



VULNERABILIDAD Y RIESGOS DEL SISTEMA ENERGÉTICO ECUATORIANO FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO Y LAS POLÍTICAS DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

VULNERABILITY AND RISKS OF ECUADOR'S ENERGY SYSTEM IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY POLICIES

Flavio Arroyo-Morocho¹ , Dely Bravo-Donoso¹ ,
 Abel Remache-Coyago¹ , Tatiana Freire-Rosero^{1,*}

Recibido: 05-08-2025, Recibido tras revisión: 09-03-2026, Aceptado: 21-04-2026, Publicado: 01-07-2026

Resumen

Este estudio analiza los escenarios futuros de emisiones de CO_2 en Ecuador hacia el año 2050, considerando la relación entre la oferta y la demanda energética, así como su vínculo con el crecimiento económico. Mediante un enfoque de modelado basado en la dinámica de sistemas, se desarrollaron tres escenarios: un escenario tendencial (BAU), un escenario optimista con políticas nacionales (ESCN1) y un escenario alineado con las tendencias globales (ESCN2). El modelo fue calibrado y validado con datos históricos del período 2000-2015 y se aplicó para simular el comportamiento a largo plazo de las emisiones de CO_2 derivadas del consumo final de energía en seis sectores económicos clave. Los resultados muestran que, bajo los escenarios BAU y ESCN1, se proyecta un aumento significativo de la demanda energética y de las emisiones de CO_2 , debido a la persistente dependencia de los combustibles fósiles. En contraste, el escenario ESCN2, alineado con políticas internacionales de sostenibilidad, sugiere una posible reducción de emisiones hacia 2050 mediante una matriz energética diversificada y mejoras en eficiencia energética.

Palabras clave: cambio climático, consumo energético, crecimiento económico, emisiones CO_2 , política energética, dinámica de sistemas

Abstract

This study examines future CO_2 emissions scenarios for Ecuador by 2050, considering the interrelationships among energy supply, energy demand, and economic growth. Using a system dynamics modeling approach, three scenarios were developed: a Business-as-usual (BAU) scenario, an optimistic national policy scenario (ESCN1), and a global trends scenario (ESCN2). The model was calibrated and validated using historical data from 2000 to 2015 and then applied to simulate the long-term behavior of CO_2 emissions associated with final energy consumption across six key economic sectors. The results indicate that, under the BAU and ESCN1 scenarios, both energy demand and CO_2 emissions are projected to increase significantly, driven by continued dependence on fossil fuels. In contrast, the ESCN2 scenario, aligned with international sustainability trends and policy frameworks, suggests a potential reduction in emissions by 2050 through a more diversified energy mix and improvements in energy efficiency.

Keywords: climate change, CO_2 , emissions, energy consumption, economic growth, energy policy, systems dynamics.

^{1,*}Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Central del Ecuador, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: tefreire@uce.edu.ec.

Forma sugerida de citación: F. Arroyo-Morocho, D. Bravo-Donoso, A. Remache-Coyago y T. Freire-Rosero, "Vulnerabilidad y riesgos del sistema energético ecuatoriano frente al cambio climático y las políticas de sostenibilidad ambiental," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 36, pp. 54-69, 2026. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n36.2026.05>.

1. Introducción

Las agendas de desarrollo durante la última década han estado condicionadas por los impactos del calentamiento global, lo que ha incrementado la necesidad de estrategias de mitigación que consideren tanto los costos económicos como ambientales [1–4]. Aunque la transición global sigue siendo insuficiente, con el 82 % de la demanda energética aún dependiente de los combustibles fósiles, las incorporaciones de capacidad de energía renovable alcanzaron los 507 GW en 2023 [5–8]. Ecuador ilustra una paradoja en este contexto: a pesar de su contribución mínima a las emisiones globales, sus emisiones de dióxido de carbono alcanzaron 35.5 MtCO₂ en 2021, lo que revela una estrecha asociación entre el crecimiento del PIB y el uso intensivo de energía basada en carbono [9–11], como se muestra en la Figura 1.

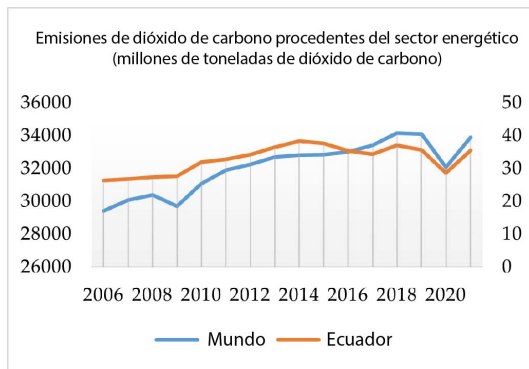


Figura 1. Emisiones de CO₂ (2007-2021)

Estudios previos indican que el crecimiento económico en países en desarrollo suele conducir a un incremento en la demanda de energía [12–17]. A menos que se implementen intervenciones deliberadas de política pública, la innovación tecnológica por sí sola no puede desacoplar las emisiones del crecimiento económico. En Ecuador, investigaciones anteriores han examinado de manera separada la reforma del sector eléctrico y las tendencias históricas [18,19]. Sin embargo, hasta la fecha, no se ha desarrollado un modelo dinámico que integre de manera sistemática el crecimiento del PIB, el consumo energético sectorial y las trayectorias de emisiones a largo plazo [20–24]. Este artículo emplea la dinámica de sistemas (*system dynamics, SD*) para capturar retardos temporales y bucles de retroalimentación, lo que permite la simulación de trayectorias de transición hacia 2050.

La dinámica de sistemas (SD) ha demostrado ser un enfoque valioso para analizar sistemas socioecológicos complejos y explorar escenarios futuros sostenibles [25–27]. El modelado de sistemas energéticos es particularmente desafiante debido a la participación de múltiples actores en la toma de decisiones y a los patrones heterogéneos de comportamiento de los con-

sumidores. La principal ventaja de la SD radica en su capacidad para capturar dinámicas no lineales, bucles de retroalimentación y retardos temporales [28].

Se ha desarrollado un modelo basado en la dinámica de sistemas para analizar el comportamiento del sistema socioenergético, económico y climático, este estudio concluye que la política climática desempeña un papel clave en el diseño de modelos de evaluación para el sector económico vinculado con la energía [29]. Además, se ha desarrollado un modelo de simulación dinámica para examinar el consumo energético de los hogares y las emisiones de CO₂ bajo diferentes condiciones [30].

Diversas investigaciones han examinado la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de carbono derivadas del consumo de energía [31–33]. Los efectos de los diferentes tipos de consumo energético sobre el crecimiento económico y las emisiones varían entre grupos de países. Además, la relación causal entre el crecimiento económico global y el consumo de energía es bidireccional [34–36].

Las relaciones causales dinámicas entre el consumo de energía, las emisiones de CO₂ y el crecimiento económico han sido analizadas mediante enfoques avanzados de modelado multivariado, lo que permite superar el sesgo asociado con variables omitidas y la incertidumbre respecto a las propiedades de estacionariedad de las variables de series temporales [37,38].

Estudios previos en Ecuador han examinado el impacto de las políticas energéticas nacionales en la transición energética durante el período 2007-2014 [27], [39], la reforma del sector eléctrico y su vulnerabilidad al cambio climático [40], y las tendencias a largo plazo en las emisiones de carbono y el consumo de energía durante el período 1980-2025 [24].

Estos análisis confirman que las economías dependientes de combustibles fósiles generan mayores emisiones que aquellas que diversifican su matriz energética hacia fuentes renovables [8], [28]. Sin embargo, pocos estudios han integrado estas perspectivas en el modelado de escenarios dinámicos, lo que subraya la necesidad de un enfoque integral como el propuesto en esta investigación.

La matriz energética primaria del Ecuador ha estado históricamente dominada por el petróleo, con una contribución limitada de fuentes renovables, como se ilustra en la Figura 2. No obstante, la generación hidroeléctrica aumentó en más del 200 % entre 2000 y 2022, mientras que la generación eólica y fotovoltaica comenzó a contribuir a partir de 2007.

