

## INVENTARIO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO E IMPULSORES DE LA EMISIÓN DEL SECTOR DE ENERGÍA EN VENEZUELA

Greenhouse gas emissions inventory and emission drivers from the Venezuelan energy sector

Carlos MÉNDEZ-VALLEJO\*, Meimalin MORENO VILLALOBOS\*\*, Jhonattan BUENO, Abrahán QUINTANA, Carla CUBIDES, Noritza URDANETA ROZO, Oscar SIFONTES y Geglís ESPINOZA

Centro de Estudios de la Crisis Ambiental Global, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, km 11 Carretera Panamericana, Caracas 1020-A, Venezuela.

Autores para correspondencia: \*carlos.menvall@gmail.com; \*\*meimalinmoreno@gmail.com

*(Recibido: febrero de 2025; aceptado: junio de 2025)*

Palabras clave: identidad de Kaya, producto interno bruto, eficiencia energética, petróleo, gas natural.

### RESUMEN

Los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI) son cruciales para el diseño e implementación de medidas contra el cambio climático. En Venezuela, el sector de mayor emisión ha sido históricamente el energético; sin embargo, no se cuenta con una serie de tiempo amplia, pública y accesible que permita identificar los impulsores de dicha emisión. El objetivo de este trabajo es estimar las emisiones del sector energético de Venezuela, así como sus impulsores, en una serie temporal del periodo 1995-2021, siguiendo los lineamientos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, utilizando fuentes públicas y completando los datos faltantes mediante métodos estadísticos basados en datos complementarios. Las emisiones totales para el periodo 1995-2021 fluctuaron entre 168 559 y 502 600 Gg CO<sub>2</sub>eq/año debido a emisiones fugitivas y quema de combustibles fósiles, con el máximo de emisiones en 2014. Los mayores contribuyentes a las emisiones fueron las fugitivas provenientes de la producción de petróleo (40-80 %) y la quema de diésel y gasolina del transporte terrestre (8-27 %). El sector presentó una compleja interacción entre el crecimiento económico, el aumento de la población y las emisiones de GEI. La descomposición de Kaya reveló que la intensidad de emisión por energía es el impulsor más importante, mostrando la necesidad de establecer un plan de mitigación a la medida de las circunstancias nacionales venezolanas, que priorice el manejo de emisiones fugitivas de la producción petrolera y el aumento de la eficiencia del transporte terrestre, que son los principales impulsores de las emisiones actuales.

Key words: Kaya's identity, gross domestic product, energy efficiency, petroleum, natural gas.

### ABSTRACT

Greenhouse gas (GHG) inventories are crucial for the design and implementation of climate change measures. Historically, the sector with the highest emissions in Venezuela is the energy sector; however, there is no comprehensive, public, and accessible time series to identify the drivers of these emissions. The objective of this paper

is to estimate energy-sector emissions in Venezuela and their drivers in a time series for the period 1995-2021, following the Intergovernmental Panel on Climate Change guidelines, using public sources and filling in missing data with statistical methods based on complementary data. Total emissions for the period 1995-2021 ranged from 168 559 to 502 600 Gg CO<sub>2</sub>eq/yr due to fugitive emissions and combustion of fossil fuels, with maximum emissions in 2014. The largest contributors to emissions were fugitive emissions from oil production (40-80%) and diesel and gasoline burning from road transport (8-27%). The sector presented a complex interaction between economic growth, population growth, and GHG emissions. Kaya's decomposition showed that the emission intensity per unit of energy is the most important driver, underscoring the need for a mitigation plan tailored to Venezuela's national circumstances that prioritizes managing fugitive emissions from oil production and increasing energy efficiency.

## INTRODUCCIÓN

El inventario de emisiones de gases de efecto invernadero (IEGEI) es fundamental para las políticas de mitigación del cambio climático. Esto incluye el seguimiento y la cuantificación de las emisiones, así como el diseño y la planificación de medidas para reducirlas. Como parte de los esfuerzos mundiales para gestionar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) ha establecido un marco de transparencia reforzado. En virtud de ello, los países informan de sus emisiones y de las medidas que aplican o tienen previsto aplicar para reducirlas (CMNUCC 2015, 2019, 2022). Dicha información es presentada en diversos documentos entregados ante la CMNUCC, como las Comunicaciones Nacionales (CN), las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (CDN), los IEGEI y los Informes Bienales de Transparencia (IBT). El diseño, la presentación de informes y la aplicación de medidas se basan en los inventarios de GEI actualizados. Estos informes no sólo cumplen los compromisos de transparencia de las partes de la CMNUCC, sino que también funcionan como herramientas nacionales para el seguimiento, la planificación y la aplicación de respuestas al cambio climático.

La estimación de las emisiones y absorciones de GEI es un aspecto fundamental para el desarrollo de acciones frente al cambio climático. A pesar de ello, los datos necesarios para la elaboración de los IEGEI no siempre están disponibles ni accesibles. En muchos casos, los países en desarrollo con recursos humanos, financieros e institucionales limitados — como Venezuela— sólo disponen de métodos para estimar los datos faltantes en las series de tiempo de las emisiones, lo que resalta la importancia de los datos complementarios y las técnicas estadísticas

para subsanar las lagunas de información y realizar extrapolaciones (IPCC 2006, Cullen et al. 2024).

Los estudios de emisiones de GEI en países de América Latina no son frecuentes (Robalino-López et al. 2016, Asturias y Gil 2023, Belloc y Molina 2023, Seri y de Juan 2023, Peng et al. 2024) y regularmente no incluyen datos de Venezuela. En América Latina, Venezuela forma parte de los cinco países con más emisiones (Asturias y Gil 2023). El IEGEI oficial más reciente para el país fue publicado en 2017, con estimaciones de emisiones para el año 2010 (Méndez et al. 2017). Este formó parte de la segunda comunicación nacional sobre cambio climático (MINEA 2017). Dicho inventario establece que las emisiones territoriales totales de Venezuela fueron de  $240 \times 10^3$  Gg CO<sub>2</sub>eq para 2010, lo que representa el 0.49 % del total de emisiones globales de ese año. El sector con mayor contribución a las emisiones territoriales fue el energético, que aportó el 84 % del total. Históricamente, entre el 65 % y el 90 % de la energía eléctrica consumida en Venezuela es de origen hidroeléctrico; no obstante, la matriz energética total es predominantemente de origen fósil. Aunque Venezuela presenta una baja emisión territorial en relación con las emisiones globales (RBV 2017, 2021), ha establecido ambiciosos compromisos de mitigación ante la CMNUCC.

Las CDN formuladas por Venezuela establecen un objetivo de reducción de emisiones del 20 % para 2030, en relación con el escenario inercial con año base 2011 y de forma condicionada, es decir, dependiendo de la provisión de financiación, desarrollo de capacidades y transferencia de tecnología por parte de los países desarrollados en el marco de la CMNUCC (RBV 2017, 2021). Un compromiso de reducción de la magnitud propuesta en la CDN de Venezuela podría impactar fuertemente en su economía. Con una elevada emisión per cápita ( $8.44 \times 10^{-3}$  Gg CO<sub>2</sub>eq para el año 2010), debido principalmente a

la dependencia de su economía de la producción de combustibles fósiles (Mu y Hu 2018, Su et al. 2020, Maldonado y Olivo 2022), el sector de producción de energía fósil es el de mayores emisiones (Sánchez et al. 2005, Méndez et al. 2017) y tradicionalmente el que más aporta al producto interno bruto (PIB; BCV 1997, Mu y Hu 2018). Adicionalmente, Venezuela ha sido objeto recientemente de medidas coercitivas unilaterales (MCU; Mu y Hu 2018) que han reducido la capacidad de intercambio comercial con otros países y han afectado la producción de energía fósil; sin embargo, aún se desconoce el impacto de estas MCU en las emisiones del sector energético, así como en las acciones contra la crisis climática.

