

Emisiones GEI por Energía Estacionaria en Medellín (Colombia).

Evaluación según el Plan de Acción Climática

GHG Emissions from Stationary Energy in Medellín (Colombia).

Evaluation based on the Climate Action Plan

Emissões de GEE pela Energia Estacionária em Medellín (Colômbia).

Avaliação baseada no Plano de Ação Climática

Émissions de GES de l'Énergie Stationnaire à Medellín (Colombie).

Évaluation basée sur le Plan d'Action Climatique

Fuente: Autoría propia

Autores

Juan F. Gómez-Pérez

Grupo de Química Básica, Aplicada y Ambiente - Alquimia, Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas. Instituto Tecnológico Metropolitano
juangomez@itm.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-2736-2015>

Jorge Sebastián Muñoz-García

Departamento de Ciencias Ambientales y de la Construcción. Instituto Tecnológico Metropolitano
jorgemunoz299138@correo.itm.edu.co
<https://orcid.org/0009-0000-7832-6383>

Recibido: 18/09/2024
Aprobado: 23/09/2024

Cómo citar este artículo:

Gómez-Pérez, J. F. y Muñoz-García, J.S. (2024). Emisiones GEI por Energía Estacionaria en Medellín (Colombia). Evaluación según el Plan de Acción Climática. Bitácora Urbano Territorial, 34(III): XX-XX.

Resumen

Este trabajo evalúa el comportamiento de las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) de la ciudad de Medellín (Colombia) en el marco del primer corte de evaluación del Plan de Acción Climática (PAC) de la ciudad. Para ello, se propone una metodología de cálculo a partir de las bases de datos abiertas de la Superintendencia de Servicios Públicos de Colombia. Esta metodología es capaz de reproducir los resultados de los inventarios pasados del municipio de Medellín con un margen de error del 8%. A partir del modelo propuesto se evalúa la tendencia de cumplimiento de las metas de reducción de emisiones establecidas en el Plan de Acción Climático de Medellín. En el periodo estudiado hubo una reducción del consumo energético (electricidad, gas natural, gas licuado y carbón) del 13.6% y, como consecuencia, una reducción del 40.5% de emisiones entre el 2015 y el 2022. Finalmente, se presentan datos que demuestran la transformación del modelo de desarrollo económico de la ciudad, por el cual el sector terciario de la economía tiene un mayor peso porcentual y un 35% de reducción en el indicador de consumo energético (Wh/\$) por cada COP (base 2015) generado como valor agregado entre 2015 y 2019.

Palabras clave: cambio climático, planificación ambiental, consumo de energía

Autores

Juan F. Gómez-Pérez

Profesor asistente en el Departamento de Ciencias Ambientales y de la Construcción del Instituto Tecnológico Metropolitano. Ingeniero Ambiental y doctor en Ciencias Ambientales.

Jorge Sebastián Muñoz-García

Joven Investigador en el Departamento de Ciencias Ambientales y de la Construcción en el programa de Ciencias Ambientales.

Abstract

In this work, the greenhouse gas emissions from Medellín (Colombia) were evaluated according to the short-term goals of the city's Climate Action Plan. Here, a methodology based on the open databases of the Public Services Superintendent's office is proposed that reproduces the official GHG inventories with an 8% estimated error. This model was used to evaluate the progress toward the short-term goals of the Climate Action Plan of Medellín. Here, a 13.6% reduction in energy consumption (produced by electricity, natural gas, liquefied petroleum gas, and carbon) was registered in 2022 compared to 2015. Accordingly, it was a 40.5% emissions reduction in the same period. Finally, these results were contrasted to the evolution in the city's economic development stages. The tertiary sector is the main drive of economic development in the city, and it has improved by 35% to the reduction of energy consumption needed per COP (basis 2015) measured as an added value between 2015 and 2019.

Keywords: climate change, environmental management, energy consumption

Résumé

Ce travail évalue le comportement des émissions de gaz à effet de serre (GES) de la ville de Medellín (Colombie) dans le cadre de la première évaluation du Plan d'action climatique (PAC) de la ville. Pour cela, une méthodologie de calcul est proposée à partir des bases de données ouvertes de la Superintendance des services publics de Colombie. Cette méthodologie est capable de reproduire les résultats des inventaires passés de la municipalité de Medellín avec une marge d'erreur de 8%. À partir du modèle proposé, la tendance au respect des objectifs de réduction des émissions établis dans le Plan d'action climatique de Medellín est évaluée. Au cours de la période étudiée, il y a eu une réduction de 13.6% de la consommation énergétique (électricité, gaz naturel, gaz liquéfié et charbon) et, par conséquent, une réduction de 40.5% des émissions entre 2015 et 2022. Enfin, des données sont présentées qui démontrent la transformation du modèle de développement économique de la ville, dans lequel le secteur tertiaire de l'économie a un poids proportionnel plus important et une réduction de 35% de l'indicateur de consommation énergétique (Wh/\$) pour chaque COP (base 2015) généré en tant que valeur ajoutée entre 2015 et 2019.

Resumo

Este trabalho avalia o comportamento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) na cidade de Medellín (Colômbia) no âmbito da primeira avaliação do Plano de Ação Climática (PAC) da cidade. Para isso, propõe-se uma metodologia de cálculo a partir das bases de dados abertas da Superintendência de Serviços Públicos da Colômbia. Essa metodologia é capaz de reproduzir os resultados dos inventários anteriores do município de Medellín com uma margem de erro de 8%. A partir do modelo proposto, avalia-se a tendência de cumprimento das metas de redução de emissões estabelecidas no Plano de Ação Climática de Medellín. No período estudado, houve uma redução de 13.6% no consumo de energia (eletricidade, gás natural, gás liquefeito e carvão) e, como consequência, uma redução de 40.5% nas emissões entre 2015 e 2022. Finalmente, são apresentados dados que demonstram a transformação do modelo de desenvolvimento econômico da cidade, em que o setor terciário da economia tem um peso percentual maior e uma redução de 35% no indicador de consumo energético (Wh/\$) por cada COP (base 2015) gerado como valor agregado entre 2015 e 2019.