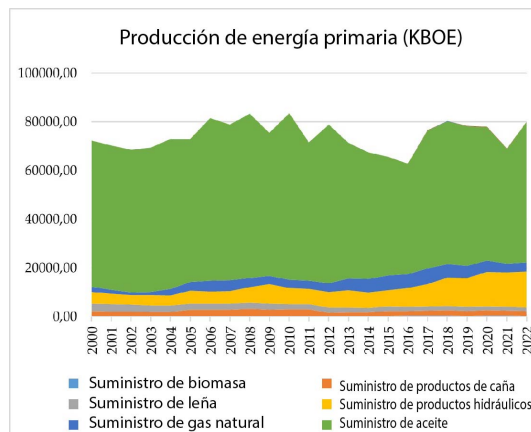


Figura 2. Evolución de la producción de energía primaria (2000-2022)

La producción de energía secundaria aumentó en más del 46 % entre 2000 y 2022, como se muestra en la Figura 3. El fueloil y el diésel han permanecido como las fuentes dominantes; sin embargo, desde 2014, la generación de electricidad ha aumentado de manera pronunciada y casi ha alcanzado los niveles de producción del diésel.

El consumo final de energía en Ecuador se distribuye en siete sectores. Para 2015, el transporte representaba casi la mitad de la demanda total, seguido por la industria y el sector residencial. A pesar de los ligeros incrementos en los sectores de transporte y residencial, la demanda total disminuyó principalmente debido a una marcada reducción del consumo energético industrial.

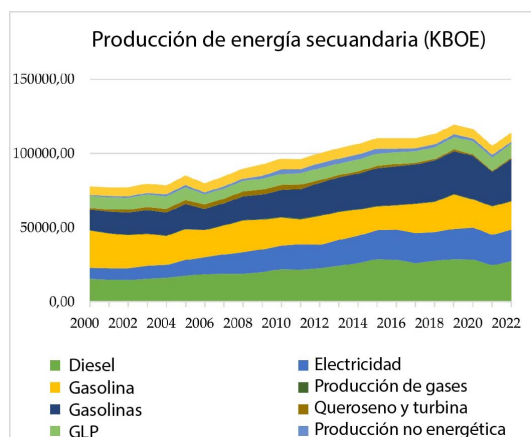


Figura 3. Evolución de la producción de energía secundaria (2000-2022).

1.1. Brecha de investigación y contribución

Aunque varios estudios han examinado las relaciones entre el consumo de energía, el crecimiento económico y las emisiones de CO_2 en Ecuador, la mayoría se ha centrado en análisis econométricos o en tendencias

históricas. Sin embargo, solo un número limitado de estudios ha explorado estas interacciones mediante enfoques de simulación dinámica que permiten evaluar escenarios de política energética a largo plazo.

En este contexto, el presente estudio desarrolla un modelo de dinámica de sistemas que integra el crecimiento económico, el consumo energético sectorial y las emisiones de CO_2 para explorar posibles trayectorias del sistema energético ecuatoriano hasta 2050. El modelo permite evaluar diferentes escenarios de política energética y proporciona información sobre los posibles efectos de las estrategias de transición energética en las emisiones futuras.

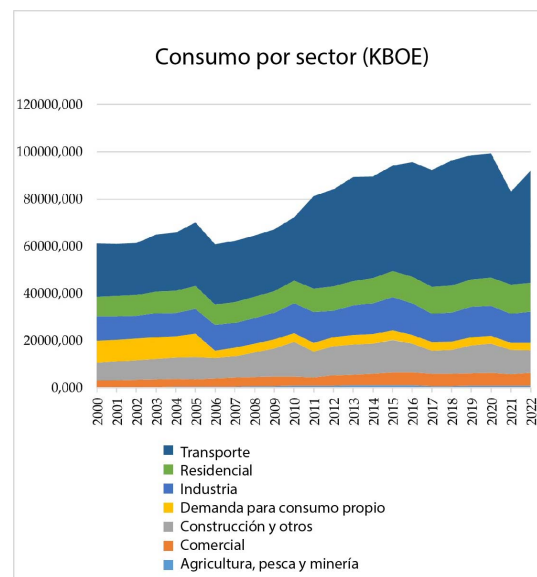


Figura 4. Evolución del consumo final de energía por sector en Ecuador (2000-2022).

2. Materiales y métodos

Los modelos de dinámica de sistemas pueden desarrollarse mediante interfaces de usuario intuitivas. Estos procedimientos de desarrollo de modelos se apoyan en un proceso de visualización que permite a los modeladores conceptualizar, documentar, simular y analizar sistemas dinámicos [41]. En esencia, el enfoque de dinámica de sistemas busca representar los problemas desde una perspectiva dinámica.

Se desarrollaron tres escenarios. El primero, el escenario *Business-as-usual* (BAU), representa la continuación de las condiciones actuales del sistema sin intervención adicional de políticas públicas. El segundo, ESCN1, corresponde a un escenario de política nacional optimista que incorpora políticas gubernamentales y proyecciones oficiales. El tercero, ESCN2, corresponde a un escenario regional o global basado en tendencias más amplias observadas en países de la región y a escala mundial.

El estudio desarrolla un modelo de dinámica de sistemas para estimar las emisiones de CO_2 en Ecuador hacia 2050. Su objetivo es examinar las relaciones entre las emisiones de CO_2 a lo largo del tiempo, el consumo de energía y el crecimiento económico del país. Las principales variables que determinan las emisiones de CO_2 son el crecimiento económico y el consumo de energía.

El método de estudio de caso permite investigar fenómenos de la vida real mediante un análisis contextual detallado de un número limitado de eventos o condiciones y sus interrelaciones [42]. También se define como un enfoque de investigación empírica para analizar un fenómeno contemporáneo dentro de su contexto real [43].

La hipótesis principal del modelo es que las emisiones de CO_2 en Ecuador no son un fenómeno aislado, sino el resultado de un bucle de retroalimentación positiva entre la demanda energética sectorial y el crecimiento económico medido a través del producto interno bruto (PIB). Se asume que, bajo condiciones de continuidad de las tendencias actuales, el crecimiento económico conduce a una mayor demanda de energía. Esta demanda, satisfecha en gran medida mediante combustibles fósiles con factores de emisión fijos, da lugar a un incremento acumulativo de las emisiones. En contraste, la intervención mediante medidas de eficiencia energética y políticas de transición energética actúa como un mecanismo de equilibrio orientado a desacoplar el crecimiento del PIB de la intensidad de carbono.

El modelo está estructurado en torno a la interacción de tres subsistemas clave: crecimiento económico, demanda final de energía y emisiones de CO_2 .

- **Subsistema económico:** determina el ritmo del sistema mediante la acumulación de capital y la producción, representadas en el PIB.
- **Subsistema de demanda:** traduce la actividad económica en requerimientos energéticos sectoriales, por ejemplo, en los sectores de transporte, industria y residencial, determinados por la intensidad energética y las mejoras tecnológicas.
- **Subsistema de emisiones:** representa el impacto ambiental asociado al consumo de diferentes fuentes de energía mediante la aplicación de factores de emisión específicos.

2.1. Construcción de escenarios

La planificación de escenarios es una técnica que, en lugar de buscar la predicción, ofrece formas alternativas de pensar sobre el futuro basadas en posibilidades plausibles [44, 45]. Este enfoque permite explorar diversos futuros alternativos. La construcción de escenarios también puede considerarse un subconjunto de

la prospectiva estratégica, definida como el desarrollo de múltiples futuros posibles para apoyar la estrategia [46, 47].

Este proceso se basa en supuestos sobre cómo podría desarrollarse el futuro, incluidas las direcciones en las que ciertas tendencias pueden evolucionar, qué desarrollos podrían permanecer constantes y cuáles podrían cambiar con el tiempo. Los escenarios describen trayectorias hacia futuros posibles [48]. Además, reflejan diferentes supuestos sobre cómo pueden desarrollarse las tendencias actuales, cómo pueden manifestarse las incertidumbres críticas y qué nuevos factores pueden surgir.

Se desarrolló una serie de escenarios para identificar tendencias en la intensidad energética y las emisiones de CO_2 asociadas al consumo final de energía en Ecuador. Los escenarios incorporan necesariamente elementos subjetivos y permanecen abiertos a diferentes interpretaciones. Su formulación es esencial para anticipar la evolución de las variables principales, orientar la política energética y proyectar los patrones futuros de consumo de energía y las trayectorias de mitigación de CO_2 .

