusivamente en la producción y no considera otros elementos fundamentales para la degradación ambiental, como el consumo. En consecuencia, las mejoras ambientales derivadas del progreso tecnológico podrían verse contrarrestadas y el crecimiento económico podría resultar en una mayor degradación ambiental (Hipólito Leal & Cardoso Marques, 2022).

La evidencia empírica con respecto a esta hipótesis es diversa. Por un lado, Selden y Song (1994) encuentran que la mejora tecnológica promueve la sustitución de tecnologías intensivas en emisiones de contaminantes por tecnologías más eficientes y limpias. Además,

Lean y Smyth (2010), en sus estimaciones de largo plazo al realizar un análisis pVAR en cinco países de la Asociación de Naciones del Sudeste Asiático, hallan una relación no lineal entre las emisiones y la producción real, mientras que Jalil y Mahmud (2009) identificaron una relación cuadrática entre los ingresos y las emisiones, lo que respalda la relación de la CAK. En contraste, Narayan y Narayan (2010), al llevar a cabo un análisis de las elasticidades del ingreso de corto y largo plazo basado en países individuales, encontraron que en el 65 % de los países las emisiones no disminuyeron a largo plazo, lo que contradice la CAK. Asimismo, Asencios (2022) empleó un modelo de vector de corrección de errores y encontró que la hipótesis no se cumple para el caso peruano, mientras que Hwang (2022a) halló que esta sí se cumplía en Argentina, pero no en Chile ni Brasil.

Como señalan Brock y Taylor (2010), la disparidad en los resultados entre los análisis de grupos de países y países individuales se debe, en parte, a la heterogeneidad: algunos países seguirán la trayectoria de la CAK, mientras que otros seguirán una relación en forma de U, incluso algunos países carecerán de una relación discernible. Además, la literatura muestra que la validez de la hipótesis de la CAK está sujeta al tipo de contaminante. Al analizar diez indicadores de presión ambiental, Shafik y Bandyopadhyay (1992) encontraron que solo dos de ellos se ajustaban a la hipótesis de la CAK. En un análisis más reciente, Altıntaş y Kassouri (2020) observaron resultados diversos al analizar la relación CAK entre las emisiones de GEI y el producto bruto interno (PBI) y la huella ecológica y el PBI.

2.2 Consumo de energía renovable y emisiones de GEI

La sustitución de tecnologías de energía basadas en combustibles fósiles por aquellas de energía renovable representa una estrategia eficaz para mitigar las emisiones de GEI. Como señalan Corbus et al. (1993), esto se debe al hecho de que las tecnologías de energía renovable generan emisiones de carbono insignificantes o nulas. Sin embargo, Coiante y Barra (1996) encontraron que la implementación de estas fuentes de energías renovables presenta una limitación técnica significativa, la cual se deriva de la naturaleza intermitente y aleatoria de la generación de energía renovable. Además, existe la preocupación de que el aumento de la eficiencia energética pueda dar lugar a un fenómeno conocido como "efecto rebote", que involucra un incremento involuntario en las emisiones de carbono. Por ejemplo, Laitner (2000) ha señalado que la promoción de la conservación de energía puede conllevar a la reducción del precio del servicio energético, lo que a su vez aumenta la demanda total de energía.

En cuanto a los costos asociados a la adopción de tecnologías de energía renovable, Sims et al. (2003) realizaron un análisis comparativo y encontraron que la mayoría de estas tecnologías limpias tienen el potencial de reducir los costos de generación de energía y prevenir las emisiones de carbono. En la misma línea, Bilgili et al. (2016), utilizando datos de panel para diecisiete países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo

Económicos, identificaron un impacto negativo del consumo de energía renovable en las emisiones de GEI, cuyo efecto se ve amplificado por el aumento del PBI.

Por su parte, Nguyen y Kakinaka (2019) sugieren que la relación entre el consumo de energía renovable y las emisiones de GEI está fuertemente influenciada por la etapa de desarrollo económico de un país. Esta relación varía y muestra una asociación negativa en países de ingresos elevados y una positiva en países de ingresos bajos. Asimismo, Hwang (2022b), que estudió dieciocho países de América Latina entre los años 1990 y 2014, ha resaltado el potencial de la energía renovable para desempeñar un papel importante en la reducción de las emisiones de GEI a mediano y largo plazo en la región. Sin embargo, este autor también señaló que esta ventaja aún no ha sido plenamente aprovechada, ya que, en su subsiguiente investigación, en la que emplea el mecanismo de corrección de errores para analizar las naciones de Argentina, Brasil y Chile, encuentra un impacto negativo del consumo de energía renovable en las emisiones de GEI solamente en el último país mencionado (Hwang, 2022a).

2.3 Regulación ambiental y emisiones de GEI

La política ambiental desempeña una función dual en el proceso económico dirigido hacia la disminución de las emisiones contaminantes. Por un lado, tal como han señalado Carraro y Siniscalco (1994), esta incita a las empresas a incorporar tecnologías más ecológicas que, a pesar de tener costos de producción más elevados en comparación con opciones más perjudiciales para el entorno, no son empleadas actualmente. Además de ello, Pindyck (2000) indicó que esta política también impone costos hundidos a la sociedad, lo que genera un costo de oportunidad asociado a la decisión de implementar dicha política en el presente, en contraposición a la opción de esperar a obtener información adicional. Por otro lado, Lee y Min (2015) han señalado que la regulación ambiental también fomenta la inversión en investigación y desarrollo (I+D) por parte de las empresas, lo que posibilita la creación de tecnologías innovadoras y respetuosas con el medioambiente.