Existen varias metodologías y enfoques para estimar y medir las emisiones y absorciones de GEI, como las estimaciones por teledetección y las mediciones directas mediante la covarianza de Eddy (e.g., Bréon y Ciais 2009, Lee 2018). Aun así, la metodología más aceptada para los IEGEI es la publicada y actualizada periódicamente por el Grupo ad hoc sobre Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2006). Esta metodología estima las emisiones de forma sectorial, clasificándolas en los siguientes sectores: energía; procesos industriales y uso de productos (IPPU, por sus siglas en inglés); agricultura, silvicultura, ganadería y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés); y residuos.

Si bien el sector de energía es el de mayor aporte a las emisiones de GEI en Venezuela, el país no cuenta con un análisis de los impulsores de dicha emisión ni con una serie temporal de datos lo suficientemente larga como para realizar ese análisis, lo cual resulta en el diseño de medidas de mitigación con base en información escasa y alto nivel de incertidumbre. Este trabajo tiene por objetivo estimar las emisiones del sector de energía en Venezuela, así como sus principales impulsores, durante el periodo 1995-2021, utilizando las directrices del IPCC (2006), a partir de información oficial disponible públicamente y resolviendo los vacíos de datos mediante un método estadístico que utiliza datos complementarios oficiales disponibles internacionalmente.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Metodología del inventario

Se realizó el IEGEI del sector energía siguiendo la metodología recomendada por el IPCC en las Directrices de 2006 (IPCC 2006) para el nivel de inventario

1 (Tier 1), que comprende datos de actividad y factores de emisión por defecto (ecuación 1). Se eligió la metodología propuesta por las directrices del IPCC por tratarse del estándar más utilizado para realizar inventarios nacionales, así como la recomendada por la CMNUCC, lo que confiere transparencia, comparabilidad, exhaustividad, coherencia y exactitud a los resultados de este trabajo (IPCC 2006). Considerando la disponibilidad de los datos, se realizó el inventario de los GEI directos de primera categoría: dióxido de carbono, metano y óxido nitroso (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, respectivamente).

$$\text{emisión} = \text{actividad} \times \text{factor de emisión} \quad (1)$$

Se implementaron procedimientos generales para garantizar y controlar la calidad durante el desarrollo del IEGEI, con el fin de mejorar la transparencia, consistencia, comparabilidad, exhaustividad y exactitud de los estimados de emisión de GEI. En términos generales y siguiendo los lineamientos del IPCC, se verificó lo siguiente: 1) la consistencia y documentación de los supuestos, hipótesis y criterios de las estimaciones; 2) los errores de transcripción de los datos de actividad, factores de conversión, parámetros y valores de referencia, incluyendo los indicados por defecto; 3) los errores de cálculo; 4) el uso adecuado y pertinente de factores de conversión y emisión; y 5) la consistencia de los datos, especialmente en las etapas de integración de los subsectores y sectores a la base de datos general del IEGEI.

En específico, el examen de los datos de actividad y los cálculos de emisión y absorción de GEI, consistió en: 1) verificación de la consistencia en la validación cruzada con otra información estadística (como población, número de vehículos, indicadores económicos) de un origen diferente; 2) verificación de los cálculos de emisión/absorción por más de una persona y en las diferentes etapas del IEGEI; 3) verificación del orden de magnitud; y 4) evaluación de la consistencia de los datos de actividad en el contexto histórico de la actividad cuando se disponía de una serie histórica de datos.

### Fuentes de los datos

#### *Factores de emisión y potenciales de calentamiento*

Los factores de emisión utilizados fueron los propuestos por defecto por el IPCC y tomados de sus directrices (IPCC 2006) y de la base de datos de factores de emisión (IPCC 2023) (**Cuadro I**). Se utilizaron los potenciales de calentamiento global (PCG) que proporcionó el IPCC en su Quinto Informe de Evaluación (AR5, por su sigla en inglés)

**CUADRO I.** FACTORES DE EMISIÓN (kg/TJ) UTILIZADOS PARA ESTIMAR LAS EMISIONES POR CADA CATEGORÍA Y COMBUSTIBLE DEL SECTOR ENERGÉTICO DE VENEZUELA.

Categoría IPCC	Tipo de combustible	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
1A1b Refinación del petróleo	Gasolina para motores	69 300	3	0.6
1A1b Refinación del petróleo	Gas de refinería	57 600	1	0.1
1A1b Refinación del petróleo	Gasoil o diésel	74 100	3	0.6
1A1b Refinación del petróleo	Gasolina para motor a reacción	70 000	3	0.6
1A1b Refinación del petróleo	Otro queroseno	71 900	3	0.6
1B2 Petróleo y gas natural	Gas natural	NA	1	NA
1B2aii Quema en antorcha	Gas natural	56 100	1	0.1
1A2 Industrias manufactureras y de la construcción	Fuelóleo residual	77 400	3	0.6
1A2 Industrias manufactureras y de la construcción	Coque de petróleo	97 500	3	0.6
1A2 Industrias manufactureras y de la construcción	Gas natural	56 100	1	0.1
1A4 Otros sectores	Gas natural	56 100	5	0.1
1A4 Otros sectores	Gases licuados de petróleo	63 100	5	0.1
1A3d Navegación marítima y fluvial	Gasoil o diésel	74 100	7	2
1A3d Navegación marítima y fluvial	Fuelóleo residual	77 400	7	2
1A3d Navegación marítima y fluvial	Gasolina para motor	70 000	0.5	2
1A3a Aviación civil	Gasolina para motor a reacción	70 000	0.5	2
1A3a Aviación civil	Queroseno para motor a reacción	71 500	0.5	2
1A3b Transporte terrestre	Gasolina para motores	69 300	33	3.2
1A3b Transporte terrestre	Gasoil o diésel	74 100	3.9	3.9
1A1a Producción de electricidad y calor	Gas natural	56 100	1	0.1
1A1a Producción de electricidad y calor	Gasoil o diésel	74 100	3	0.6
1A1a Producción de electricidad y calor	Fuelóleo residual	77 400	3	0.6

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático; CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono; CH<sub>4</sub>: metano; N<sub>2</sub>O: óxido nítrico; NA: el factor de emisión no aplica para el gas en dicha categoría.

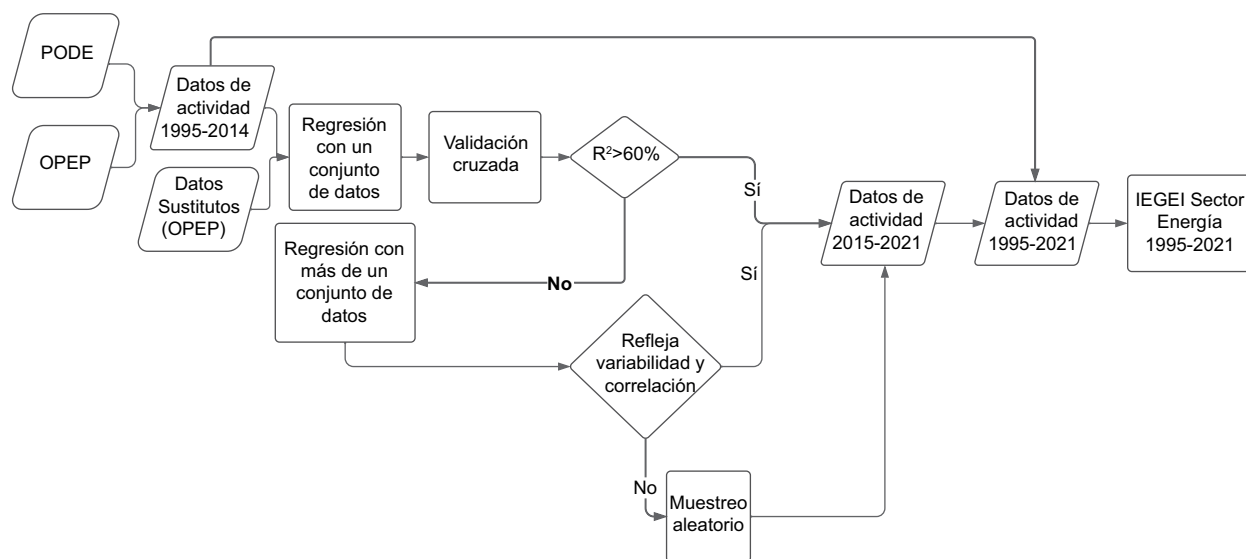
(IPCC 2013), basados en los efectos de los GEI en un horizonte temporal de 100 años.