Con fines de investigación, se propusieron tres escenarios. El primero, denominado escenario de continuidad o BAU, representa la continuación de las condiciones actuales del sistema bajo supuestos sin cambios. El escenario ESCN1 considera las políticas propuestas por el Gobierno nacional para formular las proyecciones futuras. El escenario ESCN2 refleja las tendencias globales observadas en países industrializados.

El escenario 1 (BAU) representa la continuación de las condiciones existentes. Proyecta las tendencias actuales identificadas a nivel nacional y asume que las tendencias pasadas persistirán y que no se implementarán nuevas políticas que afecten la producción y el consumo de energía.

El escenario 2 (ESCN1) considera los planes y estrategias gubernamentales establecidos en Ecuador para los próximos años en relación con la producción y el consumo de energía. Se toman en cuenta los siguientes documentos: Agenda Energética Nacional 2016-2040 [49], Balance Energético Nacional 2013-2017 [50-55], Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035 [56], Plan Maestro de Electricidad 2016-2025 [57], Plan Maestro de Electrificación 2013-2022 [58], Análisis de oportunidades de I+D+i en Eficiencia Energética y Energías Renovables en Ecuador [59], Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador 2012-2025 [60], Energía Sostenible para Todos: Evaluación Rápida y Análisis de Brechas Ecuador [61], y Energía Renovable del Ecuador [62].

El escenario 3 (ESCN2) considera la dimensión ambiental de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la gobernanza ambiental global, los acuerdos ambientales multilaterales y las perspectivas macroeconómicas

globales para abordar el cambio climático y sus impactos, así como los planes de transición relacionados con la energía limpia y la eficiencia energética. El escenario también se basa en proyecciones y tendencias reportadas por organizaciones como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [63–65], la Agencia Internacional de Energía (IEA) [2], [66–71] y BP [11], entre otras.

2.2. Modelación y simulación

El modelo de dinámica de sistemas propuesto fue simulado en Vensim, una herramienta de modelado para

construir, simular y analizar sistemas dinámicos mediante diagramas de bucles causales, así como diagramas de niveles y flujos. Este modelo estima el consumo de energía, el crecimiento económico y las emisiones de CO_2 en Ecuador hasta 2050, considerando los recursos energéticos convencionales del país. También examina el impacto del crecimiento económico sobre el consumo de energía y las emisiones de CO_2 . La Figura 5 presenta el diagrama de flujo del sistema económico-energético y de emisiones de CO_2 , e ilustra estas interacciones. Las emisiones de CO_2 resultan de la demanda final de energía en los sectores económicos del Ecuador.

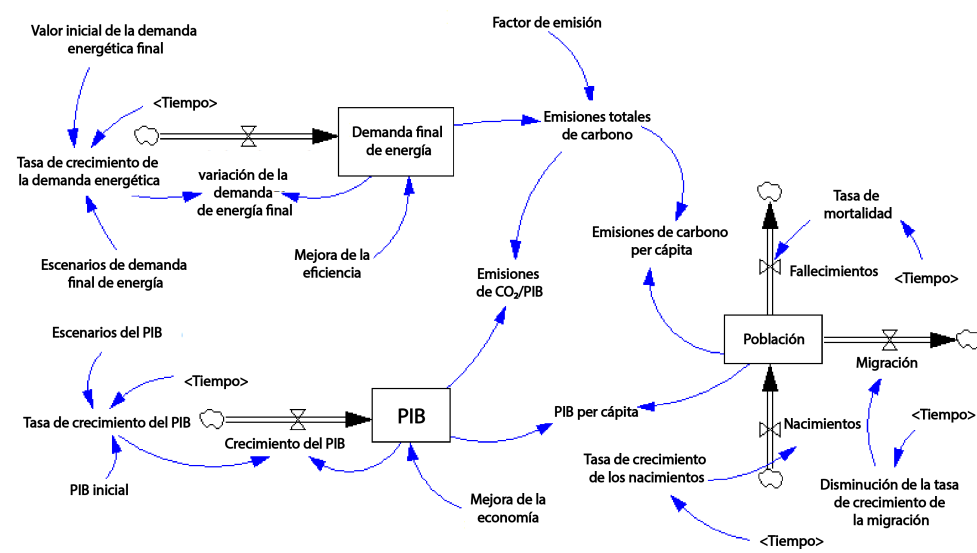


Figura 5. Diagrama de flujo del sistema económico-energético y emisiones de carbono en Ecuador.

El modelo integra tres subsistemas: crecimiento económico, demanda final de energía y emisiones de CO_2 . La actividad económica impulsa la evolución del consumo de energía en los diferentes sectores de la economía, mientras que las emisiones resultan del uso de portadores energéticos asociados a factores de emisión específicos. A nivel macro, el crecimiento económico está representado por la evolución del producto interno bruto (PIB), que sigue una tasa de crecimiento anual definida para cada escenario:

$$GDP_t = GDP_{t-1}(1 + g_t) \quad (1)$$

donde GDP_t representa el producto interno bruto en el año t , y g_t es la tasa de crecimiento económico anual.

La demanda final de energía se estima como el agregado del consumo energético sectorial en los principales sectores económicos considerados en el modelo:

$$FED_t = \sum_{s=1}^n ED_{s,t} \quad (2)$$

donde FED_t denota la demanda final total de energía, y $ED_{s,t}$ representa la demanda de energía del sector s en el año t .

Se asume que la demanda energética sectorial depende del nivel de actividad económica y de la correspondiente intensidad energética:

$$ED_{s,t} = GDP_t \cdot EI_{s,t} \quad (3)$$

donde $EI_{s,t}$ representa la intensidad energética del sector s , expresada como la cantidad de energía requerida por unidad de producción económica.

Para representar las mejoras en la eficiencia energética y el cambio tecnológico, la intensidad energética sectorial evoluciona a lo largo del tiempo de acuerdo con:

$$EI_{s,t} = EI_{s,t-1}(1 - \eta_s) \quad (4)$$

donde η_s representa la tasa anual de mejora en la eficiencia energética del sector s .

Las emisiones de CO_2 se estiman a partir del consumo de energía mediante la aplicación de los factores de emisión asociados a cada portador energético:

$$CO_{2t} = \sum_{i=1}^m EC_{i,t} \cdot EF_i \quad (5)$$

donde $EC_{i,t}$ representa el consumo del portador energético i en el año t , y EF_i es el correspondiente factor de emisión.

Dentro del marco de dinámica de sistemas implementado en Vensim, estas relaciones interactúan mediante mecanismos de retroalimentación que vinculan la actividad económica, la demanda de energía y las emisiones. Los tres escenarios analizados en este estudio, BAU, ESCN1 y ESCN2, modifican parámetros clave, como las tasas de crecimiento económico, las mejoras en la eficiencia energética y la composición de la matriz energética, para simular trayectorias futuras alternativas del sistema energético ecuatoriano hasta 2050.

2.3. Validación del modelo

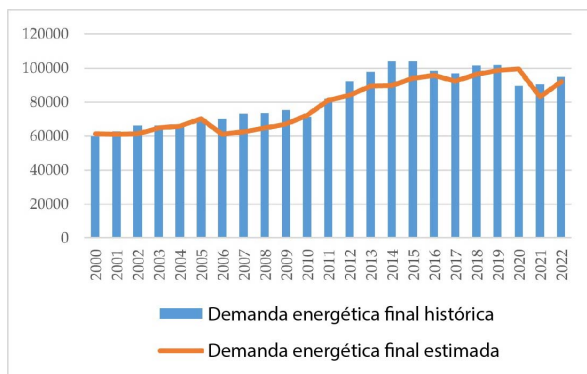
La validación es el proceso general de comparar el comportamiento del modelo con el del sistema real [72]. Ningún modelo coincide exactamente con el sistema en estudio, ya que todos los modelos son, en cierta medida, simplificaciones de los sistemas que representan [73]. La calidad de un estudio realizado mediante un modelo de simulación depende en gran medida de su validación [74]; en consecuencia, la verificación y la validación se encuentran entre las etapas clave del desarrollo de simulaciones [75]. La validación sigue siendo un aspecto esencial, aunque controvertido y no resuelto, de la metodología de modelado [76]. Los científicos sociales reconocen la imposibilidad de una validación absoluta, el carácter provisional de todos los

modelos y la necesidad de un conjunto más ecléctico y diverso de pruebas [77].