Palavras-chave: mudança climática, gestão ambiental, consumo de energia



Emisiones GEI por Energía Estacionaria en Medellín (Colombia)
Evaluación según el Plan de Acción Climática

Mots-clés : changement climatique, gestion de l'environnement, consommation d'énergie

Introducción

El empoderamiento social de las medidas de adaptación y mitigación ha estado relegado en términos de monitoreo y evaluación. En la región Andina, en particular, se han detectado vacíos de información sobre las estrategias locales y nacionales, lo que dificulta la evaluación de las políticas y el impacto de las acciones (Dupuits et al., 2023). Por ello, es necesario compartir el estado de avance de cumplimiento de las metas de reducción de emisiones que se enmarcan en políticas locales, nacionales e internacionales.

Colombia ratificó el Acuerdo de París ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático en 2018. En su primera Contribución Determinada a nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés), el país adquirió el compromiso de reducir un 20% sus emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) frente a la proyección para el 2030. En la actualización de la NDC del 2020, el país aumentó su meta de reducción de emisiones al 51% y se comprometió a lograr carbono neutralidad para los años 2030 y 2050, respectivamente (Gobierno de Colombia, 2020).

A nivel local, la ciudad de Medellín ha desarrollado un Plan de Acción Climática (PAC) para el periodo 2020-2050 (Alcaldía de Medellín, 2021b). El PAC recoge la información de los inventarios de emisiones interanuales realizados para cada uno de los municipios del área metropolitana del valle de Aburrá, entre los cuales se encuentra el municipio de Medellín (Alcaldía de Medellín, 2021a; WWF et al., 2021). El inventario más reciente fue publicado en 2021 e incluye la estimación de las emisiones anuales para el periodo 2016-2019 (WWF et al., 2021).

Los inventarios de emisiones de los municipios del área metropolitana del Valle de Aburrá se construyen utilizando el protocolo de inventarios para ciudades (MADS et al., 2021; World Resources Institute et al., 2021). Estos inventarios evalúan las emisiones y absorciones de GEI en cinco categorías: energía estacionaria, transporte, residuos, procesos industriales y uso de productos y agricultura, forestería y otros usos del suelo (AFOLU) (MADS et al., 2021). Este trabajo analiza el comportamiento de las emisiones asociadas al consumo de energía estacionaria según los tipos de fuentes de energía y las compara con las metas de reducción incluidas en el PAC de Medellín.

El último inventario de emisiones de GEI de Medellín, publicado en 2021, determina que las emisiones netas de la ciudad fueron 3'208,337, 2'928,770, 3'043,400 y 3'245,956 tCO₂eq para los años 2016, 2017, 2018 y 2019, respectivamente (WWF et al., 2021). El transporte fue la principal fuente de emisiones (49%), seguido del sector Energía Estacionaria (31%), Residuos (18%) y AFOLU (2%). En términos absolutos, la energía estacionaria representó un total de emisiones de 1'091,738, 1'159,304, 840,167, 884,184 y 983,912 tCO₂eq para los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019, respectivamente (Alcaldía de Medellín, 2021a).

En los inventarios de emisiones de GEI, las emisiones asociadas a la energía estacionaria se clasifican como de alcance 1 y 2. Las emisiones de alcance 1 se deben al consumo intencional de combustibles (gas natural, gas licuado de petróleo, carbón, entre otros) en viviendas y edificaciones para el funcionamiento de hornos, calderas, estufas, entre otros.

Las emisiones de alcance 2 provienen del uso de energía eléctrica y sus emisiones indirectas son determinadas por el factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN) (Alcaldía de Medellín, 2021a). Los factores de emisión del Sistema Interconectado Nacional y los combustibles disponibles en Colombia los recopila y reporta la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2016a). Este trabajo recoge los datos de la UPME y las bases de datos abiertas de la Superintendencia de Servicios Públicos (SUI) para calcular y evaluar el comportamiento de las emisiones asociadas al consumo de energía estacionaria en la ciudad de Medellín y compararlas con las metas de su PAC.

Las metas de reducción del PAC se establecen a partir del inventario denominado BASICO y contemplan tres escenarios: escenario existente o paneado, escenario ambicioso y escenario extendido. Sin embargo, en el PAC solo existen metas detalladas para los escenarios paneado y ambicioso, dejando el escenario extendido como una herramienta para evaluar la brecha existente entre la carbono-neutralidad de la ciudad y el nivel de reducciones esperadas con los acuerdos logrados con los diferentes actores de la ciudad.

Esto quiere decir que el cumplimiento de las metas a largo plazo para los escenarios ambicioso y paneado no permitirán alcanzar la carbono-neutralidad, y que quedarán emisiones residuales en el 2050 por valor de 1'641,778 tCO₂/año y 3'755,531 tCO₂/año para los escenarios ambicioso y paneado, respectivamente (Alcaldía de Medellín, 2021b). Por lo tanto, es necesario evaluar constantemente las emisiones de la ciudad para empoderar a las comunidades y ejercer control político en el cumplimiento de los objetivos.