### Datos de actividad

Dado que Venezuela no cuenta con una fuente pública del balance de energía nacional (BEN), los datos del sector de energía se obtuvieron del anuario Petróleo y otros datos estadísticos (PODE) publicado por el Ministerio del Poder Popular de Petróleo. La fecha más reciente de publicación del PODE es 2014, y los datos públicos del sector son escasos o inexistentes para años posteriores. Los datos de consumo de combustible fósil (líquidos, sólidos y gas) en los diferentes subsectores de la energía fueron obtenidos del PODE entre 1995 y 2014 (MPPPM 2000, 2010, 2012, 2014). En el caso del subsector de energía eléctrica se contó, además, con los datos del Anuario estadístico del sector eléctrico (MPPEE 2011, 2012, 2013, 2014, 2016, 2018). Para obtener los datos complementarios y los de verificación de consistencia y coherencia para el periodo 1995-2014 se accedió a los datos publicados en el Reporte anual y el Boletín anual de estadísticas de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP; OPEC

2001, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008, 2011, 2012a, 2012b, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019a, 2019b, 2020, 2021, 2022).

Los datos de actividad fueron completados de 2015 a 2021 siguiendo la metodología sugerida por Cullen et al. (2024), basada en el uso de datos sustitutos y métodos de aprendizaje de máquinas (**Fig. 1**). Los datos sustitutos vinculan emisiones o absorciones con actividades subyacentes u otros datos indicativos (IPCC 2006). Para ello se utilizaron los datos de producción de crudo y de combustibles, así como de producción y mercadeo de gas publicados en el boletín anual de estadísticas de la OPEP, utilizando un nivel 1 con un modelo superficial de uno o más conjuntos de datos sustitutos (Cullen et al. 2024). Se ensayó una regresión con validación cruzada repetida 100 veces (Hastie et al. 2009), utilizando como fuente la OPEP. Las métricas de desempeño del ajuste del modelo fueron el coeficiente de determinación ( $R^2$ , el cual varía de 0 a 1, siendo deseable 1), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE, la cual varía de 0 a infinito, siendo deseable 0) y el error absoluto medio (MAE, el cual varía de 0 a infinito, siendo deseable



**Fig. 1.** Diagrama de flujo que ilustra la metodología empleada para la estimación de datos faltantes. PODE: Anuario de Petróleo y Otros Datos Estadísticos; OPEP: datos publicados en el Reporte Anual y el Boletín Anual de Estadísticas de la Organización de Países Exportadores de Petróleo;  $R^2$ : coeficiente de determinación.

0). Mediante este método se probaron seis modelos linealizados (lineal simple, cuadrático, cúbico, logarítmico, exponencial y potencia) en forma similar a la metodología empleada por Zhang y Xu (2023).

En los casos en que el método de un solo conjunto de datos sustitutos resultó en  $R^2 < 0.60$ , se procedió a ajustar un modelo superficial de más de un conjunto de datos sustitutos, utilizando la metodología de bosque aleatorio, construido a partir de 1000 árboles de regresión (Breiman 2001, Hastie et al. 2009). En los casos en que los datos de actividad no mostraron suficiente variabilidad (valores constantes durante el periodo 1995-2014) y ninguna relación con los conjuntos de datos sustitutos, se realizó un muestreo aleatorio de los valores del periodo 1995-2014 para completar la serie temporal. El desempeño del proceso para completar los datos faltantes finalmente mostró un  $R^2 > 0.70$ , con valores de 0.73 a 0.99, excepto en los valores de actividad constantes a lo largo de la serie de tiempo.

Todos los procedimientos estadísticos y de análisis de datos se realizaron con el software R, v. 4.2.2 (R Foundation 2022). La rutina de bosques aleatorios se realizó con la librería random Forest (Liaw y Wiener 2022). Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles en Méndez-Vallejo et al. (2025), incluyendo el detalle de los factores de emisión utilizados, los datos de actividad extraídos de los documentos públicos y las constantes de transformación.

### Los impulsores de la emisión de GEI

La identidad de Kaya (Kaya et al. 1997) ha sido ampliamente utilizada para explorar los impulsores de la emisión de GEI (Tavakoli 2017) y desempeñó un papel significativo en la formulación de escenarios del IPCC durante el tercer y cuarto ciclo de evaluación (Nakicenovic et al. 2000). Según la identidad de Kaya, la emisión nacional de  $CO_2$  per cápita ( $CO_2pc$ ) puede ser descompuesta como el producto de tres componentes: producto interno bruto per cápita (PIBpc), intensidad energética o energía consumida por unidad de PIB ( $Eint$ ) e intensidad de emisiones de  $CO_2$  o  $CO_2eq$  emitido por unidad de energía consumida ( $CO_2int$ ; ecuación 2).

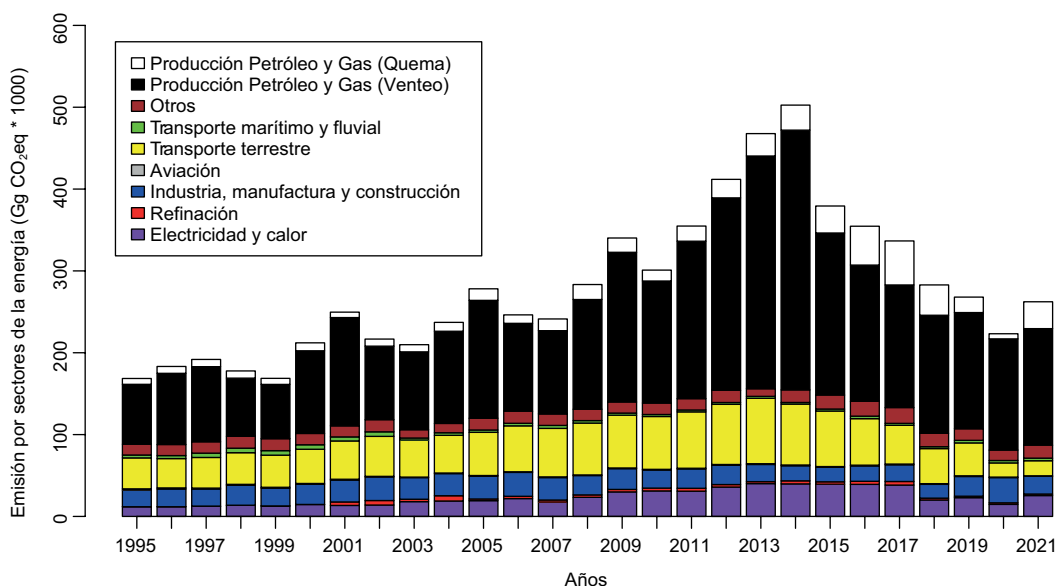
$$CO_2pc = PIBpc \times Eint \times CO_2int \quad (2)$$

Se utilizó la identidad de Kaya para analizar los impulsores de la emisión. Los datos de PIB fueron obtenidos de la base de datos del Fondo Monetario Internacional (IMF 2024), mientras que los datos de consumo de energía fueron obtenidos de Ritchie et al. (2022).