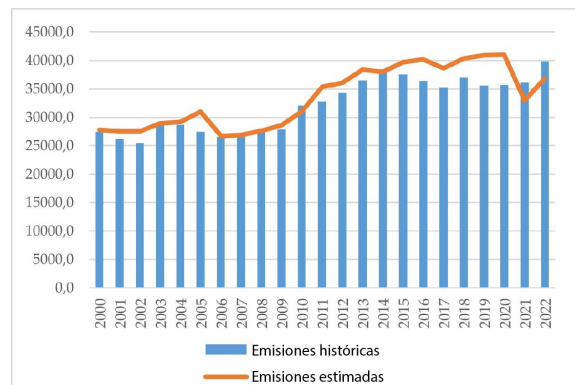
Los modeladores de dinámica de sistemas suelen estar más preocupados por las tendencias dinámicas que por los valores específicos de las variables del sistema en años particulares. En la práctica, la utilidad de un modelo es una preocupación central. La confianza se considera a menudo el criterio más apropiado para evaluar el comportamiento del modelo, ya que no existe una prueba absoluta de que un modelo pueda representar completamente la realidad. Los modelos de dinámica de sistemas se consideran válidos cuando pueden utilizarse con confianza [78].

Después de la calibración con el conjunto de datos original del sistema, el modelo se somete a una validación final basada en un segundo conjunto de datos. La validación de un modelo de dinámica de sistemas comprende dos componentes principales: validación estructural y validación del comportamiento. La validación estructural implica establecer que las relaciones utilizadas en el modelo representan adecuadamente las relaciones del mundo real relevantes para el propósito del estudio. La validación del comportamiento consiste en demostrar que el comportamiento del modelo es suficientemente cercano al comportamiento observado [79].

El modelo fue validado inicialmente mediante la comparación con datos oficiales para el período 2000-2015. La Figura 6(a) presenta la comparación entre la demanda energética simulada e histórica en los sectores de consumo responsables de las emisiones de CO_2 en Ecuador. La Figura 6(b) presenta la comparación entre las emisiones de CO_2 simuladas e históricas. Estos resultados indican que el modelo es capaz de reproducir la estructura del sistema real y generar proyecciones relevantes. El modelo también proporciona una base útil para el diseño de nuevas políticas orientadas a mejorar el comportamiento futuro del sistema.



(a)



(b)

Figura 6. (a) Demanda final de energía histórica y simulada; (b) emisiones de CO_2 históricas y simuladas en Ecuador, 2000-2022.

La validación estadística se realizó mediante dos métodos. El primero fue el método AME, que mide la desviación promedio entre los datos empíricos y los datos simulados. Puede expresarse matemáticamente de la siguiente manera:

$$AME(\%) = \frac{D_s - D_e}{D_e} \times 100 \quad (6)$$

donde AME representa el error medio porcentual entre los datos simulados y los datos empíricos, D_s denota los datos simulados y D_e corresponde a los datos empíricos.

El segundo método de validación consistió en calcular el error porcentual absoluto medio (MAPE), definido de la siguiente manera:

$$MAPE(\%) = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{(A_t - F_t)}{A_t} \right| \times 100 \quad (7)$$

donde MAPE denota el error porcentual absoluto medio, A_t , F_t y n representan los datos reales, los valores calculados y el número de datos, respectivamente.

La Tabla 1 presenta los valores obtenidos mediante los métodos AME y MAPE. Estos resultados indican la robustez del modelo. Cabe señalar que, en este estudio, se asume que las emisiones de CO_2 resultan de

la combustión de combustibles fósiles consumidos por los seis sectores económicos del Ecuador.

Además de la comparación gráfica de los datos simulados e históricos, la validación del modelo incluyó el cálculo del error porcentual absoluto (APE) y del error porcentual absoluto medio (MAPE). Estos indicadores proporcionan medidas cuantitativas de la desviación entre los valores simulados y observados. En el modelado de sistemas energéticos, los valores de MAPE ubicados aproximadamente entre el 10 % y el 15 % se consideran comúnmente aceptables para proyecciones de mediano y largo plazo, particularmente cuando el objetivo del modelo es reproducir tendencias del sistema más que observaciones anuales exactas. En este caso, los valores de error obtenidos se encuentran dentro de este rango, lo que indica que el modelo captura adecuadamente la evolución histórica de la demanda energética y las emisiones en Ecuador.

Los modelos de dinámica de sistemas están diseñados principalmente para reproducir el comportamiento estructural de sistemas complejos más que para generar pronósticos probabilísticos. Por esta razón, la validación se basa habitualmente en pruebas de consistencia estructural y en la reproducción de tendencias históricas, en lugar de basarse en intervalos de confianza estadísticos.

Tabla 1. Resultados de la validación del modelo

Año	Demanda energética				Emisiones de CO_2			
	Datos reales (KBOE)	Simulado (KBOE)	AME (%)	MAPE (%)	Datos reales (Megatonnes CO_2)	Simulado (Megatonnes CO_2)	AME (%)	MAPE (%)
2000	59911	61209	2.12	0.022	27477.0	27750.6	0.99	0.01
2001	62816	61126	-2.76	0.027	26299.0	27570.9	4.87	0.05
2002	66311	61357	-8.07	0.075	25480.0	27540.2	7.48	0.08
2003	66119	64838	-1.98	0.019	28601.0	28935.9	1.14	0.01
2004	66713	65832	-1.34	0.013	28709.0	29182.3	1.62	0.02
2005	69808	70109	0.43	0.004	27491.0	31021.8	11.38	0.13
2006	70265	60923	-15.33	0.133	26540.0	26690.2	0.56	0.01
2007	72985	62384	-16.99	0.145	27010.0	26918.3	-0.34	0.00
2008	73817	64649	-14.18	0.124	27500.0	27584.1	0.30	0.00
2009	75463	67101	-12.46	0.111	27900.0	28571.8	2.35	0.02
2010	71303	72382	1.49	0.015	32100.0	31038.0	-3.42	0.03
2011	81943	81242	-0.86	0.009	32800.0	35325.4	7.15	0.08
2012	92303	84051	-9.82	0.089	34300.0	36109.7	5.01	0.05
2013	97882	89473	-9.40	0.086	36500.0	38351.0	4.83	0.05
2014	104100	89610	-16.17	0.139	38500.0	37965.0	-1.41	0.01
2015	104084	94155	-10.55	0.095	37600.0	39712.4	5.32	0.06
2016	98353	95656	-2.82	0.027	36400.0	40168.0	9.38	0.10
2017	97023	92386	-5.02	0.048	35300.0	38596.7	8.54	0.09
2018	101537	96435	-5.29	0.050	37000.0	40336.9	8.27	0.09
2019	102133	98697	-3.48	0.034	35600.0	40899.1	12.96	0.15
2020	89705	99444	9.79	0.109	35683.0	40991.7	12.95	0.15
2021	90719	83134	-9.12	0.084	36180.0	32950.5	-9.80	0.09
2022	94957	92046	-3.16	0.031	39852.0	36792.1	-8.32	0.08
				9.31				8.56

2.4. Análisis de sensibilidad

La dinámica de sistemas ha incorporado durante mucho tiempo un enfoque sofisticado y flexible para la evaluación. La sensibilidad de los resultados debe evaluarse con respecto a la incertidumbre en los supuestos, ya sea que los parámetros se estimen de manera cualitativa o mediante métodos estadísticos [80]. A principios de la década de 1990, William Nordhaus desarrolló el modelo DICE (Dynamic Integrated Climate Economy), que fue uno de los primeros y más influyentes de los llamados modelos integrados de evaluación climática [81, 82].

El análisis de sensibilidad se realiza para identificar el comportamiento del sistema a medida que varían los parámetros clave. Dado que las mejoras en la eficiencia energética y el crecimiento económico afectan significativamente el consumo de energía y las emisiones de CO_2 , se diseñaron tres escenarios para evaluar la sensibilidad del modelo (Figura 7).

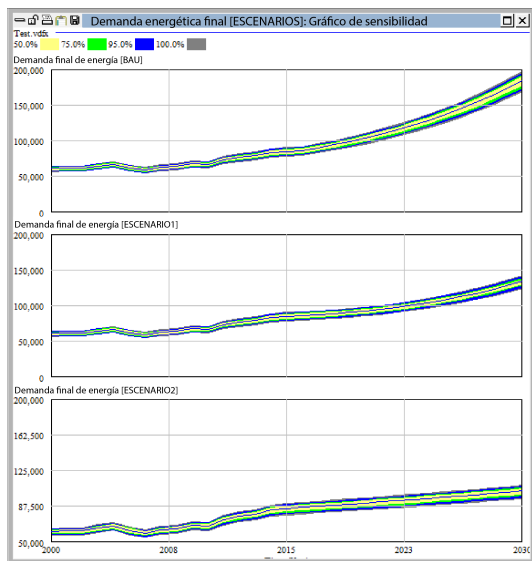


Figura 7. Escenarios de demanda de energía para el análisis de sensibilidad, generados con Vensim.