La evidencia empírica con respecto a esta relación es variada. Por una parte, Lucas et al. (1992) hallaron que las regulaciones no parecen tener un efecto significativo en el estímulo de la inversión en I+D, en parte debido a que el gasto asociado a los sistemas de control de emisiones suele representar una proporción reducida de los costos operativos. No obstante, en un análisis realizado por Cole et al. (2005), se halló que las regulaciones ambientales, tanto aquellas establecidas de manera oficial como las de carácter no formal, resultaron efectivas en la disminución de las emisiones contaminantes. Además, en un estudio realizado por Jin et al. (2017), se demostró que las políticas relacionadas con el cambio climático pueden ocasionar una reducción en las emisiones si el Gobierno aumenta su inversión en la investigación de la industria energética. De la misma forma, al estudiar diez países latinoamericanos durante el periodo de 1991 a 2012, Fuinhas et al. (2017) encontraron

que las políticas ambientales de energías renovables a largo plazo, junto con la producción de electricidad renovable per cápita, tanto a corto como a largo plazo, desempeñan un papel en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono per cápita. Sin embargo, tras una evaluación mediante un modelo bidireccional de efectos fijos, Chen et al. (2021) encontraron que, si bien las regulaciones ambientales guardan una relación negativa con las emisiones contaminantes, dicho efecto fue retardado y estadísticamente significativo.

3. METODOLOGÍA

3.1 Modelo econométrico

Para esta investigación se aplicó una estimación de un pVAR. El modelo pVAR es un modelo econométrico en el cual las variables (que se pueden tratar todas como endógenas) se expresan como un vector en función de sus valores pasados, lo que permite estudiar las interacciones entre las variables a lo largo del tiempo sin que la endogeneidad sea un problema. Un pVAR es una extensión de este tipo de modelo, pero que usa datos de panel; es decir, datos que se recopilan para diferentes unidades de análisis a lo largo del tiempo (Holtz-Eakin et al., 1988). El modelo viene dado por

$$Y_{it} = Y_{it-1}A_1 + Y_{it-2}A_2 + \dots + Y_{it-p+1}A_{p-1} + Y_{it-p}A_p + X_{it}B + u_i + e_{it},$$

donde $i = 1, \dots, N$ denota las unidades de análisis; p es el número de rezagos empleados en el modelo; $t = 1, \dots, T$ denota el periodo a analizar; Y_{it} representa el vector de variables dependientes; X_{it} es un vector de variables exógenas; A_p representa el vector de coeficientes asociados a los p rezagos del vector de variables dependientes; u_i es el intercepto fijo que varía para cada una de las unidades de análisis; y e_{it} es el término de error (también llamado error idiosincrático) que capta la influencia de todas las otras variables no consideradas en el modelo y se espera que $E(e_{it}) = 0$.

Para estimar un modelo pVAR, se emplea el método generalizado de momentos. Asimismo, al igual que en un pVAR tradicional, uno de los primeros pasos es identificar el ordenamiento de Cholesky, de la variable más exógena a la más endógena. Este ordenamiento depende de la teoría económica y, si fuera el equivocado, podría brindar resultados que probablemente no coincidan con un sentido económico (Greene, 2018). Para nuestro caso, el ordenamiento de Cholesky es el siguiente: PBI (*pbi*), consumo de energía renovable (*energy*), PEI (*epi*) y emisiones de GEI (*gas*).

Para garantizar la estacionariedad de las variables, se les aplicó el logaritmo y, después, la primera diferencia de forma anual. Luego, se verificó el cumplimiento de la condición de estacionariedad por medio de la prueba de raíz unitaria tipo Fisher, bajo el criterio de Phillips Perron. Esta prueba fue utilizada porque permitía obtener una mayor probabilidad de

indicar que los paneles fueran estacionarios. Utilizando el estadístico de prueba de Fisher, se concluyó que al menos un panel es estacionario si el estadístico era mayor a cada uno de los 4 *p-values* resultantes para cada variable (Choi, 2001; Maddala & Wu, 1999).

Posteriormente, se estimó el modelo considerando un rezago, dado que se trataba de datos anuales. Asimismo, se debió verificar la estabilidad del modelo, pues, si bien las variables podían ser estacionarias, esto no garantizaba su estabilidad. Se dirá que el modelo es estable si es que sus respectivos eigenvalores son menores a 1; es decir, si están dentro del círculo unitario (Stock & Watson, 2020).

Dado esto, se buscó evaluar el impacto de las variables sobre las emisiones de GEI. Para esto se recurrió a las funciones de impulso-respuesta, las cuales mostraron cómo un *shock* en una de las variables del sistema generaba respuesta en otras variables (Hamilton, 1994; Lütkepohl, 2005). Otro de los análisis que se realizó fue la descomposición de varianza, la cual nos permitió, en términos de contribuciones relativas (Greene, 2018), ver cómo las fluctuaciones en las emisiones de GEI son explicadas por *shocks* en las variables del sistema.