La relación entre la emisión de CO₂ y las variables sociales y económicas como consumo energético, crecimiento económico y salud humana ha sido investigada recientemente Sin embargo, estas relaciones son complejas y necesitan ser analizadas para cada caso particular (Ota, 2017) two serious challenges (that is, rising income inequality and environmental degradation. Por ejemplo, los modelos de desarrollo económico y la intensidad de emisión de CO₂ son diferentes para los sectores primario, secundario y terciario y, por lo tanto, no se puede generalizar la relación entre degradación ambiental e ingreso per cápita sin contextualizar la matriz de producción de valor agregado local (Li et al., 2023).

Por el anterior motivo, entidades internacionales como la Agencia Internacional de Energía y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) utilizan indicadores de emisiones por unidad de valor agregado para sectores específicos de la economía. Adicionalmente,

Ben Jebli et al. (2020) presentan evidencia de cómo el nivel de desarrollo de un país, el crecimiento económico y la actividad industrial y de servicios se relacionan para explicar el nivel de emisiones de CO₂. Estos estudios sirven como una herramienta para la planeación de políticas de gestión urbana para la reducción de emisiones de CO₂ y la transición energética (Ben Jebli et al., 2020).

En el contexto latinoamericano, el cambio climático es una de las tres tendencias principales para la gestión urbana de los últimos 20 años: cambio climático, contaminación de recursos naturales y uso insostenible de recursos naturales. Se estima que en la región 192,000 hogares se ven afectados por desastres naturales potenciados por el calentamiento global (Siclari Bravo, 2017) que ha comenzado a discutirse en diversos espacios a distintos niveles, para sellar acuerdos durante la 3ª Conferencia sobre Desarrollo Sustentable y Vivien-da (HABITAT III. Paralelamente, es importante analizar los procesos de disponibilidad y consumo de energía eléctrica en las ciudades latinoamericanas, dado que se debe luchar contra la pobreza energética al mismo tiempo que invertir en adaptación y mitigación del cambio climático (Medina-Pérez et al., 2023) originado por fuentes de energía contaminantes y sus impactos en la atmósfera.

Métodos

Cálculo de Indicadores de Emisiones de CO₂ por Consumo de Energía

Este estudio se clasifica como un estudio cuantitativo, observacional y longitudinal en el cual se analiza en el tiempo una serie de variables para la ciudad de Medellín (Colombia) que se describen a continuación. Las emisiones asociadas al consumo de energía estacionaria se estiman mediante el uso de factores de emisión, los datos de consumo de electricidad tomada desde el Sistema Interconectado Nacional (SIN), y el consumo de combustibles fósiles: gas natural, gas licuado de petróleo y carbón (Rodríguez et al., 2020). Este trabajo no incluye análisis del consumo de leña.

La información secundaria se obtiene de las bases de datos públicas disponibles en el Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios de Colombia, entidad con funciones de inspección, vigilancia y control sobre las entidades y empresas prestadoras de servicios públicos de acueducto, alcantarillado, aseo, energía y gas. Los factores de emisión de los combustibles y del SIN de Colombia son publicados por la UPME. El factor de emisión del SIN es actualizado anualmente y es utilizado para el cálculo de las emisiones asociadas al consumo de energía eléctrica.

En este trabajo se calculan las emisiones a partir del Factor de Emisión para inventarios publicado por la UPME, utilizando la ecuación

donde E_{EE} : emisión anual de CO₂ asociadas al consumo de energía eléctrica (tCO₂/año)

C_{EE} : consumo energía eléctrica del SIN (kWh/año)

FE_{EE} : factor de emisión del año correspondiente (kgCO₂/kWh)

Las emisiones asociadas al consumo de gas natural (GN) se calculan utilizando el reporte de consumo en SUI y los factores de emisión de los combustibles colombianos (FECOC) (UPME, 2016a). La información de consumo está discriminada por sectores residencial, industrial, comercial y otros, y se reporta anualizada. El cálculo de emisión para inventario se realiza con la ecuación

donde E_{GN} : emisión anual de CO₂ asociada al consumo de GN (tCO₂/año)

PCI_{GN} : poder Calorífico Inferior GN (35.65 MJ/m³) (UPME, 2016a)

C_{GN} : consumo anual GN (m³/año)

FE_{GN} : factor de emisión del GN genérico colombiano (55,539.09 kgCO₂/TJ) (UPME, 2016a)

Para el cálculo de las emisiones asociadas al consumo de Gas Licuado de Petróleo (GLP) se utiliza la ecuación

donde E_{GLP} : emisión anual de CO₂ asociadas al consumo de GLP (tCO₂/año)

PCI_{GLP} : poder Calorífico Inferior GLP (45.4145 MJ/m³) (UPME, 2016a)

C_{GLP} : consumo anual GLP (kg/año)

FE_{GLP} : factor de emisión del Gas Licuado de Petróleo (67,185.12 kgCO₂/TJ) (UPME, 2016a)

Para el cálculo de las emisiones asociadas con el consumo de carbón se utiliza la ecuación

donde E_{GLP} : emisión anual de CO₂ asociadas al consumo de GLP (tCO₂/año)

PCI_{GLP} : poder Calorífico Inferior Carbón (24.405 MJ/kg) (UPME, 2016a)

C_C : consumo anual carbón (kg/año)

FE_C : factor de emisión del Carbón (93,317.31 kgCO₂/TJ) (UPME, 2016a)

Cálculo de Indicadores por Unidad de Valor Agregado

Los datos estadísticos económicos de Medellín utilizados en este estudio son los últimos publicados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (DANE, 2023a, 2023b). Específicamente, el indicador de Valor Agregado es analizado para el municipio de Medellín entre el periodo 2011 y 2021 por ser de esas fechas los datos oficiales más recientes disponibles, estar discriminados por sectores productivos y tener datos estandarizados a escala municipal. El Valor Agregado es igual a la diferencia entre producción y consumo intermedio. La relación con el Producto Interno Bruto está dada por la ecuación PIB = Valor Agregado + derechos e impuestos al producto o por importaciones.