3. Resultados y discusión

3.1. Demanda final de energía

El modelo proyecta comportamientos divergentes dependiendo de la rigurosidad de las políticas implementadas [4], [83], como se muestra en la Figura 8:

- **Escenario de continuidad (Business-as-usual, BAU):** se proyecta que la demanda aumente 1.21 veces en relación con el año base, mientras que el petróleo y el gas natural se mantendrán como las fuentes energéticas dominantes. La vulnerabilidad del sistema se refleja en su

dependencia de hidrocarburos importados para compensar el déficit de infraestructura.

- **Escenario de políticas nacionales 1 (ESCN1):** en contraste con el escenario de continuidad, este escenario anticipa un incremento de la demanda de 2.23 veces, a pesar de la planificación oficial. El crecimiento de la demanda en los sectores de transporte e industrial supera los beneficios de las políticas actuales de eficiencia, lo que sugiere que los objetivos existentes son insuficientes para reducir la intensidad energética.
- **Escenario de tendencia global 2 (ESCN2):** es el único escenario que logra una reducción neta del 10 % en la demanda para 2050. El éxito de esta trayectoria radica en la sustitución intensiva de combustibles fósiles por electricidad y en mejoras de eficiencia que compensan los efectos del crecimiento económico.

La disminución gradual del uso de combustibles fósiles, particularmente gasolina y diésel, subraya la efectividad de las políticas orientadas a reducir las emisiones de carbono y promover tecnologías de energía limpia. La demanda sostenida de gas natural y electricidad sugiere una transición hacia estas fuentes de energía de menor contenido de carbono, sin un aumento sustancial en el consumo total de energía.

En este escenario, las políticas energéticas del Gobierno enfatizan una estrategia pragmática que impulsa tanto la eficiencia energética como la diversificación de la matriz energética. Este enfoque probablemente incluye estándares de eficiencia más estrictos, apoyo a las fuentes de energía renovable y avances en las tecnologías de almacenamiento y distribución de energía.

En el sector transporte, el escenario BAU proyecta que, para 2050, el consumo de energía, impulsado principalmente por el diésel y la gasolina, representará el 34 % de la matriz de consumo energético nacional en relación con el año base, como se muestra en la Figura 8. Este sector sigue siendo altamente ineficiente debido a su fuerte dependencia de combustibles fósiles. En comparación, el escenario ESCN1 proyecta la demanda final de energía en el 69 % del nivel del año base del sector, lo que refleja un crecimiento significativo en las necesidades de transporte y el efecto limitado de las políticas de eficiencia energética. En contraste, el escenario ESCN2 proyecta la demanda en el 27 % del nivel del año base, probablemente debido a políticas más intensivas y a la adopción de fuentes de energía alternativas, lo que resulta en una reducción sustancial de la dependencia de combustibles fósiles y en una contención más efectiva del crecimiento de la demanda energética. Estos resultados distinguen claramente al ESCN1 como reflejo de intervenciones más moderadas, mientras que el ESCN2 representa cambios más profundos en política y tecnología.

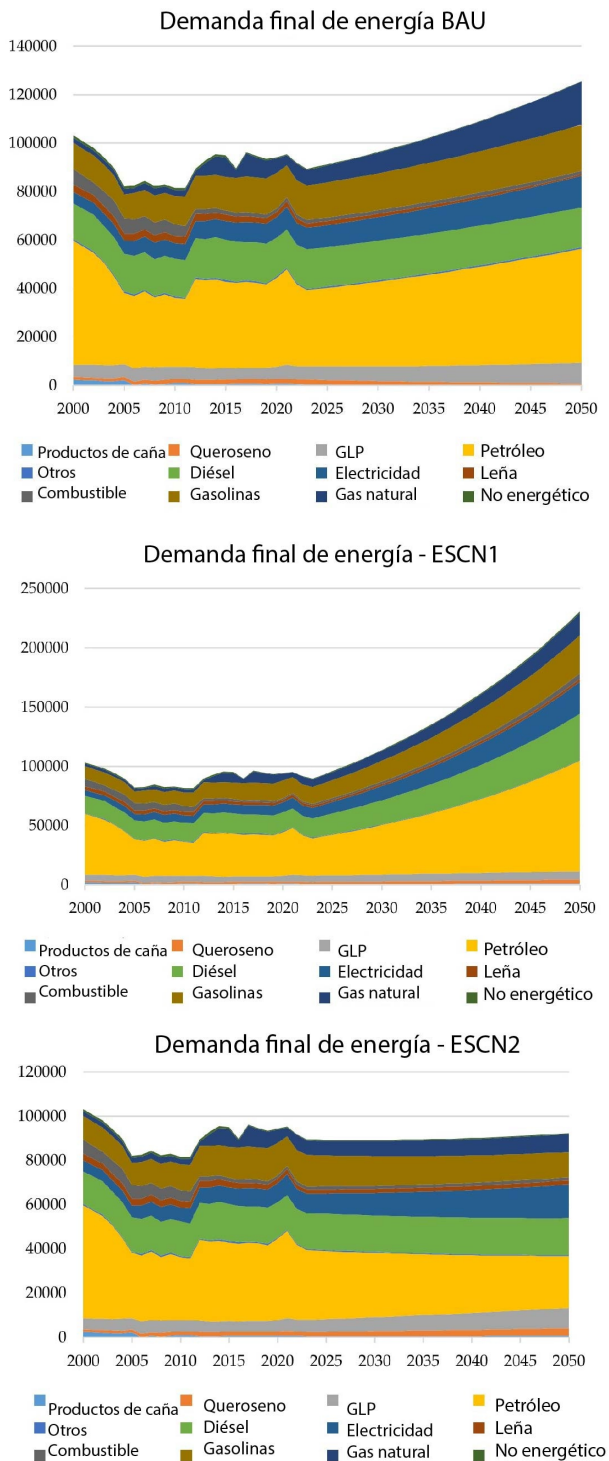


Figura 8. Escenarios de demanda final de energía.

Estos escenarios ilustran cómo las intervenciones de política energética pueden diferir en su impacto. El escenario ESCN1 sugiere que las medidas moderadas pueden ser insuficientes para contrarrestar el aumento de la demanda de energía. En contraste, el escenario ESCN2 indica que las estrategias integrales podrían mejorar la eficiencia energética y reducir la dependen-

cia de combustibles fósiles en el sector del transporte para 2050.

3.2. Emisiones de CO_2

Según el análisis sectorial, el sector del transporte es la principal fuente de emisiones, pues representa el 34 % del total bajo el escenario de continuidad (*Business-as-usual*), como se muestra en la Figura 9. Las proyecciones de emisiones indican lo siguiente:

- Bajo el escenario ESCN1, las emisiones aumentan un 145 %, ya que el crecimiento esperado de la actividad económica supera la tasa de descarbonización de la matriz energética actual.
- Bajo el escenario ESCN2, las emisiones disminuyen en un 5 %, impulsadas por la adopción de tecnologías de generación limpia y el cumplimiento de estándares internacionales de sostenibilidad.

Estos resultados indican que la expansión de la economía ecuatoriana no debe considerarse un impedimento, sino más bien una fuerza impulsora para la inversión en nuevas tecnologías de mitigación y en I+D.

La sustitución de combustibles fósiles mediante el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico restante del país parece ser la vía más viable para reducir las emisiones desde los actuales 37.10 MtCO_2 a niveles inferiores a 20 MtCO_2 .