## RESULTADOS

### La emisión de GEI entre 1995 y 2021

Venezuela es un país cuyo ingreso económico está estrechamente relacionado con su emisión de GEI,



**Fig. 2.** Emisión de gases de efecto invernadero del sector energético de Venezuela, según lo aportado por cada subsector.

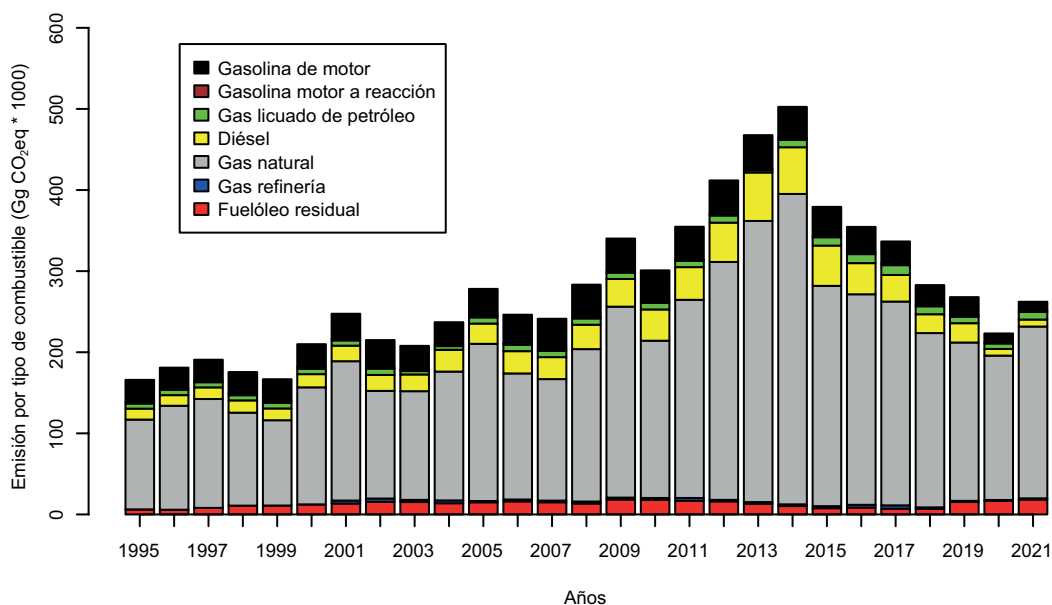
principalmente por su actividad petrolera y su uso de combustible fósil en el subsector transporte. Así, las emisiones totales del sector energía en la serie analizada crecieron cerca de tres veces desde 1995 hasta su máximo en 2014, luego de lo cual decayeron considerablemente para 2020, con un posterior incremento a valores medios en 2021 (**Fig. 2**). Las emisiones totales variaron de 168 559 a 502 600 Gg de CO<sub>2</sub>eq/año. La emisión fugitiva por producción de energía fósil (venteo y quema de gas natural) resultó la categoría que más aportó a la emisión a lo largo de la serie temporal analizada. Estas emisiones en conjunto constituyeron un 70 % del total durante el máximo de emisión de 2014, siendo el venteo en promedio el 88 % de la emisión fugitiva. Después de las emisiones fugitivas, la categoría de emisión más importante fue la del transporte terrestre y seguidamente la generación de electricidad. El transporte terrestre no superó el 27 % de la emisión total durante todo el periodo examinado, mostrando un aporte de alrededor del 20 % antes de 2013 y decayendo a alrededor de 15 %, con un mínimo histórico de 7 % durante el periodo 2020-2021. Una pequeña parte de la energía eléctrica es generada a partir de plantas termoeléctricas, que son responsables del 5 al 12 % de la emisión total, porcentajes muy similares a los de la categoría de industrias de la manufactura y la construcción, que fluctuaron entre el 3 y el 14 %.

En cuanto a los combustibles que generan más emisiones resalta el gas natural, que es venteado

o quemado en antorchas durante la producción de crudo, alcanzando entre el 40 y el 80 % (rango de 105 168 a 382 674 Gg CO<sub>2</sub>eq) de la emisión total (**Fig. 3**). Estas emisiones, que se originan durante la producción de petróleo, se incrementaron desde 1995 hasta su máximo en 2014 (más aceleradamente durante el periodo 2010-2014), disminuyeron rápidamente en el periodo 2014-2020 y finalmente se recuperaron en 2021. El segundo combustible productor de emisiones es el utilizado principalmente en el transporte terrestre (como diésel y gasolina), con 8 a 27 % de la emisión total (rango de 18 556-100 719 Gg CO<sub>2</sub>eq). A excepción del fuelóleo residual (2-8 % de la emisión total) y el gas licuado de petróleo (GLP) (0.5-4 % de la emisión total), utilizados generalmente en la generación de energía eléctrica para la propia industria petrolera y de refinación, los otros combustibles analizados (e.g., coque de petróleo, gasolina y queroseno para aviación) contribuyen con las emisiones en muy bajas cantidades en comparación con lo venteado o quemado para la producción petrolera o lo consumido por el sector transporte. Es el caso, por ejemplo, de los combustibles de aviación (gasolina y queroseno), que no superan el 4 % de la emisión a lo largo de la serie de tiempo.

### Los impulsores de la emisión

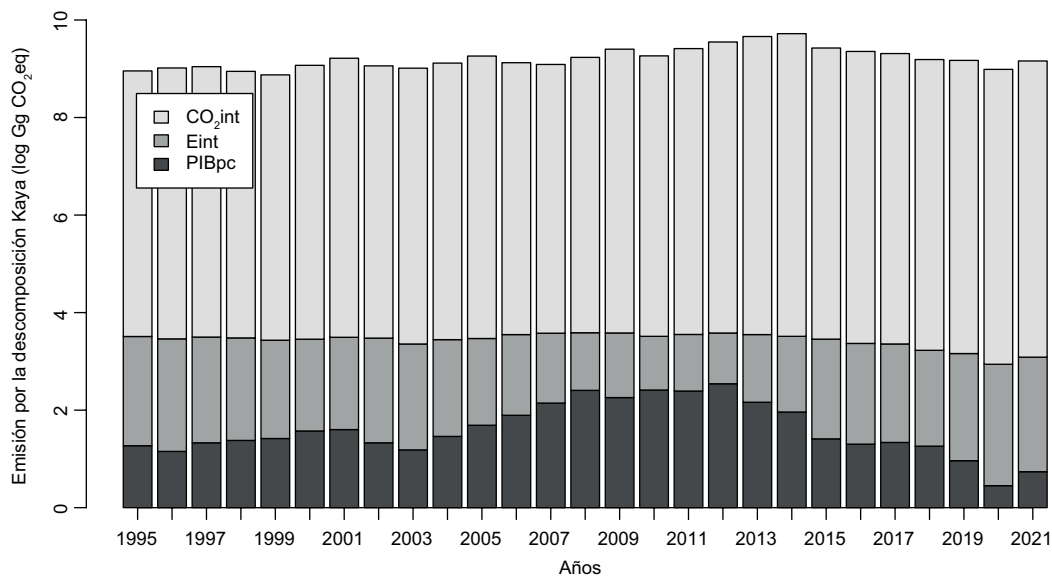
La emisión anual de gases de efecto invernadero per cápita (CO<sub>2</sub>pc) permaneció relativamente constante hasta 2010 con valores de 8 a 12 × 10<sup>-3</sup>



**Fig. 3.** Emisión de gases de efecto invernadero del sector energético de Venezuela, según lo aportado por cada tipo de combustible.