Discusión

El uso del modelo descrito en la sección de métodos permite el cálculo de las emisiones de alcance 1 debidas al consumo interno de combustibles en fuentes estacionarias, y las emisiones de alcance 2 asociadas al consumo de energía eléctrica. La comparación entre el modelo de cálculo descrito en este trabajo y los resultados del inventario de emisiones de GEI oficial se presenta en la Tabla 1. En promedio hay un error estimado del 8% entre ambas metodologías, pero ambos modelos reproducen el mismo comportamiento interanual de las emisiones.

Año	Inventario BASICO (tCO ₂ /año)	Este Trabajo (tCO ₂ /año)
2015	1'091,738	1'148,915
2016	1'159,304	1'055,804
2017	840,167	722,330
2018	884,184	798,150
2019	983,912	908,245

Tabla 1. Comparativo de inventarios de gases de efecto invernadero en Medellín 2015-2019
Fuente: Elaboración propia.

Variabes como el consumo de energía y las emisiones de una ciudad dependen de la población, la cultura y la eficiencia de la tecnología instalada en el territorio, entre otros aspectos. La alcaldía de Medellín tiene datos censales hasta el 2020 y proyecciones demográficas hasta el

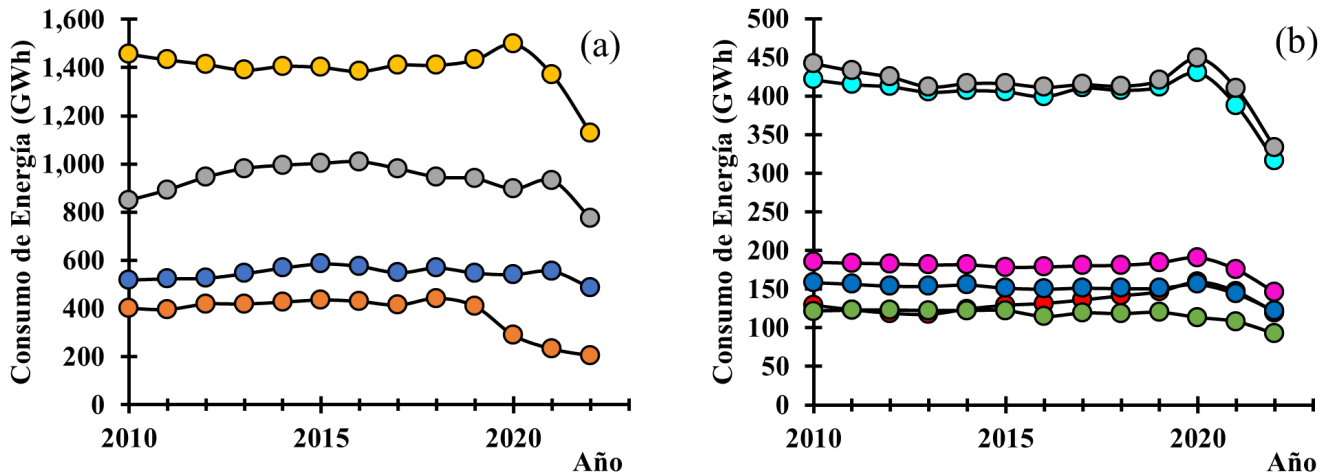


Figura 1. (a) Consumo de energía para los sectores: residencial (amarillo), comercial (gris), industrial (azul) e institucional (naranja). (b) Consumo de energía en el sector residencia para los estratos socioeconómicos 1 (rojo), 2 (gris), 3 (cian), 4 (magenta), 5 (azul) y 6 (verde)

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2023).

2030 elaboradas a partir de los datos históricos del Departamento Nacional de Estadística (DANE & Alcaldía de Medellín, 2011). Entre 2015 y 2022, la población de Medellín ha aumentado en 150 mil habitantes, pasando de 2'464,322 a 2'617,770. Sin embargo, los datos revelan una ralentización del crecimiento poblacional que se puede explicar por las bajas tasas globales de fecundidad. Desde el 2004, Medellín reporta nacimientos inferiores a 1.9 hijos por mujer, llegando incluso a tasas inferiores a las de reemplazo con valores entre 1.5 o 1.4 hijos por mujer durante los últimos trece años (Medellín Cómo Vamos, 2022). Pese a lo anterior, el crecimiento poblacional supone una mayor demanda energética, por lo que a continuación es analizado el comportamiento de la demanda energética en Medellín.

Primero, para el análisis del consumo de energía eléctrica se categoriza el consumo total entre los siguientes usos: residencial, comercial, industrial e institucional. El uso residencial se encuentra dividido por seis estratos socioeconómicos según el nivel de ingresos y la dotación urbana en algún sector de la ciudad. Un análisis detallado de los datos del SUI demuestra que en términos absolutos todos los estratos socioeconómicos presentan una reducción del consumo eléctrico desde el 2020, y dicha tendencia es mucho mayor en el caso de los estratos 2 y 3 (ver Figura 1). Por otra parte, el consumo eléctrico industrial se caracteriza por una relativa estabilidad, en contraste con los usos residencial, comercial e institucional que presentan una clara disminución (ver Figura 1a). Comparativamente, los sectores residencial e institucional presentan la mayor reducción en el consumo de energía eléctrica.

En comparación con el año de referencia de los objetivos del Plan de Acción Climática, el 2022 presenta una disminución del 24.3% del consumo de energía eléctrica. Según los datos consolidados de consumo eléctrico para los años 2015 (3,423.13 GWh) y 2022 (2,592.15 GWh), hay una reducción de 831 GWh en el consumo de energía eléctrica según los datos del SUI (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2023). Para determinar el impacto que tiene la reducción del consumo eléctrico en las emisiones de gases efecto invernadero es necesario analizar el comportamiento del factor de emisión del SIN.