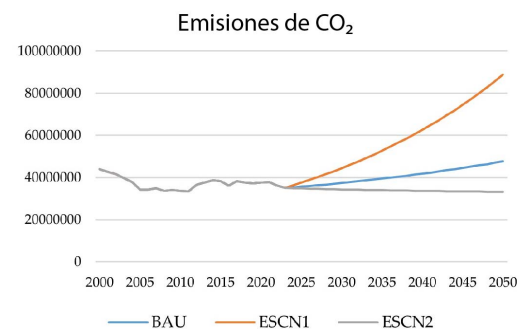


Figura 9. Emisiones de CO_2 ($kt \text{ CO}_2$)

Los resultados de este estudio son consistentes con investigaciones previas que indican una fuerte relación entre el crecimiento económico, el consumo de energía y las emisiones de CO_2 . Varios estudios han demostrado que, en economías en desarrollo, la expansión económica suele estar acompañada de un incremento en la demanda de energía [84, 85], particularmente cuando los combustibles fósiles permanecen dominantes en la matriz energética [86]. En el contexto ecuatoriano, esta relación es especialmente evidente en los sectores del transporte e industrial, que representan una proporción significativa del consumo final de energía.

Tendencias similares han sido reportadas en estudios que analizan escenarios de transición energética en

América Latina [87–89], donde la dependencia de combustibles fósiles continúa impulsando el crecimiento de las emisiones a pesar del incremento de las inversiones en energías renovables. Estos hallazgos refuerzan la importancia de mejorar la eficiencia energética y promover cambios estructurales en el sistema energético para reducir las emisiones a largo plazo.

Desde una perspectiva de política energética, el análisis de escenarios destaca la importancia de implementar estrategias de transición energética a largo plazo. Los resultados sugieren que mantener las tendencias actuales bajo el escenario BAU podría conducir a un aumento sostenido tanto de la demanda de energía como de las emisiones de CO_2 . En contraste, los escenarios que incorporan intervenciones de política energética más intensivas y mejoras tecnológicas indican una posible estabilización o reducción de las emisiones a lo largo del tiempo [90].

Estos resultados respaldan la necesidad de políticas orientadas a incrementar la participación de las energías renovables, mejorar la eficiencia energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles en sectores clave de la economía ecuatoriana.

3.3. Discusión y limitaciones

Aunque el análisis de dinámica de sistemas empleado en este estudio proporciona un marco útil para examinar las interacciones a largo plazo entre la demanda de energía, el crecimiento económico y las emisiones de CO_2 , deben considerarse varias limitaciones asociadas a los supuestos de los escenarios.

Los escenarios se basan en supuestos simplificados sobre las tasas futuras de crecimiento económico, los cambios en la intensidad energética y las variaciones en la matriz energética. Estas variables están influenciadas por diversos factores externos, como los precios internacionales de la energía, los cambios regulatorios, la innovación tecnológica y las condiciones geopolíticas.

Los cambios estructurales en la economía, como la digitalización de los procesos industriales, la adopción generalizada de tecnologías de bajo carbono y la electrificación acelerada, pueden alterar estas relaciones a lo largo del tiempo. En particular, los cambios tecnológicos disruptivos pueden reducir la intensidad energética más rápidamente de lo previsto en las simulaciones actuales. Los escenarios orientados a políticas energéticas suponen que los acuerdos internacionales y las estrategias nacionales de sostenibilidad se implementarán dentro de los plazos establecidos. En la práctica, sin embargo, la efectividad de las políticas climáticas y energéticas depende de la capacidad institucional, la aceptación social y la disponibilidad de inversión, lo que puede dar lugar a una implementación parcial o retrasada de las medidas.

El modelo representa el sistema energético ecuatoriano en un nivel agregado y, por lo tanto, no capta

explícitamente las dinámicas micro, tales como los cambios en el uso de la energía, los procesos de difusión tecnológica o las desigualdades regionales en el acceso a la energía y en el desarrollo de la infraestructura. Estos factores pueden influir en la evolución real de la demanda energética y de las emisiones.

Finalmente, las incertidumbres asociadas a la variabilidad climática no fueron modeladas explícitamente en el subsistema de oferta de energía. Los eventos climáticos extremos, como las sequías prolongadas, pueden alterar la disponibilidad de electricidad y afectar indirectamente el uso de combustibles fósiles y las emisiones debido al papel significativo de la energía hidroeléctrica en la generación eléctrica del país.

A pesar de la utilidad del modelo propuesto para explorar tendencias a largo plazo, deben reconocerse varias limitaciones. En primer lugar, el modelo se basa en datos históricos y en supuestos sobre el crecimiento económico, la intensidad energética y la implementación de políticas, los cuales introducen incertidumbre en las proyecciones a largo plazo. En segundo lugar, el modelo representa el sistema energético en un nivel agregado y no considera explícitamente los procesos de difusión tecnológica ni los cambios en el comportamiento del consumo de energía. Finalmente, los escenarios analizados se basan en supuestos simplificados sobre las condiciones futuras políticas y económicas, que pueden desarrollarse de manera diferente en la práctica.

A pesar de estas limitaciones, el modelo proporciona una herramienta analítica útil para investigar tendencias a largo plazo y examinar las posibles consecuencias de diferentes trayectorias de política energética. Por lo tanto, los resultados no deben interpretarse como predicciones definitivas del desarrollo futuro del sistema energético ecuatoriano, sino más bien como indicadores que apoyan la planificación estratégica.

4. Conclusiones

Las proyecciones económicas por sí solas no ofrecen una vía favorable para la reducción de emisiones en Ecuador; por lo tanto, se requieren políticas públicas específicas para mejorar la calidad de vida mientras se avanza en la sostenibilidad ambiental. Al mismo tiempo, el análisis de escenarios sugiere que, a medida que aumenta el uso de energías renovables junto con el crecimiento económico continuo, la relación entre estas variables se vuelve menos acoplada con el tiempo respecto de su comportamiento histórico.

La inversión en investigación científica enfocada en tecnologías emergentes y estrategias de mitigación debe convertirse en una prioridad estatal para asegurar que el crecimiento económico genere resultados ambientales positivos. Este esfuerzo debe incluir el fortalecimiento de capacidades locales en la gestión de

redes inteligentes y en la digitalización de la demanda, lo que permitiría una gestión más eficiente de la carga y reduciría la presión sobre la infraestructura existente.

Dado que el sector del transporte es la mayor fuente de emisiones y representa el 34 % de la matriz de consumo bajo la tendencia proyectada, es necesario pasar de una política pasiva de sustitución tecnológica a una política activa que promueva la electrificación del transporte público y de carga pesada. Los hallazgos indican que la eficiencia energética por sí sola no será suficiente para absorber el crecimiento proyectado del sector. Por lo tanto, deberían implementarse incentivos fiscales para apoyar directamente la infraestructura de transporte de carga, mientras que los subsidios a los combustibles fósiles deberían eliminarse gradualmente y los recursos correspondientes deberían reasignarse a fondos de innovación tecnológica.

Los resultados también muestran que la intensidad energética en Ecuador se mantiene alta. Por lo tanto, es esencial fortalecer el Plan Nacional de Eficiencia Energética mediante regulaciones vinculantes para la industria. En este sentido, se requieren auditorías energéticas obligatorias y la adopción de estándares internacionales. El objetivo final debería ser un desacoplamiento genuino, que permita que el PIB crezca mientras la demanda de energía se estabiliza o disminuye, como se observa en las trayectorias del escenario ESCN2.

La vulnerabilidad del sistema frente a eventos relacionados con el clima, como las sequías que afectan negativamente la generación hidroeléctrica, también pone de manifiesto la necesidad de una rápida diversificación hacia fuentes de energía renovable no convencionales, particularmente la energía eólica y la solar fotovoltaica. El modelo indica que aumentar la participación combinada de la energía hidroeléctrica y las energías renovables entre el 50 % y el 70 % podría reducir significativamente las emisiones a un rango de 15.03 a 27.36 $MtCO_2$. Para apoyar esta transición, deberían introducirse subastas específicas para microredes y proyectos de almacenamiento de energía con el fin de garantizar la estabilidad del suministro sin depender de plantas térmicas de respaldo alimentadas con diésel o fueloil.

Rol de los autores

- **Flavio Arroyo-Morocho:** conceptualización, tratamiento de datos e investigación.
- **Dely Bravo-Donoso:** conceptualización, tratamiento de datos e investigación.
- **Abel Remache-Coyago:** conceptualización, análisis formal y curación de datos.
- **Tatiana Freire-Rosero:** visualización, escritura – revisión y edición.