3.2 Base de datos

El presente trabajo tuvo como unidad de análisis los países que conforman la CAN: Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú. Asimismo, las variables que se emplearon fueron el PBI total, las emisiones de GEI, el consumo de energía renovable y el índice de desempeño ambiental (*environmental performance index*, EPI), que fueron recopiladas de diversas fuentes que se explicarán más adelante. El periodo de estudio analizado fue el de 23 periodos de frecuencia anual, desde el año 1997 al año 2020. Es importante recalcar que estas variables fueron sometidas a diversas transformaciones, con el objetivo de alcanzar la estacionalidad para la correcta aplicación del modelo utilizado.

En primer lugar, el PBI total. Los datos de esta variable se obtuvieron de la base de datos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). Asimismo, en este estudio, se usaron los valores a precios constantes en millones de dólares tomando como año base el 2018. El análisis final se realizó con la variable tasa de crecimiento anual del PBI total, tras realizar las transformaciones de logaritmo y las primeras diferencias para alcanzar la estacionalidad.

En segundo lugar, la variable de emisiones de GEI incluyó gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre, generadas por las actividades realizadas en los siguientes sectores: energía, procesos industriales, agricultura y desechos. Al igual que la anterior variable, la data fue obtenida de la Cepal y su unidad de medida estuvo definida como millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono. Asimismo, fue sometida a la transformación de primeras diferencias para alcanzar la estacionalidad.

En tercer lugar, para medir el consumo de energía renovable, se calculó la proporción de energías renovables del consumo total de energía final. Estos valores se obtuvieron de la base de datos del Banco Mundial y fue también sujeta a la transformación de primeras diferencias, lo que implica que en el análisis final se hizo uso de las variaciones anuales de esta variable.

Finalmente, la última variable empleada fue el EPI (*score*), que es una herramienta creada por la Universidad de Yale, la cual mide y clasifica el desempeño ambiental de los países utilizando once categorías y cuarenta indicadores específicos que abarcan temas como calidad del aire, acceso al agua potable y biodiversidad. Los países reciben una puntuación de 0 a 100, donde 0 representa un desempeño muy bajo y 100 un desempeño excepcional. Este índice se construye a partir de datos de las subdivisiones proporcionadas por la universidad, estandarizados con pesos del 2022. Entonces, el objetivo fue evaluar cómo los países de la CAN abordan la salud ambiental, la vitalidad de los ecosistemas y el cambio climático. Además, se aplicó la técnica de primeras diferencias para ajustar la estacionalidad de los datos.

La elección del EPI como *proxy* de la regulación ambiental se debió a su capacidad para reflejar no solo la existencia de políticas ambientales, sino también su efectividad en la reducción de impactos ambientales. Este índice captura tanto las regulaciones directas, como los estándares de emisión y restricciones legales, así como las políticas basadas en incentivos de mercado, lo que permite una evaluación más integral de los esfuerzos regulatorios (Block et al., 2024). Dado que los países de la CAN presentan diferencias en la rigurosidad y aplicación de sus normativas ambientales, el EPI resulta una herramienta adecuada para medir la presencia de regulación y también su impacto real en la sostenibilidad ambiental en esta región.

4. RESULTADOS

4.1 Prueba de estacionariedad

De acuerdo con la literatura, una de las condiciones necesarias para la estimación del modelo es la prueba de estacionariedad de las variables. Por ello, se realizó la prueba de Fisher con el enfoque de Phillips-Perron, con la cual se obtuvieron resultados favorables, puesto que todas las variables cumplieron con dicha condición. Entonces, como se observa en la Tabla 1, todos los *p-values* rechazaron la hipótesis nula, ya que todos los paneles contenían raíces unitarias. Por lo tanto, se aceptó la hipótesis alternativa, según la cual se obtiene que al menos un panel es estacionario.

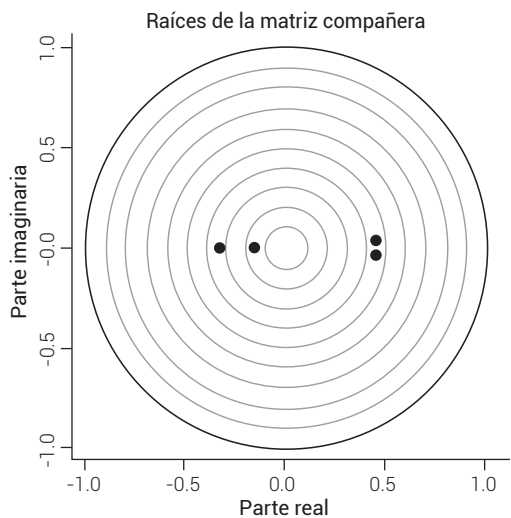
Tabla 1
Prueba de estacionariedad

Variables			Statistic	P-value
dgas	Inverse chi-squared (8)	P	65,126	0,0000
	Inverse normal	Z	-6,7528	0,0000
	Inverse logit t (24)	L	-9,176	0,0000
	Modified inv. Chi-squared	Pm	14,2815	0,0000
dlpbip	Inverse chi-squared (8)	P	17,7198	0,0234
	Inverse normal	Z	-2,2459	0,0124
	Inverse logit t (24)	L	-2,2555	0,0167
	Modified inv. Chi-squared	Pm	2,4299	0,0076
depi	Inverse chi-squared (8)	P	19,2612	0,0135
	Inverse normal	Z	-2,5500	0,0054
	Inverse logit t (24)	L	-2,5397	0,0090
	Modified inv. Chi-squared	Pm	2,8153	0,0024
denenergy	Inverse chi-squared (8)	P	83,5956	0,0000
	Inverse normal	Z	-6,9399	0,0000
	Inverse logit t (24)	L	-11,6602	0,0000
	Modified inv. Chi-squared	Pm	18,8989	0,0000