La UPME publica anualmente los factores de emisión del SIN, generalmente 11 meses después de cerrado año. El SIN suministra el 98% de la electricidad consumida en el país a partir de una matriz de generación altamente dependiente de la generación hidráulica. Esta condición genera una fuerte dependencia entre el factor de emisión del SIN y la variación climática (IDEAM et al., 2022). Por ejemplo, fenómenos climáticos como El Niño-La Niña (ENSO) afectan la precipitación y, en el caso de sequías prolongadas, implican una mayor participación de la generación termoeléctrica con el consecuente aumento de los factores de emisión.

La Tabla 2 demuestra la variabilidad del factor de emisión del SIN en Colombia. Por ejemplo, los factores de emisión del SIN reportados por la UPME para los años 2015 y 2022 son 0.23 kgCO₂/kWh y 0.112 kgCO₂/kWh, respectivamente (UPME, 2016b). Esto representa una reducción del 51.1% del factor de emisión del SIN con relación al año de referencia del Plan de Acción Climática de la

Año	Factor de Emisión (kgCO ₂ eq/kWh)	Emisión (tCO ₂ eq/año)	Referencia FE
2015	0.23	787,313	(UPME, 2016b)
2016	0.21	713,307	(UPME, 2017)
2017	0.11	368,654	(UPME, 2018)
2018	0.13	437,515	(UPME, 2019)
2019	0.166	552,033	(UPME et al., 2020)
2020	0.203	654,390	(UPME et al., 2021)
2021	0.126	389,025	(UPME et al., 2022)
2022	0.112	291,301	(UPME, 2023)

Tabla 2. Emisiones asociadas al consumo de energía eléctrica de los sectores residencial, comercial, institucional e industrial

Fuente: Elaboración propia.

ciudad de Medellín. Sin embargo, esto se debe a situaciones climáticas de escala planetaria y, por lo tanto, los resultados no dependen de la gestión municipal.

A partir de los datos de consumo energético y los factores de emisión anuales es calculada la variación en las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de energía eléctrica. En conclusión, las emisiones por energía eléctrica tienen una reducción del 63.0% en relación con la línea base del 2015. Aunque este es un resultado muy positivo, hay que resaltar que la alta variabilidad del factor de emisión puede suponer cambios futuros que no necesariamente favorezcan la reducción de emisiones. Por ejemplo, en un escenario de fenómeno del niño con un periodo extendido de sequía se produciría una mayor participación de la energía térmica en el mercado eléctrico nacional y, por ende, un mayor nivel de emisiones.

Para el cálculo de emisiones asociadas con el consumo de gas natural en la ciudad de Medellín, se tomaron los datos del SUI correspondientes al consumo de gas natural para todos los sectores allí registrados (residencia, industrial, oficial y otros). Según la UPME, el gas genérico usado en Colombia tiene un poder calorífico inferior (LHV) de 35.65 MJ/m³ y un factor de emisión de 55,539.1 kgCO₂/TJ (UPME, 2016a). A partir de estos datos, se calculan el consumo energético y las emisiones asociadas al consumo de gas natural en la ciudad de Medellín.

En términos absolutos, el consumo de gas natural en la ciudad de Medellín aumentó desde 126.0 Mm³ (1,247.60 GWh) en el 2015 hasta 152.1 Mm³ (1,506.64 GWh) en 2022. Esto representa un incremento del 20.8% en términos de consumo y sus emisiones asociadas. Las emisiones equivalentes a estos niveles de consumo corresponden a 249,445.2 y 301,238.8 tCO₂/año para el 2015 y 2022, respectivamente. El sector residencial presentó el mayor incremento (23.9%) seguido del sector industrial (17.6%) (ver Figura 2a). Estas cifras demuestran una sustitución de las fuentes de energía principalmente en los hogares, donde

el incremento de la red de gas domiciliar ha reducido el consumo de energía eléctrica y gas licuado de petróleo, al tiempo que ha aumentado el consumo de gas natural.

En la ciudad de Medellín también hay un consumo significativo de gas licuado de petróleo (GLP). Según los registros del SUI, el consumo de GLP presenta una disminución significativa en la ventana de observación de este trabajo (2010-2023), pero ha tenido una relativa estabilidad desde el 2017 en consumos inferiores a 20,000 t/año. En el 2022 se registra una disminución en la demanda de GLP del 33.8% con relación al consumo del 2015.

Para el cálculo de las emisiones asociadas al consumo de GLP son utilizados los datos del GLP genérico para los combustibles colombianos reportados por la UPME. El factor de emisión y el poder calorífico inferior (LHV) para el GLP genérico son 67,185.12 kgCO₂/TJ y 45.4145 MJ/kg, respectivamente (UPME, 2016a). En conclusión, las emisiones asociadas al consumo de GLP en los años 2015 y 2022 son 74,575 y 49,343 tCO₂, respectivamente. Estos datos son congruentes con el análisis de gas natural, donde se ve que la red domiciliar ha sustituido otras fuentes energéticas.

Adicionalmente, el consumo de carbón en la ciudad de Medellín es suministrado por la autoridad ambiental local (Área Metropolitana del Valle de Aburrá), dado que este indicador no se encuentra registrado en la plataforma SUI. El consumo ha tenido un crecimiento relativamente constante durante los últimos cinco años, después de haber tenido una reducción significativa desde el 2010 (20,736 t) al 2018 (14,744 t). Este comportamiento evidencia un retroceso en la sustitución de este tipo de combustibles por otros como el gas natural, lo que tiene impacto en la emisión de GEI y el deterioro de la calidad del aire por otros parámetros como el material particulado.