Referencias

- [1] El Mundo. (2016, Jan.) Alerta mundial por la contaminación en las ciudades de todo el planeta. *ElMundo.es*. Accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r1>
- [2] International Energy Agency (IEA), “CO₂ emissions in 2023,” International Energy Agency, Paris, France, Tech. Rep., 2024, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r2>
- [3] P. K. Wesseh and B. Lin, “Energy consumption, fuel substitution, technical change, and economic growth: Implications for CO₂ mitigation in Egypt,” *Energy Policy*, vol. 117, pp. 340–347, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.022>
- [4] M. Mirzaei and M. Bekri, “Energy consumption and CO₂ emissions in Iran, 2025,” *Environmental Research*, vol. 154, pp. 345–351, Apr. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.023>
- [5] J. Emmerling, P. Andreoni, and M. Tavoni, “Global inequality consequences of climate policies when accounting for avoided climate impacts,” *Cell Reports Sustainability*, vol. 1, no. 1, p. 100008, Jan. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2023.100008>
- [6] S. Baik, J. F. Hines, and J. Sim, “Racial disparities in the energy burden beyond socioeconomic inequality,” *Energy Economics*, vol. 127, p. 107098, Nov. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107098>
- [7] M. K. Ardakani and S. M. Seyedaliakbar, “Impact of energy consumption and economic growth on CO₂ emission using multivariate regression,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 26, p. 100428, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100428>
- [8] F. Arroyo and L. J. Miguel, “Analysis of energy demand scenarios in Ecuador: National government policy perspectives and global trend to reduce CO₂ emissions,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 9, no. 2, Mar. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32479/ijeep.7132>
- [9] International Energy Agency (IEA), “Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028,” International Energy Agency, Paris, France, Tech. Rep., 2024, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r9>

- [10] Energy Institute, *Statistical Review of World Energy 2024*, 73rd ed. London, United Kingdom: Energy Institute, 2024, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r10>
- [11] BP, *bp Statistical Review of World Energy 2022*, 71st ed. Whitehouse Associates, London, Jun. 2022, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r73>
- [12] A. O. Acheampong and E. E. O. Opoku, "Environmental degradation and economic growth: Investigating linkages and potential pathways," *Energy Economics*, vol. 123, p. 106734, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106734>
- [13] F. R. Arroyo M. and L. J. Miguel, "The trends of the energy intensity and CO₂ emissions related to final energy consumption in Ecuador: Scenarios of national and worldwide strategies," *Sustainability*, vol. 12, no. 1, p. 20, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su12010020>
- [14] Q. Li, W. Zhang, H. Li, and P. He, "CO₂ emission trends of China's primary aluminum industry: A scenario analysis using system dynamics model," *Energy Policy*, vol. 105, pp. 225–235, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.046>
- [15] B. Muhammad, "Energy consumption, CO₂ emissions and economic growth in developed, emerging and Middle East and North Africa countries," *Energy*, vol. 179, pp. 232–245, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.126>
- [16] W. Xia, N. Apergis, M. F. Bashir, S. Ghosh, B. Doğan, and U. Shahzad, "Investigating the role of globalization, and energy consumption for environmental externalities: Empirical evidence from developed and developing economies," *Renewable Energy*, vol. 183, pp. 219–228, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.084>
- [17] M. A. González-Álvarez and A. Montañés, "CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth: Determining the stability of the 3E relationship," *Economic Modelling*, vol. 121, p. 106195, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2023.106195>
- [18] F. Ozturk, "Energy consumption–GDP causality in MENA countries," *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 12, no. 3, pp. 231–236, Mar. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15567249.2015.1072597>
- [19] E. Cifci and M. E. Oliver, "Reassessing the links between GHG emissions, economic growth, and the UNFCCC: A difference-in-differences approach," *Sustainability*, vol. 10, no. 2, p. 334, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su10020334>
- [20] K. Saidi and S. Hammami, "The impact of CO₂ emissions and economic growth on energy consumption in 58 countries," *Energy Reports*, vol. 1, pp. 62–70, Nov. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2015.01.003>
- [21] M. S. Shabbir, M. Shahbaz, and M. Zeshan, "Renewable and nonrenewable energy consumption, real GDP and CO₂ emissions nexus: A structural var approach in Pakistan," *Bulletin of Energy Economics (BEE)*, vol. 2, no. 3, pp. 91–105, 2014, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r21>
- [22] M. Sterpu, G. Soava, and A. Mehedintu, "Impact of economic growth and energy consumption on greenhouse gas emissions: Testing environmental curves hypotheses on EU countries," *Sustainability*, vol. 10, no. 9, p. 3327, 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/su10093327>
- [23] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), "La economía del cambio climático en el Ecuador, 2012," CEPAL, Santiago, Chile, Tech. Rep. LC/W.560, 2013, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r23>
- [24] A. R. López, "Carbon emissions, energy consumption and sustainable development in Ecuador (1980–2025): System dynamics modelling, decomposition analysis and the environmental kuznets curve," Doctoral thesis, Universidad de Huelva, Huelva, Spain, 2014, accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r24>
- [25] R. A. Begum, K. Sohag, S. M. S. Abdullah, and M. Jaafar, "CO₂ emissions, energy consumption, economic and population growth in Malaysia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 594–601, Jan. 2015. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.205>
- [26] L. J. Esso and Y. Keho, "Energy consumption, economic growth and carbon emissions: Cointegration and causality evidence from selected African countries," *Energy*, vol. 114, pp. 492–497, Nov. 2016. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.010>

- [27] J. C. Cárdenas Herrera, “Estudio de la reducción de emisiones de carbono en el Ecuador,” Master’s thesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014, Repositorio Digital EPN. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r27>
- [28] B. Lin, O. E. Omoju, and J. U. Okonkwo, “Impact of industrialisation on CO₂ emissions in Nigeria,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1228–1239, Dec. 2015. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.164>
- [29] G. Mavromatidis, K. Orehounig, P. Richner, and J. Carmeliet, “A strategy for reducing CO₂ emissions from buildings with the Kaya identity – a Swiss energy system analysis and a case study,” *Energy Policy*, vol. 88, pp. 343–354, Jan. 2016. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.10.037>
- [30] X. Chen, G. Wang, X. Guo, and J. Fu, “An analysis based on SD model for energy-related CO₂ mitigation in the Chinese household sector,” *Energies*, vol. 9, no. 12, p. 1062, Dec. 2016. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/en9121062>
- [31] A. Mardani, D. Streimikiene, F. Cavallaro, N. Loganathan, and M. Khoshnoudi, “Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017,” *Science of The Total Environment*, vol. 649, pp. 31–49, Feb. 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.229>
- [32] J. Zhou, B. Jin, S. Du, and P. Zhang, “Scenario analysis of carbon emissions of Beijing-Tianjin-Hebei,” *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1489, 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/en11061489>
- [33] R. Arango-Miranda, R. Hausler, R. Romero-López, M. Glaus, and S. P. Ibarra-Zavaleta, “Carbon dioxide emissions, energy consumption and economic growth: A comparative empirical study of selected developed and developing countries. “The role of exergy”,” *Energies*, vol. 11, no. 10, p. 2668, Oct. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.3390/en11102668>
- [34] N. Antonakakis, I. Chatziantoniou, and G. Filis, “Energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth: An ethical dilemma,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 808–824, Feb. 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.105>
- [35] F. M. Mirza and A. Kanwal, “Energy consumption, carbon emissions and economic growth in Pakistan: Dynamic causality analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 1233–1240, May 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.081>
- [36] A. Giri and G. Mohapatra, “Energy consumption, economic growth and CO₂ emissions: Empirical evidences from India,” *The Empirical Econometrics and Quantitative Economics*, vol. 4, pp. 17–32, 01 2015. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r36>
- [37] P. Stamatiou and N. Dritsakis, *Dynamic Modeling of Causal Relationship Between Energy Consumption, CO₂ Emissions, and Economic Growth in Italy*. Springer International Publishing, 2017, pp. 99–109. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48454-9_8
- [38] S. H. Kang, F. Islam, and A. Kumar Tiwari, “The dynamic relationships among CO₂ emissions, renewable and non-renewable energy sources, and economic growth in India: Evidence from time-varying bayesian VAR model,” *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 50, pp. 90–101, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2019.05.006>
- [39] P. R. Tayupanta Caiza, “Análisis del impacto de las políticas energéticas relacionadas con el cambio de la matriz energética del Ecuador en el período 2007–2014 y sus perspectivas al 2020,” Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2017, consultado: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r39>
- [40] M. Peláez-Samaniego, M. García-Pérez, L. Cortez, J. Oscullo, and G. Olmedo, “Energy sector in Ecuador: Current status,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 8, pp. 4177–4189, Aug. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.02.025>
- [41] B. Dyson and N.-B. Chang, “Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling,” *Waste Management*, vol. 25, no. 7, pp. 669–679, Jan. 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.10.005>
- [42] H. V. Coombs, “Case study research defined [White paper],” *Jurnal Kemanusiaan*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7604301>
- [43] R. K. Yin, *Case Study Research and Applications: Design and Methods*, 6th ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2018, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r43>
- [44] J. Derbyshire and G. Wright, “Augmenting the intuitive logics scenario planning method for