4.2 Prueba de estabilidad

Al analizar la Figura 1, todos los valores propios, eigenvalores, se encuentran dentro del círculo unitario, por lo que decimos que el pVAR satisface la condición de estabilidad.

Figura 1
Prueba de estabilidad



4.3 Funciones de impulso-respuesta

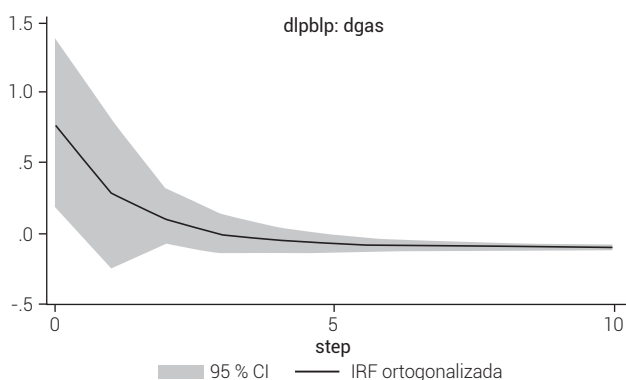
En este apartado se explican los resultados obtenidos en los impulsos respuesta, en los que se analiza la relación obtenida entre las variables estudiadas. En primer lugar, se estudió la relación entre el PBI y las emisiones de GEI, y se encontró que ambas variables guardan una relación positiva, como se puede observar en la Figura 2. Asimismo, se observó una tendencia decreciente de esta relación en el transcurso del tiempo.

Desde el punto de vista teórico, es comprensible que la relación entre ambas variables de estudio muestre esta conexión, puesto que se espera que un mayor crecimiento económico trajera consigo mayores consumos de energía, industrialización, transporte y producción de bienes y servicios, lo que en la mayoría de los casos implica un mayor uso de recursos naturales y, por ende, una mayor liberación de emisiones de gases que contribuyen al cambio climático. Los trabajos de Campo y Olivares (2014) y Burgos y Torres (2020) apoyan esta idea, ya que concluyen que existe una relación directa entre el PBI per cápita y las emisiones de GEI.

No obstante, una diferencia clave entre ambos trabajos radica en la forma funcional que utilizan para modelar la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de GEI. Nuestra investigación nos llevó a coincidir con el trabajo de Burgos y Torres (2020), quienes contemplaron un patrón no lineal (una relación que es descrita por la CAK), lo que explicaría la tendencia decreciente que se observa en la Figura 2. Por lo tanto, se observó que existen casos en los que se ha logrado desacoplar el crecimiento económico del aumento de las emisiones; es decir, se ha conseguido un crecimiento económico sin un aumento proporcional en las emisiones de GEI. Entonces, se tiene que, a medida que los países se vuelven más ricos, tienen la capacidad de adoptar tecnologías más limpias, tener medidas de eficiencia energética, políticas de desarrollo sostenible, entre otros enfoques. Países como Dinamarca y Suecia son ejemplos de países que han logrado desacoplar el crecimiento económico del aumento de las emisiones de GEI.

Figura 2

Función impulso (PBI)-respuesta (emisiones de GEI)

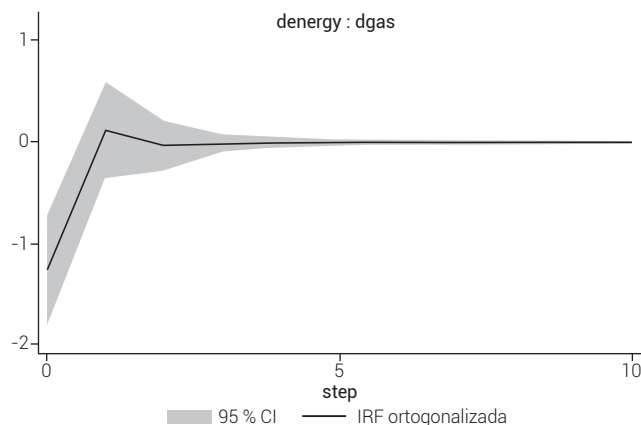


En segundo lugar, se analizó la relación entre el consumo de energía renovable y las emisiones de GEI. Allí se halló una relación negativa entre estas dos variables, como se puede apreciar en la Figura 3. También se observó que la relación entre las variables estudiadas se debilita con el paso del tiempo.

En términos generales, es evidente que el consumo de energías renovables se relaciona inversamente con las emisiones de GEI, ya que las fuentes de energías renovables (como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y biomasa) no producen emisiones directas de GEI durante su operación, en contraposición con las fuentes de energía mayormente usadas (como el carbón, petróleo y gas), las cuales generan emisiones considerables al ser quemadas para la generación de electricidad o el suministro de calor. Por lo tanto, la sustitución de las fuentes de energía convencionales por aquellas denominadas energías limpias buscan reducir la dependencia de los combustibles fósiles para lograr una menor huella de carbono.