Finalmente, los resultados del cálculo de emisiones y del consumo de energía eléctrica, gas natural, gas licuado

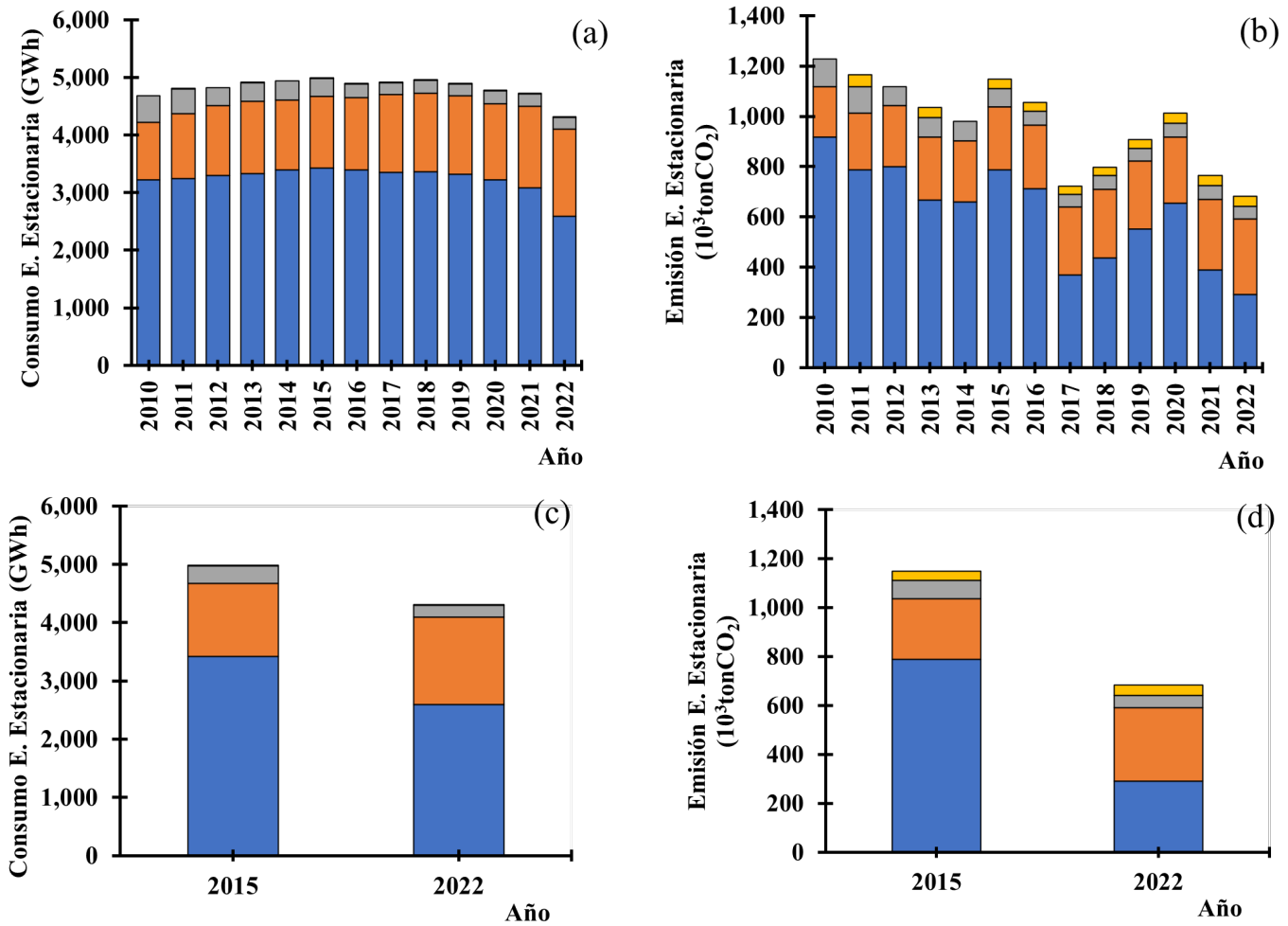


Figura 2. Evaluación de la Energía Estacionaria interanual de Medellín por fuente de energía (azul: electricidad, naranja: gas natural genérico, gris: gas licuado del petróleo, amarillo: carbón). (a) Consumo de energía estacionaria. (b) Estimación de las emisiones asociadas al consumo de energía estacionaria. (c) Comparativo del consumo de energía estacionaria 2015-2022. (d) Comparativo de la emisión asociada al consumo de energía estacionaria con relación al año de referencia 2015-2022

Fuente: Elaboración propia.

de petróleo y carbón se resumen en la Figura 2. Como se puede observar en la Figura 2b, las emisiones asociadas a las fuentes de energía estacionaria fluctúan significativamente con base en el factor de emisión del SIN. En general, para el 2022 con relación al 2015 hay reducciones del consumo de energía y sus emisiones asociadas del 13.6% y 40.5%, respectivamente. En términos per cápita, el consumo de energía estacionaria en la ciudad ha pasado de 2.02 MWh/habitante/año en 2015 a 1.64 MWh/habitante/año en 2022, y en términos de emisiones pasó de 0.47 a 0.26 tCO₂/habitante/año en 2022. En estos valores es significativo resaltar el cambio en el consumo con una reducción del 18.8%, dado que esta disminución no está tan fuertemente influenciada por el clima como por las condiciones socioeconómicas de la ciudad y, por lo tanto, sería un mejor criterio de comparación que las emisiones.