Gg CO<sub>2</sub>eq/año, para incrementarse posteriormente; alcanzó su máximo en 2014 con  $16 \times 10^{-3}$  Gg CO<sub>2</sub>eq/año, y posteriormente descendió nuevamente a niveles similares a los de años anteriores a 2010. La descomposición en los elementos de la igualdad de Kaya reveló que el impulsor más importante de la emisión per cápita es el CO<sub>2</sub>eq emitido por

unidad de energía consumida o la intensidad de emisión (CO<sub>2</sub>int), en tanto que el segundo impulsor en importancia fue la intensidad de energía (Eint), intercambiando lugar con el producto interno bruto per cápita (PIBpc) durante el periodo 2005-2014 (**Fig. 4**). El PIBpc estuvo altamente relacionado con la emisión per cápita (CO<sub>2</sub>pc). Sin embargo, no se



**Fig. 4.** Descomposición en los componentes Kaya de la emisión per cápita en Venezuela. CO<sub>2</sub>int: intensidad de emisiones de CO<sub>2</sub> o de CO<sub>2</sub>eq emitidas por unidad de energía consumida; Eint: intensidad energética o energía consumida por unidad de producto interno bruto; PIBpc: producto interno bruto per cápita.

observó coincidencia entre el máximo del PIBpc y el año de máxima emisión; por el contrario, después de 2012 se produjo un incremento tanto en la Eint como en la CO<sub>2</sub>int, las cuales sostuvieron la CO<sub>2</sub>pc. Así, el periodo 2014-2020 se caracterizó por una emisión del sector energía asociada a una baja del PIBpc, al tiempo que Eint y CO<sub>2</sub>int se incrementaron, lo que evidencia una disminución de la eficiencia económica y energética a partir de 2012.

## DISCUSIÓN

La serie de tiempo del IEGEI de Venezuela para el sector energético revela que tanto la producción de petróleo y gas como el sector transporte fueron las principales fuentes de emisión durante el periodo 1999-2021, con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>) como los principales gases contribuyentes. Este resultado es consistente con el inventario nacional venezolano de 2010 (Méndez et al. 2017), en el que se encontró, con base en las metodologías del IPCC, que las emisiones del sector energético fueron de aproximadamente  $200 \times 10^3$  Gg CO<sub>2</sub>eq, cuyo aporte principal fue el proveniente de las emisiones fugitivas del sector de petróleo y gas, y la quema de combustible del sector transporte. Además, el inventario nacional de 2010 estima las emisiones de metano en alrededor de  $3.5 \times 10^3$  Gg CH<sub>4</sub>, lo que puede considerarse una subestimación en comparación con el valor de  $5.3 \times 10^3$  Gg CH<sub>4</sub> encontrado en este estudio.

Las metodologías con enfoque de abajo hacia arriba, como las del IPCC, podrían subestimar significativamente las emisiones de metano procedentes de la explotación petrolera (Nathan et al. 2024), como en el caso de Venezuela. Las estimaciones por teledetección de Nathan et al. (2024) indican que las emisiones totales de metano podrían ser aproximadamente 1.6 veces superiores a las estimadas por métodos de enfoque de abajo hacia arriba, alcanzando unos  $7.5 \times 10^3$  Gg CH<sub>4</sub> (con un rango de  $5.7$  a  $9.3 \times 10^3$  Gg CH<sub>4</sub>) para 2019 en Venezuela. Es importante señalar que la metodología de teledetección no sólo considera las emisiones procedentes de la producción de petróleo, sino también las del ganado y de sistemas naturales como los humedales, lo que podría explicar en parte la diferencia entre los métodos con enfoque de abajo hacia arriba y los de sensores remotos. No obstante, los resultados de este estudio sobre la emisión de CH<sub>4</sub> coinciden con las estimaciones realizadas por teledetección (Lauvaux et al. 2022, Scarpelli et al. 2022, Nathan et al. 2024).

Aunque hasta el momento no existen estudios científicos sobre las causas de la alta emisión de gas natural durante la producción de petróleo venezolano, estas pueden ser diversas y abarcar desde infraestructura insuficiente u obsoleta hasta escasa regulación ambiental y control técnico, todas ellas interactuando entre sí y agudizadas por los efectos de las MCU. Históricamente, la explotación petrolera en Venezuela comienza a principios del siglo XX de la mano de compañías extranjeras inglesas y holandesas (Salazar-Carrillo 2004). Para aquel momento el gas natural no tenía gran valor y por tanto era considerado un subproducto que no era aprovechado, siendo reinyectado, liberado a la atmósfera o en todo caso quemado en antorcha. Desde entonces, esta especie de “filosofía de explotación” ha permanecido en las compañías de explotación del petróleo venezolano, tanto nacionales como extranjeras, por lo que no se cuenta con registro de inversión en la instalación o actualización de tecnología que permita el aprovechamiento del gas natural a la escala adecuada. Asimismo, las MCU impuestas a Venezuela después de 2014 han contribuido de manera importante a las barreras para la instalación o la actualización de tecnología que permita aprovechar el gas natural. Adicionalmente, las características pesadas y extra pesadas del petróleo venezolano, en especial de la Faja Petrolífera del Orinoco, requieren de mayor emisión de gas durante su extracción y manejo, llegando a quemarse un 85 % del gas asociado (WB 2022), a lo que se suman las características ácidas de dicho gas, que requiere de tecnología especializada para hacerlo aprovechable, lo cual implica costos adicionales en comparación con otros tipos de crudo.

El sector energético en Venezuela ha experimentado fluctuaciones en las emisiones debido a los cambios económicos y al impacto de la pandemia de COVID-19 en 2020. El patrón de crecimiento y disminución de las emisiones refleja las tendencias observadas en otros países de la región de América del Sur y el Caribe (Peng et al. 2024). Como señalan Peng et al. (2024), Venezuela, junto con Argentina, fue el segundo mayor emisor de GEI de la región durante el periodo 2010-2015, después de Brasil. A pesar de ello, en este trabajo se evidenció que las emisiones venezolanas disminuyeron paulatinamente luego de 2014 hasta alcanzar su mínimo durante 2020.

A escala mundial, el sector energético de Venezuela representó menos del 1 % de las emisiones mundiales totales durante el periodo estudiado (IPCC 2022). Su contribución a las emisiones globales alcanzó un máximo en el periodo 2012-2014,

principalmente debido a una mayor proporción de emisiones fugitivas durante ese tiempo. La producción de petróleo es una fuente importante de emisiones de metano en la atmósfera mundial, ya que los países productores de petróleo suelen notificar altos niveles de emisiones fugitivas (Lauvaux et al. 2022, Scarpelli et al. 2022). En Venezuela, el inventario preliminar de gases de efecto invernadero de 1990 indicaba que las emisiones fugitivas de la producción de energía representaban aproximadamente el 50 % de las emisiones totales (Perdomo et al. 1996). El inventario de la primera comunicación nacional, basado en 1999, mostraba que esta proporción aumentaba a cerca del 70 % (Sánchez et al. 2005), mientras que la segunda comunicación nacional situaba dicha contribución en torno al 40 % (Méndez et al. 2017). Estas cifras coinciden con los resultados aquí encontrados, que indican que las emisiones fugitivas pueden variar entre el 40 y el 80 %, dependiendo de la actividad económica y del tamaño de la población (**Fig. 4**).

El Informe Bienal de Transparencia de Venezuela del 2024 (RBV 2024) muestra una tendencia temporal de las emisiones del sector energía similar a la observada en este trabajo, pero con valores de emisión más bajos (los valores aquí encontrados son entre 2 y 2.5 veces mayores). En particular, Venezuela es el tercer país con mayor factor de emisión de metano por unidad de petróleo producido (Scarpelli et al. 2022), lo que explica los elevados niveles de emisiones fugitivas observados. Pese a ello, y debido a su producción de petróleo relativamente baja en comparación con otras naciones productoras, Venezuela no figura entre los países con mayores emisiones totales de metano a nivel global (Lauvaux et al. 2022).