No obstante, en nuestros resultados se observa que esta relación solo dura en el corto plazo. Este hecho puede ser explicado con el trabajo de Catalán (2022), quien encuentra que un mayor consumo de energías renovables tiene un impacto significativo en la reducción de las emisiones de GEI a corto plazo, ya que a largo plazo el efecto de esta variable sobre las emisiones de GEI se vuelve relativamente pequeña. Esto debido a que las economías aún dependen en gran cantidad de las energías no renovables (como los combustibles fósiles) en su matriz energética.

Asimismo, factores como los elevados costos y el tiempo requerido para realizar la transición estimulan la caída de esta relación en el largo plazo. También se debe considerar en este análisis el efecto rebote, ya que sugiere que, si la implementación de fuentes de energía renovable conlleva una reducción significativa en los costos de la energía, podría darse un incremento en el consumo total de energía. Esto, a su vez, podría contrarrestar parcial o totalmente el impacto esperado de reducción de emisiones de GEI asociado con el uso de energías más limpias y sostenibles (Figura 3).

Figura 3*Función impulso (consumo de energías renovables)-respuesta (emisiones de GEI)*

En tercer lugar, se estudió la relación entre el índice de *score* ambiental (*score*) y las emisiones de GEI. Se encuentra que la relación entre las variables es negativa, como se puede observar en la Figura 4. Además, se puede apreciar que esta relación deja de ser significativa a largo plazo.

Desde una perspectiva teórica, es evidente la relación negativa entre estas dos variables, debido a que la regulación ambiental incluye políticas, leyes y mecanismos de control que buscan mitigar los impactos negativos en el medioambiente, como las emisiones de GEI. Asimismo, esta regulación puede adoptar diferentes formas: desde incentivos económicos hasta estándares y restricciones legales destinados a reducir las emisiones de contaminantes.

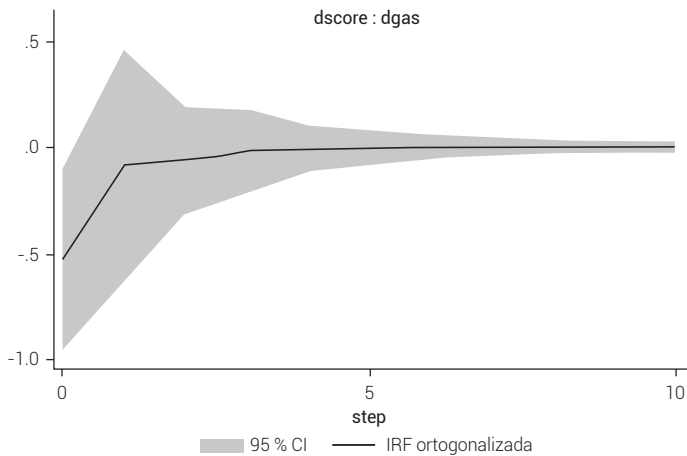
La relación obtenida también se evidencia en el trabajo de Mendiola et al. (2008), quienes estudiaron el impacto de la implementación de los permisos negociables (instrumentos de política ambiental que buscan reducir las emisiones de GEI generadas por las empresas al promover la creación de mecanismos de desarrollo limpio [MDL]) en el Perú. Lograron concluir que este tipo de regulación ambiental genera una disminución de las emisiones de GEI. Precisamente, se demostró que, durante el año 2007, debido a la realización de sesenta proyectos MDL, se logró reducir 11 099 660 toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) al año.

No obstante, se observa en la Figura 4 que la relación entre la regulación ambiental y las emisiones de GEI puede variar en el largo plazo. Esto puede ser explicado por la pérdida de eficiencia de las medidas de comando y control en la reducción sostenida de las emisiones. Esta disminución de significancia a largo plazo podría estar asociada con diversos factores,

como la adaptación de las empresas a las regulaciones existentes, la necesidad de ajustes en las políticas para abordar cambios en las condiciones económicas y tecnológicas, o la posible ineficiencia de ciertos enfoques regulatorios con el paso del tiempo.

En relación con lo anterior, la evaluación de ecosistemas del milenio planteó la necesidad de una reforma del sistema tradicional. Esto complementó la intervención estatal con herramientas basadas en el mercado y la sociedad, puesto que se esperaba lograr que las políticas ambientales tuvieran un impacto sostenible a medida que se extendía el horizonte temporal (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Figura 4
Función impulso (índice score ambiental)-respuesta (emisiones de GEI)



La Tabla 2 muestra la contribución de cada variable a las fluctuaciones de las diversas variables del sistema. Se analizaron los resultados en el décimo periodo.