En términos absolutos, la reducción de emisiones al final del 2022 es de 464,830 tCO₂, en comparación con el año 2015 de referencia. Este nivel de reducción permitiría dar cumplimiento a las metas de corto plazo para el escenario paneado (meta 2023, escenario paneado: 355,455 tCO₂), pero sería insuficiente para dar cumplimiento a la meta del escenario ambicioso (meta 2023, escenario ambicioso: 577,401 tCO₂). Sin embargo, en la actualidad el fenómeno del Niño incentiva una mayor participación de las fuentes de generación térmicas y, por lo tanto, un mayor factor de emisión para el SIN que será publicado a finales de 2024.

En este escenario, las emisiones per cápita podrían experimentar cambios significativos que manifiesten la transformación de relaciones entre las variables (i.e. clima, desarrollo económico, tecnológico, político, etc.) (Chen & Lee, 2007) y el consumo de energía; como con-

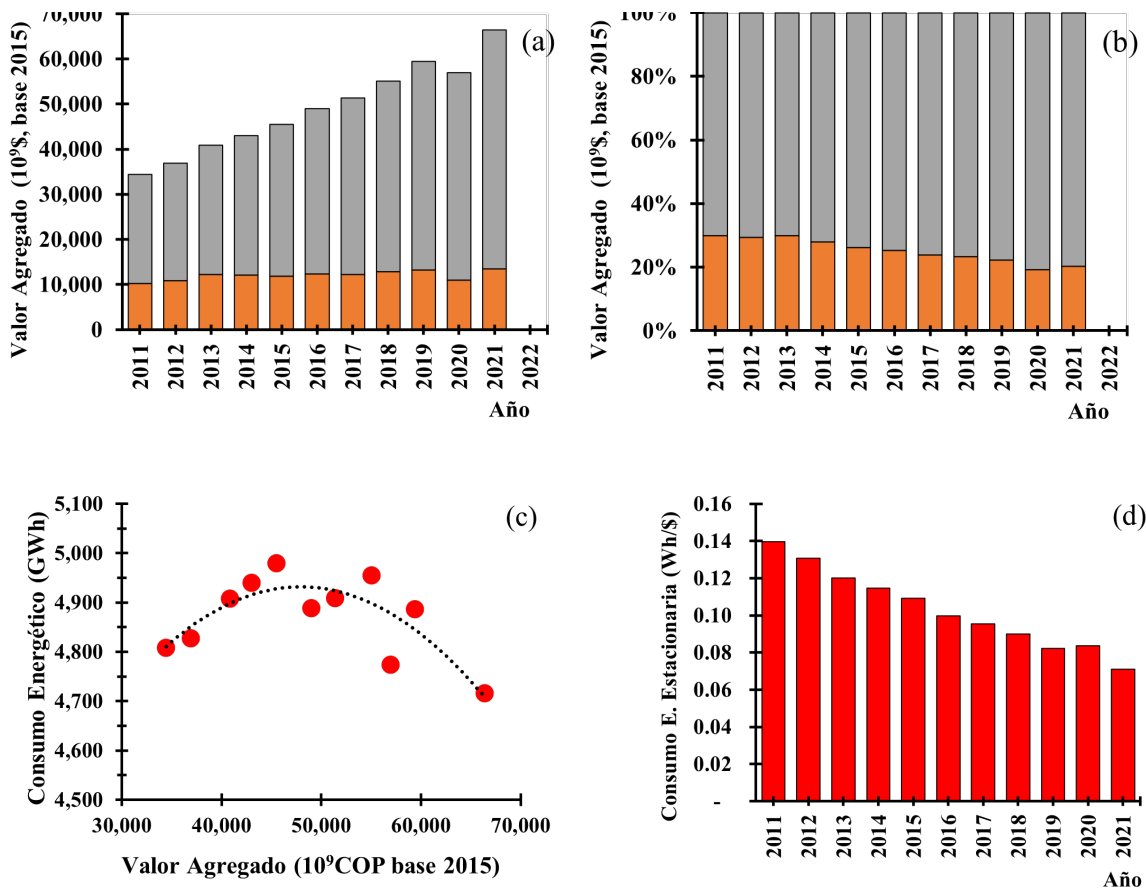


Figura 3. (a) Valor agregado de la ciudad de Medellín en el periodo 2010 – 2020, miles de millones COP (b) Composición del valor agregado de la ciudad de Medellín por sectores productivos: primario (azul, despreciable), secundario (naranja) y terciario (gris). Fuente: Adaptado de DANE (2023) (c) Consumo energético en Medellín y valor agregado municipal en miles de millones de pesos (base 2015) (d) Consumo de energía estacionaria por cada peso (COP base 2015) de Valor Agregado producido en Medellín, Colombia

Fuente: Elaboración propia.

secuencia las emisiones, pueden llegarse a experimentar procesos que dificulten su predicción con base en datos históricos (Kula et al., 2012; Mishra et al., 2009).

Con el objetivo de analizar el consumo desde el punto de vista económico se presenta el comportamiento del indicador de valor agregado de la ciudad Medellín desde el 2010 hasta 2021 (ver Figura 3). Este indicador es una herramienta económica producida por el DANE y corresponde al mayor valor creado en los procesos de producción por la diferencia entre el valor de la producción bruta y los consumos intermedios empleados (DANE, 2016). Este indicador recolecta el comportamiento económico del municipio con datos desagregados por los diferentes sectores económicos, por lo que permite analizar la demanda y oferta de bienes y servicios en la economía local.