Es conocido que las emisiones de GEI se relacionan directamente tanto con el crecimiento de la población como con el PIB, debido al aumento en la demanda de energía (Kaya et al. 1997). Esto destaca la necesidad de desvincular el crecimiento económico de las emisiones de gases de efecto invernadero (Freire-González et al. 2024, Gbadeyan et al. 2024). En Venezuela, la descomposición de Kaya reveló que el principal contribuyente a las emisiones del sector energético es la CO<sub>2</sub>int, que se refiere a las emisiones por unidad de energía consumida. Esta tendencia se alinea con el patrón global, en el cual aproximadamente el 50 % de las emisiones provienen de la generación de electricidad (IPCC 2022). Sin embargo, a diferencia de la combinación global de fuentes energéticas para la generación eléctrica, que está dominada por el uso de combustibles fósiles, la generación eléctrica de Venezuela se alimenta mayoritariamente de fuentes hidroeléctricas (70 y

90 % en el periodo estudiado) (MPPEE 2011, 2012, 2013, 2014, 2016, 2018). La dominancia de la CO<sub>2</sub>int como el mayor impulsor de las emisiones, a pesar del predominio de la energía hidroeléctrica, sugiere que la matriz energética total de Venezuela sigue dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles, siendo notables las emisiones del sector transporte como componentes de la CO<sub>2</sub>int. La CO<sub>2</sub>int suele ser alta en los países productores de petróleo (Masnadi et al. 2018). En el caso particular de Venezuela, la baja variabilidad mostrada en la CO<sub>2</sub>int a lo largo de la serie temporal podría estar determinada por factores como la falta de cambio de tecnología para la explotación y manejo del petróleo (como mantenimiento de una alta emisión fugitiva), así como la lenta transición energética hacia energías renovables a gran escala (como la movilidad eléctrica).

Estos resultados tienen implicaciones para el diseño del plan de mitigación de Venezuela. La tendencia mundial para lograr la mitigación de los gases de efecto invernadero se centra en estrategias de sustitución de combustibles fósiles y en el aumento de la eficiencia en la generación de electricidad. Siendo la matriz eléctrica de Venezuela principalmente hidroeléctrica, es poco lo que una estrategia de eficiencia de generación eléctrica aportaría a la mitigación, aunque podría significar importantes avances en materia de adaptación al cambio climático a través de la diversificación de la matriz eléctrica, dado el impacto de El Niño-Oscilación del Sur sobre la generación hidroeléctrica venezolana. Por otro lado, la estrategia de sustitución de combustible en el caso venezolano afectaría principalmente al sector de transporte, en especial el terrestre, cuyas emisiones son mucho menores (8-27 % de la emisión total) que las de producción de petróleo. Esto indica que las oportunidades de mitigación del sector energía en el caso venezolano no son similares a la tendencia de las estrategias globales, sino que en orden de prioridad deberían ser: 1) disminución de las emisiones fugitivas de la producción petrolera; 2) sustitución de combustibles fósiles para la movilidad; y 3) aumento de la eficiencia en la matriz eléctrica o la transición hacia energías renovables. Al mismo tiempo, y considerando el subsidio masivo que mantuvo los precios del combustible bajos hasta 2022 incentivando el consumo (CIEA 2013), y posteriormente el subsidio diferenciado, como las causas estructurales del alto consumo de combustible en Venezuela, así como las circunstancias sociales como el contrabando y la corrupción en la frontera (Mazuera-Arias et al. 2019), existen oportunidades de mitigación costo efectivas que solo comprenden el diseño y aplicación de políticas públicas y regulaciones específicas.

La Eint del sector energético en Venezuela mostró fluctuaciones significativas, estrechamente correlacionadas con los cambios en el PIBpc. En particular, antes de 2012, a medida que el PIBpc aumentó, la Eint disminuyó, lo que indica un paulatino incremento de la eficiencia en el uso de la energía en relación con la producción de riqueza. No obstante, después de 2012 la Eint aumentó de manera constante hasta 2021, lo que significó una disminución en la mencionada eficiencia concurrente con la disminución del PIBpc. Este resultado concuerda con lo informado en trabajos previos (Mu y Hu 2018, Su et al. 2020, Ritchie et al. 2022, IMF 2024). Varios factores podrían explicar la reciente disminución observada en la eficiencia energética. Uno de los principales factores ha sido la crisis energética, agravada por las MCU impuestas a Venezuela a partir de 2012. Las MCU han afectado significativamente a la economía venezolana, provocando una disminución del PIB y mermando la capacidad tanto del gobierno como de los ciudadanos para invertir en tecnologías bajas en carbono (Su et al. 2020). Esto ha afectado también a la generación hidroeléctrica, que en ocasiones ha sido sustituida por sistemas basados en combustibles fósiles. Al mismo tiempo, el cambio climático ha afectado directamente la generación de electricidad en el país debido a la intensificación de las sequías y al aumento de la frecuencia y la gravedad de los fenómenos climáticos de El Niño-Oscilación del Sur (Guenni et al. 2002). Asimismo, la fuerte dependencia de Venezuela de los precios del petróleo podría explicar en parte las fluctuaciones observadas en el PIBpc y la Eint (Mu y Hu 2018, Su et al. 2020). Estos factores ayudan a explicar la disminución del PIBpc junto con el aumento de la Eint observados en Venezuela desde 2012.

La hipótesis de la curva medioambiental de Kuznets propone que la proporcionalidad entre el PIBpc y la contaminación emitida durante la producción de dicho PIB varía de acuerdo con el grado de desarrollo de los países, siendo esta relación directamente proporcional en países menos desarrollados o en etapas preindustriales, e inversamente proporcional en países más desarrollados o en etapas postindustriales. En términos de la teoría del desarrollo económico, esto significa que el aumento en la producción de riqueza en países en desarrollo implica más contaminación, hasta el punto en que la innovación tecnológica lograda por la industrialización provoca que el aumento en producción de riqueza disminuya la contaminación ambiental, principio conocido como “crecer ahora, limpiar después” (Olivares y Hernández 2021).

En el caso venezolano, la Eint resulta de la combinación del uso de energía de origen fósil e hidroeléctrica, con predominio de la energía fósil, lo que la convierte en un indicador de contaminación durante la producción de riqueza. La relación entre Eint y PIBpc es negativa (**Fig. 4**); es decir, a medida que se produce más riqueza (PIBpc) la contaminación disminuye, por tanto, los resultados de este trabajo podrían situar a Venezuela en una fase postindustrial, evidenciando la influencia de la tecnología sobre la relación entre el impacto medioambiental y la producción de riqueza (Wang et al. 2024). Esta interpretación parece contradictoria, ya que Venezuela es una nación en desarrollo con una base industrial poco desarrollada, lo que sugiere que este fenómeno puede atribuirse más bien al desarrollo de los sectores petrolero y minero del país, como sugieren Asturias y Gil (2023). También es importante reconocer que, debido a la fuerte dependencia de Venezuela de la energía hidroeléctrica para la generación de electricidad, el indicador Eint debe interpretarse con cautela con relación a las emisiones de GEI, puesto que un aumento del consumo total de energía del país no conlleva necesariamente al incremento en las emisiones de GEI, lo que oscurece la relación típica encontrada por Freire-González et al. (2024) en su estudio global sobre la relación entre producción de riqueza y emisiones.