Tabla 2
Descomposición de varianza

	Variables	dlpbi	denergy	depi	dgas
1. ^{er} periodo	dlpbip	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	denergy	0,9901	0,9009	0,0000	0,0000
	dscore	0,1409	0,2460	0,8346	0,0000
	dgas	0,0863	0,2469	0,4188	0,6249
5. ^o periodo	dlpbip	0,9915	0,0036	0,0000	0,0012
	denergy	0,1329	0,8621	0,0064	0,0031
	dscore	0,8312	0,0530	0,6307	0,0246
	dgas	0,1087	0,2315	0,0406	0,6231
10. ^o periodo	dlpbip	0,9951	0,0036	0,0000	0,0012
	denergy	0,1283	0,8621	0,0064	0,0031
	dscore	0,2938	0,0530	0,6287	0,0246
	dgas	0,1050	0,2315	0,0406	0,6230

Respecto de las fluctuaciones en las emisiones de GEI, se observa que el 10,5 % son explicadas por *shocks* en el PBI; 23,15 %, por *shocks* en el consumo de energías renovables; y, 4,06 %, por *shocks* en el índice de *score* ambiental. Asimismo, un punto a destacar es que el 62,3 % de las emisiones de GEI son explicadas por sus propios *shocks*, lo cual era esperable, pues las emisiones pasadas son un indicador clave para las emisiones futuras de GEI.

De todos modos, es importante destacar que las tres primeras variables explican casi el 40 % de las fluctuaciones en las emisiones de GEI. Esto es de resaltar, ya que dichas variables se refieren a factores humanos, de modo que habría un relevante poder explicativo del factor humano en el cambio climático, lo que representa una fuerte evidencia a favor de la causalidad antropogénica. Esto se debe a que, si bien hay consenso en que el planeta está experimentando temperaturas más elevadas cada año, existe todavía cierto debate sobre los factores que generan el cambio climático. El centro de la discusión es la causalidad antropogénica, la que se refiere a la relación causa-efecto entre las actividades humanas y el cambio climático.

Los defensores de la influencia antropogénica respaldan su posición con estudios como los de IPCC (2011) y los de la Organización Meteorológica Mundial (2021), en los que se destaca que la actividad humana, especialmente en la época industrial, ha generado que los niveles actuales de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) sean considerablemente más altos que en épocas pasadas. En contraste, los opositores argumentan con base en la historia geológica, pues sostienen que, en la actualidad, presentamos las mismas emisiones de CO₂ que en el Eoceno, que fue hace unos 49 a

56 millones de años. Asimismo, destacan el papel de la variabilidad solar, los eventos volcánicos y los ciclos naturales al analizar las tendencias climáticas. Ahora bien, más allá de la complejidad y el carácter multicausal de este fenómeno, la evidencia respalda la contribución sustancial de las actividades humanas a las emisiones de GEI y, precisamente en este trabajo, hallamos que es casi del 40 %, por lo que no se trata de un factor desdeñable.

5. CONCLUSIONES

Esta investigación es un aporte a la literatura dado que evalúa los efectos del crecimiento económico, el consumo de energía renovable y la regulación ambiental en las emisiones de GEI en los países miembros de la CAN mediante la estimación de un modelo panel VAR.

En primer lugar, se encuentra que el PBI y las emisiones de GEI guardan una relación positiva y una tendencia decreciente de esta relación en el transcurso del tiempo. Un mayor crecimiento económico implica un incremento en las emisiones de gases que contribuyen al cambio climático. La relación decreciente coincide con la teoría descrita por la CAK, puesto que, a medida que los países se vuelven más ricos, tienen la capacidad de adoptar tecnologías más limpias, medidas de eficiencia energética y políticas de desarrollo sostenible, entre otros.

En segundo lugar, la relación entre el consumo de energía renovable y las emisiones de GEI es negativa y se disipa con el paso del tiempo, ya que la sustitución de las fuentes de energía convencionales reduce la dependencia de los combustibles fósiles y contribuye a una menor huella de carbono. Si bien un mayor consumo de energías renovables disminuye las emisiones de GEI a corto plazo, este efecto no se mantiene en el largo plazo debido a la alta dependencia de las economías en energías no renovables.

En tercer lugar, la relación entre el EPI y las emisiones de GEI muestran una relación negativa y esta relación deja de ser significativa a largo plazo. La regulación ambiental busca mitigar los impactos negativos en el medioambiente mediante incentivos económicos hasta estándares y restricciones legales destinados a reducir las emisiones. Sin embargo, las medidas comando y control en la reducción sostenida de las emisiones pierden eficiencia en el largo plazo.

Los *shocks* en el PBI, en el consumo de energías renovables y en el EPI explican casi el 40 % de las fluctuaciones en las emisiones de GEI. Si bien aún existe cierto debate sobre los factores que generan el cambio climático, los resultados obtenidos evidencian que existe una contribución sustancial de las actividades humanas a las emisiones de GEI, lo que respalda la causalidad antropogénica.

Los resultados de este estudio refuerzan la necesidad de estrategias que mitiguen el impacto del crecimiento económico en las emisiones de GEI sin comprometer el desarrollo. Si bien este desafío es complejo, fortalecer la inversión en tecnologías limpias

y mejorar la eficiencia energética en sectores clave como industria y transporte, así como implementar políticas económicas que desincentiven el uso de combustibles fósiles, son pasos fundamentales para avanzar en esta dirección.