- a more comprehensive analysis of causation,” *International Journal of Forecasting*, vol. 33, no. 1, pp. 254–266, Jan. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2016.01.004>
- [45] D. Sarpong and J. A. Amoah, “Scenario planning: ‘ways of knowing’, methodologies and shifting conceptual landscape,” *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 10, no. 2/3/4, p. 75, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1504/ijfip.2015.074397>
- [46] H. J. Duus, “Strategic scenario construction made easy,” *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 11, no. 1/2/3, p. 167, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1504/IJFIP.2016.078349>
- [47] M. Amer, T. U. Daim, and A. Jetter, “A review of scenario planning,” *Futures*, vol. 46, pp. 23–40, Feb. 2013. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.futures.2012.10.003>
- [48] UN Environment, *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge University Press, May 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1017/9781108627146>
- [49] MCSE, “Agenda energética nacional 2016–2040,” Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2016, consultado: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r49>
- [50] —, “Balance energético nacional 2013,” Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2013, consultado: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r50>
- [51] —, “Balance energético nacional 2014,” Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2014, consultado: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r51>
- [52] Coordinating Ministry of Strategic Sectors, “National energy balance 2015,” Coordinating Ministry of Strategic Sectors, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2015, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r52>
- [53] MCSE, “Balance energético nacional 2016,” Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2016, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r53>
- [54] MICSE, “National energy balance 2017,” Coordinating Ministry of Strategic Sectors (MICSE), Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2017, referenced in peer-reviewed studies on Ecuadorian energy planning. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r54>
- [55] Ministry of Energy and Non-Renewable Natural Resources, “National energy balance 2017,” Ministry of Energy and Non-Renewable Natural Resources, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2018, referenced in peer-reviewed energy studies on Ecuador. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r55>
- [56] Minister of Electricity and Renewable Energy, “National energy efficiency plan 2016–2035,” Minister of Electricity and Renewable Energy, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2017, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r56>
- [57] MEER, “Plan maestro de electricidad 2016–2025,” Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2017, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r57>
- [58] CONELEC, “Plan maestro de electrificación 2013–2022,” National Electricity Council, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2013, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r58>
- [59] INER, “Analysis of r&d&i opportunities in energy efficiency and renewable energies in ecuador,” National Institute of Energy Efficiency and Renewable Energies, Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2016, referenced in national energy planning studies of Ecuador. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r59>
- [60] MAE, *Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador: ENCC 2012–2025*. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r60>
- [61] R. Gomelsky, “Sustainable energy for all: Rapid assessment Gap analysis Ecuador,” Ministry of Electricity and Renewable Energy (MEER), Quito, Ecuador, Tech. Rep., 2013, prepared within the Sustainable Energy for All (SE4ALL) initiative. Accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r61>
- [62] OER-LAC, “Renewable energy case of Ecuador,” Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Brasilia, Brazil, Tech. Rep., Aug. 2011, final Report, Accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r62>

- [63] IPCC, *Global Warming of 1.5°C*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r63>
- [64] C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, Q. Dahe, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, and P. M. Midgley, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r65>
- [65] O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, and J. C. Minx, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r66>
- [66] IRENA, “Renewable energy benefits: Measuring the economics,” International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, United Arab Emirates, Tech. Rep., Jan. 2016, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r67>
- [67] IEA, *Energy Efficiency*. OECD, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/9789264284234-en>
- [68] —, *World Energy Outlook*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Nov. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>
- [69] —, *Key World Energy Statistics*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/71b3ce84-en>
- [70] —, *World Energy Balances*. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/3a876031-en>
- [71] —, *World Energy Statistics*. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/2e828dea-en>
- [72] A. Azhaginiyal and G. Umadevi, “System dynamics simulation modeling of transport, energy and emissions interactions,” *Civil Engineering and Architecture*, vol. 2, no. 4, pp. 149–165, Apr. 2014. [Online]. Available: <http://doi.org/10.13189/cea.2014.020401>
- [73] A. Barisa and M. Rosa, “A system dynamics model for CO₂ emission mitigation policy design in road transport sector,” *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 419–427, Aug. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.112>
- [74] J. Lemke and M. Małgorzata, “Validation of system dynamics models – a case study,” *Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation*, vol. 9, no. 2, pp. 45–59, 2013. [Online]. Available: <http://doi.org/10.7341/2013923>
- [75] A. Maciąg, R. Pietroń, and S. Kukła, *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, 1st ed. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne (PWE), 2013, accessed: 2026-05-19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar5r77>
- [76] M. Martis, “Validation of simulation based models: A theoretical outlook,” *Electronic Journal of Business Research Methods*, vol. 4, 11 2006. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r78>
- [77] J. Sterman, *Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill Higher Education, 01 2000, vol. 19. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r79>
- [78] R. C. a. Shreckengost, “Dynamic simulation models: how valid are they?” *PsycEXTRA Dataset*, 1985. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1037/e496952006-007>
- [79] Y. Barlas and K. Kanar, “A dynamic pattern-oriented test for model validation,” *Boğaziçi University Research*, 01 1999. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r81>
- [80] J. D. Sterman, “All models are wrong: Reflections on becoming a systems scientist,” *System Dynamics Review*, vol. 18, no. 4, pp. 501–531, Dec. 2002. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1002/sdr.261>
- [81] —, *Feedback complexity in integrated climate-economy models*. Massachusetts Institute of Technology, 1997. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing36ar6r83>
- [82] L. Režný and V. Bureš, “Energy transition scenarios and their economic impacts in the extended neoclassical model of economic growth,” *Sustainability*, vol. 11, no. 13, p. 3644, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su11133644>

- [83] C. Zou, Q. Zhao, G. Zhang, and B. Xiong, "Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era," *Natural Gas Industry B*, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2016.02.001>
- [84] F. V. Bekun, M. P. Fumey, M. W. Staniewski, L. Sun, and P. O. Agboola, "Energy intensive growth and the transition pathways: Insights into the role of renewable energy and open market conditions in developing countries," *Energy*, vol. 322, p. 135192, May 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135192>
- [85] K. Abbass, N. Amin, F. Khan, H. Begum, and H. Song, "Driving sustainability: The nexus of financial development, economic globalization, and renewable energy in fostering a greener future," *Energy & Environment*, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0958305X241305374>
- [86] W. Zhao, X. Wang, and Y. Yan, "The substitution of fossil fuels for renewables in the electricity mix of China: From the perspectives of generation, capacity, and demand," *Energy*, vol. 315, p. 134364, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134364>
- [87] A. Barragán-Ocaña, E. Cecilio-Ayala, P. Silva-Borjas, J. A. Cortés-Ruiz, and E.-Y. Hernández-Cardona, "Policies and sustainable energy transition in the global environment: Challenges for Latin America," *Heliyon*, vol. 11, no. 6, p. e42295, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42295>
- [88] A. J. Calderón Márquez, B. Smyth, A. F. Simões, and M. P. da Cunha, "Designing inclusive energy transitions: Insights from latin america's electricity sector," *Societal Impacts*, vol. 6, p. 100153, Dec. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.socimp.2025.100153>
- [89] P. Chavda and D. Mehta, "Assessing the impact of fossil fuel subsidies and environmental tax on renewable energy consumption of OECD countries: A panel quantile approach," *Next Energy*, vol. 8, p. 100313, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100313>
- [90] K. Bayramoğlu, M. Bayraktar, A. Seyhan, and O. Yuksel, "Evaluation of techniques to reduce carbon emissions from ships within the scope of revised greenhouse gas emission targets for 2030, 2040, and 2050," *Ocean Engineering*, vol. 334, p. 121605, Aug. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121605>