## CONCLUSIONES

Las emisiones de GEI del sector energético venezolano están impulsadas principalmente por la intensidad de emisión de CO<sub>2</sub>, que aumentó de manera constante a partir de 2012. Las emisiones fugitivas de gas natural también desempeñan un papel significativo, ya que representan hasta el 70 % de las emisiones totales del sector energético. El elevado factor de emisión de gas natural por unidad de petróleo producido sugiere que las emisiones fugitivas deben ser una categoría clave en la planificación de las acciones venezolanas frente al cambio climático. Para mitigar estas emisiones, es esencial desvincular el crecimiento económico de las emisiones de GEI y aplicar estrategias para aumentar la eficiencia energética. Además, considerando el predominio de la energía hidroeléctrica en Venezuela, los responsables políticos deben centrarse en mejorar la eficiencia energética tanto del sector petrolero como de los sectores del transporte y de la industria, así como en la diversificación de la matriz eléctrica nacional.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia y Tecnología de Venezuela por el financiamiento el proyecto “Emisiones de gases de efecto invernadero en Venezuela: un análisis multitemporal de las emisiones del sector energía” a través del Fondo Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (FONACIT), bajo el contrato núm. 133-2023. Agradecen también a los revisores por sus valiosas observaciones, a Julián Mostacero por sus recomendaciones en la preparación y procesamiento de los datos, y a Raquel Santos, Saida Lugo y Giovanni Colmenares por su apoyo logístico en las actividades interinstitucionales asociadas al proyecto.

## REFERENCIAS

- Asturias L.R. y Gil L.A. (2023). CO<sub>2</sub> emissions in Latin America: A time series perspective based on fractional integration. *Environmental Science and Pollution Research* 30 (50), 109585-109605. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29987-4>
- BCV (1997). Producto interno bruto por actividad económica (base 1997). Precios constantes. Base de datos del Banco Central de Venezuela [en línea]. [https://www.bcv.org.ve/estadisticas\\_cuentas\\_nacionales/estadisticas-de-cuentas-nacionales/series-historicas-pib/15/07/2024](https://www.bcv.org.ve/estadisticas_cuentas_nacionales/estadisticas-de-cuentas-nacionales/series-historicas-pib/15/07/2024)
- Belloc I. y Molina J.A. (2023). Are greenhouse gas emissions converging in Latin America? Implications for environmental policies. *Economic Analysis and Policy* 77, 337-356. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2022.11.022>
- Breiman L. (2001). Random forests. *Machine Learning* 45 (1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Bréon F.M. y Ciais P. (2009). Spaceborne remote sensing of greenhouse gas concentrations. *Comptes Rendus Géoscience* 342 (4-5), 412-424. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.09.012>
- CIEA (2013). Sobre el subsidio a la gasolina. Centro Internacional de Energía y Ambiente. Instituto de Estudios Superiores de Administración, Caracas, Venezuela, 2 pp.
- CMNUCC (2015). Acuerdo de París. T.I.A.S. No. 16-1104. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Bonn, Alemania, 29 pp.
- CMNUCC (2019). Informe de la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el Acuerdo de París sobre la tercera parte de su primer periodo de sesiones. celebrada en Katowice del 2 al 15 de diciembre de 2018. CCC/PA/CMA/2018/3/Add.2. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Bonn, Alemania, 73 pp.
- CMNUCC (2022). Manual de referencia sobre el marco de transparencia reforzado previsto en el Acuerdo de París. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Bonn, Alemania, 82 pp.
- Cullen L., Marinoni A. y Cullen J. (2024). Machine learning for gap-filling in greenhouse gas emissions databases. *Journal of Industrial Ecology* 28 (4), 636-647. <https://doi.org/10.1111/jiec.13507>
- Freire-González J., Padilla Rosa E. y Raymond J. L. (2024). World economies' progress in decoupling from CO<sub>2</sub> emissions. *Scientific Reports* 14 (1), 20480. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71101-2>
- Gbadeyan O. J., Muthivhi J., Langaniso L. Z. y Deenadayalu N. (2024). Decoupling economic growth from carbon emissions: A transition toward low-carbon energy systems—A critical review. *Clean Technologies* 6 (3), 1076-1113. <https://doi.org/10.3390/clean-technol6030054>
- Guenni L., Sansó B. y Betancourt L. (2002). Oceanic influence on the precipitation of the south-east of Venezuela. *Environmetrics* 13 (3), 263-279. <https://doi.org/10.1002/env.513>
- Hastie T., Tibshirani R. y Friedman J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. 2a ed. Springer, Nueva York, EUA, 745 pp. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- IMF (2024). IMF data mapper. International Monetary Fund [en línea]. <https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPD@WEO/VEN?zoom=VENyhighlight=VEN/18/07/2024>
- IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme [en línea]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/25/01/2024>
- IPCC (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 1535 pp.
- IPCC (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2029 pp.
- IPCC (2023). Emission factor database. Intergovernmental Panel on Climate Change [en línea]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php/22/02/2024>
- Kaya Y., Yokobori K. y Vereinte Nationen (Eds.). (1997). Environment, energy and economy: Strategies for sustainability. United Nations University Press, Tokio, Japón, 298 pp.

- Lauvaux T., Girón C., Mazzolini M., d'Aspremont A., Duren R., Cusworth D., Shindell D. y Ciais P. (2022). Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters. *Science* 375, 557-561. <https://doi.org/10.1126/science.abj4351>
- Lee X. (2018). *Fundamentals of boundary-layer meteorology*. Springer, Cham, Suiza, 256 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-60853-2>
- Liaw A. y Wiener M. (2022). Classification and regression by randomforest. *R News* 2 (3), 18-22.
- Maldonado L. y Olivo V. (2022). Is Venezuela still an upper-middle-income country? Estimating the GNI per capita for 2015-2021. *Inter-American Development Bank*, Washington, D.C., EUA, 28 pp. <https://doi.org/10.18235/0004612>
- Masnadi M.S., El-Houjeiri H., Schunack D., Li Y., Englander J., Badahdah A., Monfort J.C., Anderson J., Wallington T., Bergerson J., Gordon D., Koomey J., Przesmitzki S., Azevedo I., Bi X.T., Duffy J., Heath G., Keoleian G., McGlade C. y Brandt A.R. (2018). Global carbon intensity of crude oil production. *Science* 361 (6405), 851-853. <https://doi.org/10.1126/science.aar6859>
- Mazuera-Arias R., Albornoz-Arias N., Biasoli G. y Ortiz F.A. (2019). Corrupción y contrabando en la frontera norte de Santander (Colombia) y Táchira (Venezuela). *Revista de Ciencias Sociales* 25 (1), 170-186. <https://doi.org/10.31876/rcs.v25i1.29607>
- Méndez Vallejo C., Moreno M., Ramírez R., Borges P., Blanca J., Delgado F., Cabeza M., Masea T. y Catalán A. (2017). Inventario de gases efecto invernadero de la República Bolivariana de Venezuela. En: Segunda comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas, Caracas, Venezuela, pp. 133-179.
- Méndez-Vallejo C., Moreno M., Bueno J., Quintana A., Cubides C., Urdaneta N., Sifontes O. y Espinoza G. (2025). Datos de emisiones de GEI. *Harvard Dataverse*. <https://doi.org/10.7910/DVN/BMZSPA> 25/05/2025
- MINEA (2017). Segunda comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas, Caracas, Venezuela, 387 pp.
- MPPEE (2011). Anuario estadístico 2010 del sector eléctrico nacional. Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, Caracas, Venezuela, 47 pp.
- MPPEE (2012). Anuario estadístico 2011 del sistema eléctrico nacional. Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, Caracas, Venezuela, 61 pp.
- MPPEE (2013). Anuario estadístico 2013 del sector eléctrico nacional. Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, Caracas, Venezuela, 80 pp.
- MPPEE (2014). Anuario estadístico 2014 del sector eléctrico nacional. Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, Caracas, Venezuela, 121 pp.
- MPPEE (2016). Anuario estadístico 2015-2016 del sector eléctrico nacional. Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, Caracas, Venezuela, 230 pp.
- MPPEE (2018). Anuario estadístico 2017-2018 del sector eléctrico nacional. Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, Caracas, Venezuela, 187 pp.
- MPPPM (2000). *Petróleo y otros datos estadísticos*. Ministerio del Poder Popular de Petróleo y Minería, Caracas, Venezuela, 141 pp.
- MPPPM (2010). *Petróleo y otros datos estadísticos*. Ministerio del Poder Popular de Petróleo y Minería, Caracas, Venezuela, 223 pp.
- MPPPM (2012). *Petróleo y otros datos estadísticos*. Ministerio del Poder Popular de Petróleo y Minería, Caracas, Venezuela, 223 pp.
- MPPPM (2014). *Petróleo y otros datos estadísticos*. Ministerio del Poder Popular de Petróleo y Minería, Caracas, Venezuela, 212 pp.
- Mu X. Z. y Hu G.W. (2018). Analysis of Venezuela's oil-oriented economy: From the perspective of entropy. *Petroleum Science* 15 (1), 200-209. <https://doi.org/10.1007/s12182-018-0215-4>
- Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B.D., Fenhann J.V., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T.Y., Kram T., Rovere E.L.L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogne H-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N. y Dadi Z. (2000). *Special report on emissions scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 599 pp.
- Nathan B., Maasackers J.D., Naus S., Gautam R., Omara M., Varon D.J., Sulprizio M.P., Estrada L.A., Lorente A., Borsdorff T., Parker R.J. y Aben I. (2024). Assessing methane emissions from collapsing Venezuelan oil production using TROPOMI. *Atmospheric Chemistry and Physics* 24 (11), 6845-6863. <https://doi.org/10.5194/acp-24-6845-2024>
- Olivares J.A. y Hernández C. (2021). ¿La curva ambiental de Kuznets sigue siendo válida para explicar la degradación? Una revisión teórica. *Revista de Economía Coyuntural* 6 (3), 3-52.
- OPEC (2001). *OPEC annual report 2001*. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 63 pp.
- OPEC (2003). *OPEC annual report 2002*. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 51 pp.