Asimismo, la diversificación de la matriz energética es esencial para reducir la dependencia de combustibles y para garantizar que la transición energética tenga un impacto duradero. Esto requiere infraestructuras de almacenamiento que estabilicen la generación de fuentes renovables intermitentes y políticas que mitiguen el efecto rebote. Además, la regulación ambiental debe evolucionar hacia mecanismos de mercado, como el comercio de emisiones y los incentivos económicos, que permitan una transición más flexible y efectiva. El fortalecimiento de la fiscalización y la implementación de normativas claras y exigibles evitarían que estas medidas pierdan impacto con el tiempo, lo que asegura una reducción sostenida de las emisiones.

El hallazgo de que casi el 40 % de las fluctuaciones en las emisiones de GEI sean explicadas por factores humanos resalta la necesidad de adoptar un enfoque integral en el diseño de políticas ambientales, por lo que la cooperación entre el sector público y privado, el fomento de la innovación en tecnologías sostenibles y la educación ambiental son elementos clave para reducir la huella de carbono sin afectar la competitividad económica. Con este trabajo se busca apoyar la consideración antropogénica en las emisiones de GEI. La idea es tomar más en cuenta a la sostenibilidad y a la responsabilidad ambiental para forjar un futuro en el que la relación entre las actividades humanas y el cambio climático evolucione hacia un equilibrio más armonioso con nuestro planeta.

Créditos de autoría

Samantha Gutiérrez: conceptualización, metodología, *software*, validación, investigación, curación de datos, redacción (preparación del primer borrador, revisión y edición), visualización, supervisión.

Liseth Palomino: conceptualización, *software*, validación, análisis de datos, investigación, curación de datos, redacción (preparación del primer borrador, revisión y edición), visualización.

Jesús Valverde: *software*, validación, análisis de datos, investigación, curación de datos, redacción (preparación del primer borrador, revisión y edición), visualización.

REFERENCIAS

- Altintaş, H., & Kassouri, Y. (2020). Is the environmental Kuznets curve in Europe related to the per-capita ecological footprint or CO₂ emissions? *Ecological Indicators*, 113, 106187. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106187>
- Asencios, F. A. (2022). El impacto del consumo de energía, el desarrollo del sistema financiero y el ingreso sobre las emisiones de CO₂ en el Perú. *Desafíos: Economía y Empresa*, 2(2), 55-65. <https://doi.org/10.26439/ddee2022.n002.5720>

- Bilgili, F., Koçak, E., & Bulut, Ü. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on CO₂ emissions: A revisited environmental Kuznets curve approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 838-845. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.080>
- Bimonte, S. (2002). Information access, income distribution, and the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, 41(1), 145-156. [https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(02\)00022-8](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(02)00022-8)
- Block, S., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., & Wendling, Z. A. (2024). 2024 *Environmental Performance Index*. Yale Center for Environmental Law & Policy. <https://epi.yale.edu/about-epi>
- Brock, W. A., & Taylor, M. S. (2010). The green solow model. *Journal of Economic Growth*, 15, 127-153. <https://doi.org/10.1007/s10887-010-9051-0>
- Burgos, C. C., & Torres, L. G. (2020). *Relación entre las emisiones de CO₂, el consumo de energía y el PIB para Colombia, Brasil y Chile 1971-2014*. Fundación Universitaria Los Libertadores. <https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/3575>
- Campo J., & Olivares, W. (2014). Relación entre las emisiones de CO₂, el consumo de energía y el PIB: el caso de los civets. *Semestre Económico*, 16(33), 45-65. <https://doi.org/10.22395/seec.v16n33a2>
- Carraro, C., & Siniscalco, D. (1994). Environmental policy reconsidered: The role of technological innovation. *European Economic Review*, 38(3-4), 545-554. [https://doi.org/10.1016/0014-2921\(94\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0014-2921(94)90090-6)
- Catalán, H. (2022). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 52(204). <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.204.69611>
- Chen, Q., Mao, Y., & Morrison, A. M. (2021). Impacts of environmental regulations on tourism carbon emissions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23), 12850. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312850>
- Choi, I. (2001). Unit root tests for panel data. *Journal of International Money and Finance*, 20(2), 249-272. [https://doi.org/10.1016/s0261-5606\(00\)00048-6](https://doi.org/10.1016/s0261-5606(00)00048-6)
- Coiante, D., & Barra, L. (1996). Renewable energy capability to save carbon emissions. *Solar Energy*, 57(6), 485-491. [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(96\)00136-3](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(96)00136-3)
- Cole, M. A., Elliott, R. J. R., & Shimamoto, K. (2005). Industrial characteristics, environmental regulations and air pollution: An analysis of the UK manufacturing sector. *Journal of Environmental Economics and Management*, 50(1), 121-143. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2004.08.001>

- Corbus, D., Martinez, M., Rodriguez, L., & Mark, J. (1993). *Renewable energy and its potential for carbon emissions reductions in developing countries: Methodology for technology evaluation. Case study application to Mexico*. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/6504.pdf>
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431-455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>
- Fiorito, A. (s. f.). *Mala teoría económica y ambiente: La idea del "decrecimiento" solo agrava los problemas*. Academia. https://www.academia.edu/78155204/Mala_Teor%C3%ADa_Econ%C3%B3mica_y_Ambiente_la_idea_del_decrecimiento_solo_agrava_los_problemas
- Fuinhas, J. A., Marques, A. C., & Koengkan, M. (2017). Are renewable energy policies upsetting carbon dioxide emissions? The case of Latin American countries. *Environmental Science and Pollution Research International*, 24, 15044-15054. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9109-z>
- Greene, W. (2018). *Econometric analysis* (8.ª ed.). Pearson International. <https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9781292231150>
- Hamilton, J. D. (1994). *Time series analysis*. Princeton University Press.
- Hipólito Leal, P., & Cardoso Marques, A. (2022). The evolution of the environmental Kuznets curve hypothesis assessment: A literature review under a critical analysis perspective. *Heliyon*, 8(11), e11521. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11521>
- Holtz-Eakin, D., Newey, W., & Rosen, H. S. (1988). Estimating vector autoregressions with panel data. *Econometrica*, 56(6), 1371-1395. <https://doi.org/10.2307/1913103>
- Hwang, Y. K. (2022a). The energy-growth nexus in 3 Latin American countries on the basis of the EKC framework: In the case of Argentina, Brazil, and Chile. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30, 31583-31604. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24360-3>
- Hwang, Y. K. (2022b). The impacts of economic growth, renewable energy consumption, trade openness and gross fixed capital formation on environmental degradation: Verification of the EKC and the RKC in Latin American countries during 1990-2014. *Social Science Research Network Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4075874>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2011, 28 de junio). *Special report on renewable energy sources and climate change mitigation (SRREN)*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/2011/06/28/special-report-on-renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation-srren/>

- Jalil, A., & Mahmud, S. F. (2009). Environment Kuznets curve for CO₂ emissions: A cointegration analysis for China. *Energy Policy*, 37(12), 5167-5172. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.044>
- Jin, L., Duan, K., Shi, C., & Ju, X. (2017). The impact of technological progress in the energy sector on carbon emissions: an empirical analysis from China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1505. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121505>
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *American Economic Review*, 45(1), 1-28. <http://www.jstor.org/stable/1811581>
- Laitner, J. A. (2000). Energy efficiency: Rebounding to a sound analytical perspective. *Energy Policy*, 28(6-7), 471-475. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(00\)00032-x](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(00)00032-x)
- Lean, H. H., & Smyth, R. (2010). CO₂ emissions, electricity consumption and output in ASEAN. *Applied Energy*, 87(6), 1858-1864. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.003>
- Lee, K.-H., & Min, B. (2015). Green R&D for eco-innovation and its impact on carbon emissions and firm performance. *Journal of Cleaner Production*, 108, 534-542. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.114>
- Lucas, R. E. B., Wheeler, D., & Hettige, H. (1992). *Economic development, environmental regulation, and the international migration of toxic industrial pollution 1960-88* [Policy Research Working Paper 1062]. World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/673921468765926548/pdf/multi-page.pdf>
- Lütkepohl, H. (2005). *New introduction to multiple time series analysis*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-27752-1>
- Maddala, G. S., & Wu, S. (1999). A comparative study of unit root tests with panel data and a new simple test. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61(1), 631-652. <https://doi.org/10.1111/1468-0084.0610s1631>
- Mendiola, A., Fuentes, C., Arroyo, W., Auqui, M., Huamán, R., & Martínez, J. (2008). *Desarrollo del mercado de carbono en el Perú* (Serie Gerencia Global 1). <https://repositorio.esan.edu.pe/bitstreams/00b62eba-8844-4021-8b8b-fb378df96725/download>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosistemas y bienestar humano: informe de síntesis*. Island Press. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.439.aspx.pdf>
- Narayan, P. K., & 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>

- Nguyen, K. H., & Kakinaka, M. (2019). Renewable energy consumption, carbon emissions, and development stages: Some evidence from panel cointegration analysis. *Renewable Energy*, 132, 1049-1057. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.069>
- Organización de las Naciones Unidas. (2023, 15 de noviembre). La concentración de gases de efecto invernadero alcanza otro récord y van demasiados. *Noticias ONU*. <https://news.un.org/es/story/2023/11/1525662>
- Organización Meteorológica Mundial. (2021). *Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero: estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2020* (N.º 17). <https://reliefweb.int/report/world/wmo-greenhouse-gas-bulletin-state-greenhouse-gases-atmosphere-based-global-2>
- Ortiz-Ospina, E. (2022, 25 de mayo). Crecimiento económico y emisiones de carbono. *Foco Económico*. <https://dev.focoeconomico.org/2022/05/25/crecimiento-economico-y-emisiones-de-carbono/>
- Pindyck, R. S. (2000). Irreversibilities and the timing of environmental policy. *Resource and Energy Economics*, 22(3), 233-259. [https://doi.org/10.1016/s0928-7655\(00\)00033-6](https://doi.org/10.1016/s0928-7655(00)00033-6)
- Selden, T. M., & 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. <https://doi.org/10.1006/jeem.1994.1031>
- Shafik, N., & Bandyopadhyay, S. (1992). *Economic growth and environmental quality. Time-series and cross-country evidence* [Policy Research Working Paper 0904]. World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/833431468739515725/pdf/multi-page.pdf>
- Sims, R. E. H., Rogner, H.-H., & Gregory, K. (2003). Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation. *Energy Policy*, 31(13), 1315-1326. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(02\)00192-1](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(02)00192-1)
- Stock, J. H., & Watson, M. W. (2020). *Introduction to econometrics*. Pearson Education Limited.