- OPEC (2005). OPEC annual report 2004. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 79 pp.
- OPEC (2006). OPEC annual statistical bulletin 2006. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 144 pp.
- OPEC (2007). OPEC annual statistical bulletin 2007. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 112 pp.
- OPEC (2008). OPEC annual statistical bulletin 2008. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 150 pp.
- OPEC (2011). OPEC annual statistical bulletin 2010-2011. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 108 pp.
- OPEC (2012a). OPEC annual report 2011. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 57 pp.
- OPEC (2012b). OPEC annual statistical bulletin 2012. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 108 pp.
- OPEC (2013). OPEC annual statistical bulletin 2013. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 108 pp.
- OPEC (2014). OPEC annual report 2013. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 63 pp.
- OPEC (2015). OPEC annual statistical bulletin 2015. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 115 pp.
- OPEC (2016). OPEC annual statistical bulletin 2016. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 117 pp.
- OPEC (2017). OPEC annual statistical bulletin 2017. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 144 pp.
- OPEC (2018). OPEC annual statistical bulletin 2018. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 112 pp.
- OPEC (2019a). OPEC annual report 2018. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 128 pp.
- OPEC (2019b). OPEC annual statistical bulletin 2019. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 128 pp.
- OPEC (2020). OPEC annual statistical bulletin 2020. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 90 pp.
- OPEC (2021). OPEC annual statistical bulletin 2021. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 83 pp.
- OPEC (2022). OPEC annual report 2021. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Viena, Austria, 90 pp.
- Peng H., Kan S., Meng J., Li S., Cui C., Tan C., Wang Z., Wen Q. y Guan D. (2024). Emission accounting and drivers in South American countries. *Applied Energy* 358, 122528. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122528>
- Perdomo M., Pereira N., Bonduki Y. y Segnini A. M. (1996). Venezuelan greenhouse gas emissions inventory. En: *Greenhouse gas emission inventories interim results from the U.S. Country Studies Program* (Braatz B.V., Jallow B.P., Molnár S., Murdiyarsso D., Perdomo M., y Fitzgerald J.F., Eds.). Springer, Dordrecht, Países Bajos, pp. 327-345. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1722-9>
- R Foundation (2022). R: A language and environment for statistical computing (versión 4.2.2). R Foundation for Statistical Computing [en línea]. <https://www.R-project.org/01/11/2022>
- RBV (2017). Primera contribución nacionalmente determinada de la República Bolivariana de Venezuela para la lucha contra el cambio climático y sus efectos. República Bolivariana de Venezuela, Caracas, Venezuela, 40 pp.
- RBV (2021). Actualización de la contribución nacionalmente determinada de la República Bolivariana de Venezuela para la lucha contra el cambio climático y sus efectos. República Bolivariana de Venezuela, Caracas, Venezuela, 162 pp.
- RBV (2024). Primer informe bienal de transparencia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. República Bolivariana de Venezuela, Caracas, Venezuela, 315 pp.
- Ritchie H., Roser M. y Rosado P. (2022). Venezuela: Energy country profile. *Our World in Data* [en línea]. <https://ourworldindata.org/energy/country/venezuela19/07/2024>
- Robalino-López A., García-Ramos J. ., Golpe A.A. y Mena-Nieto A. (2016). CO<sub>2</sub> emissions convergence among 10 South American countries. A study of Kaya components (1980-2010). *Carbon Management* 7 (1-2), 1-12. <https://doi.org/10.1080/17583004.2016.1151502>
- Salazar-Carrillo J. (2004). Oil and development in Venezuela during the 20th century. eBook. Praeger, Westport, Connecticut, EUA, 281 pp. <https://doi.org/10.5040/9798400692796>
- Sánchez J.C., Manduca J., Di Doménico Á. y Muñoz T. (2005). Inventario general de emisiones de gases de efecto invernadero. En: *Primera comunicación nacional en cambio climático de Venezuela*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Caracas, Venezuela, pp. 23-50.
- Scarpelli T.R., Jacob D.J., Grossman S., Lu X., Qu Z., Sulprizio M.P., Zhang Y., Reuland F., Gordon D. y

- Worden J.R. (2022). Updated global fuel exploitation inventory (GFEI) for methane emissions from the oil, gas, and coal sectors: Evaluation with inversions of atmospheric methane observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22 (5), 3235-3249. <https://doi.org/10.5194/acp-22-3235-2022>
- Seri C. y de Juan Fernández A. (2023). CO<sub>2</sub> emissions and income growth in Latin America: Long-term patterns and determinants. *Environment, Development and Sustainability* 25 (5), 4491-4524. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02211-y>
- Su C.W., Khan K., Tao R. y Umar M. (2020). A review of resource curse burden on inflation in Venezuela. *Energy* 204, 117925. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117925>
- Tavakoli A. (2017). How precisely «Kaya Identity» can estimate GHG emissions: A global review. *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences* 8 (2), 91-96.
- Wang Q., Wang X., Li R. y Jiang X. (2024). Reinvestigating the environmental Kuznets curve (EKC) of carbon emissions and ecological footprint in 147 countries: A matter of trade protectionism. *Humanities and Social Sciences Communications* 11 (1), 160. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-02639-9>
- WB (2022). 2022 global gas flaring tracker report. World Bank, Washington, D.C., EUA, 22 pp.
- Zhang X. y Xu K. (2023). Statistical data-based prediction of carbon dioxide emission factors of China's power generation at carbon peak in 2030. *Case Studies in Thermal Engineering* 51, 103633. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103633>