El crecimiento del valor agregado ha sido constante durante el periodo estudiado, excepto en el 2019 por efectos del confinamiento durante la pandemia. En términos

relativos, se destaca que el sector más importante en la economía de la ciudad es el sector terciario, seguido del secundario y, finalmente, el primario, con una participación insignificante (inferior al 0.3%). El sector terciario presenta un crecimiento continuo del valor agregado y en la actualidad representa cerca del 80.7% del indicador. En contraste, el sector secundario (manufacturero, industrial) presenta un estancamiento cercano a los 13 mil millones de pesos (base 2015) y ha pasado de una participación del 30% en el 2011 al 20% en el 2020 (DANE, 2023a).

Según los datos de Valor Agregado, el cambio en la participación por sectores productivos revela una transición en las fases de desarrollo económico de la ciudad. Medellín avanza desde una sociedad con alta participación del sector industrial y manufacturero hacia una sociedad con mayor participación del sector servicios. Esta transición implicaría una mejor calidad ambiental como producto del mayor desarrollo económico y validaría, por lo menos de forma parcial, la hipótesis ambiental de Kuznets de

U-invertida (Alam et al., 2016; Tachea et al., 2021).

La ecuación matemática más simple para expresar la hipótesis ambiental de Kuznets tiene la forma donde corresponde la degradación ambiental y al desarrollo económico. La hipótesis ambiental de Kuznets ha sido evaluada tanto para países particulares como para grupos de países (Alam et al., 2016; Tachea et al., 2021). La validez de esta hipótesis ha sido debatida porque existen países donde el desarrollo no sigue el patrón de U invertida y porque existen dinámicas sociales que tienen influencia en la desigualdad social o la degradación ambiental, pero que no se ven reflejados en indicadores económicos (e.g. PIB per cápita) (Acemoglu & Robinson, 2002) Robinson, 2002.

Pese a ello, el ajuste presentado en la Figura 3c tiene la forma $y = -7 \times 10^{-7} x^2 + 0.0632x + 3,416.4$ donde se cumplen los criterios básicos <0 y >0 (Guo, 2018). Un resultado de <0 implica que el desarrollo económico ha permitido alcanzar un punto de inflexión en la tendencia de degradación ambiental. Estos puntos de inflexión ocurren generalmente durante el proceso de desindustrialización (Du & Xie, 2020). Según la Figura 3a el punto de inflexión se alcanza cuando el valor agregado es cercano a \$50,000 mil millones de COP (pesos colombianos, base 2015). En dólares americanos, el punto de inflexión corresponde a un valor aproximado de \$6,283 USD per cápita, asumiendo una tasa de cambio de \$3,200 COP/USD y una población de 2'486,723 habitantes en 2016. Sin embargo, estos valores del punto de inflexión deben ser analizados en un estudio econométrico por fuera del alcance de este estudio.

Finalmente, la Figura 3d demuestra una reducción monotónica del consumo de la energía estacionaria necesaria para la producción de Valor Agregado en la ciudad. Los valores de este indicador variaron entre 0.109 Wh/\$ y 0.071 Wh/\$ para 2015 y 2019, respectivamente. Esta variación representa un aumento del 35% en la eficiencia de producción de Valor Agregado en la ciudad y contribuye a entender los resultados descritos anteriormente.

Conclusión

Las tendencias de las emisiones asociadas al consumo de energía estacionaria en Medellín permitirían cumplir los objetivos de reducción del primer periodo de corte del Plan de Acción Climática de Medellín. En términos globales, las emisiones tuvieron una reducción del 40.5% con relación a las emisiones de las 2015 tomadas como año de referencia del PAC. Aunque los resultados son positivos es necesario resaltar que el factor de emisión del SIN es una variable crítica y que depende de fenómenos climáti-

cos, por lo que un fenómeno del niño intenso puede afectar negativamente el cumplimiento futuro del PAC, incluyendo los resultados del 2023 que se publicarían en 2024.

Los datos de Valor Agregado del municipio demuestran una transición en el sistema de desarrollo económico. El sector terciario continúa aumentando su participación al tiempo que disminuye la participación del sector industrial. Analizando el consumo de energía como una variable de demanda de recursos naturales, se evidencia un aparente punto de inflexión consistente con la hipótesis ambiental de Kuznets durante el 2016 que corresponde a un valor de 6,283 USD per cápita (base 2015) en términos de valor agregado. Del mismo modo, el uso de energía en la ciudad ha aumentado su eficiencia entre 2015 y 2019, pasando de 0.109 Wh/\$ a 0.071 Wh/\$ entre 2015 y 2021.

Referencias

- Acemoglu, D., & Robinson, J. A. (2002). The political economy of the Kuznets curve. *Review of Development Economics*, 6(2), 183–203. <https://doi.org/10.1111/1467-9361.00149>
- Alam, M. M., Murad, M. W., Noman, A. H. M., & Ozturk, I. (2016). Relationships among carbon emissions, economic growth, energy consumption and population growth: Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis for Brazil, China, India and Indonesia. *Ecological Indicators*, 70, 466–479. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.043>
- Alcaldía de Medellín. (2021a). *Inventario de Gases Efecto Invernadero bajo el estándar GPC para el municipio de Medellín. Período 2015-2019. Actualización - Inventarios BÁSICO*. https://www.medellin.gov.co/PortalAmbientaIPG/medioAmbiente/documentos/192_Medellin_InformeGEI2016-2019-20210914_FINAL.pdf
- Alcaldía de Medellín. (2021b). *Plan de Acción Climática. Medellín 2020-2050*. https://www.medellin.gov.co/wp-content/uploads/2021/09/PAC-MED_20210223.pdf
- Ben Jebli, M., Farhani, S., & Guesmi, K. (2020). Renewable energy, CO2 emissions and value added: Empirical evidence from countries with different income levels. *Structural Change and Economic Dynamics*, 53, 402–410. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2019.12.009>
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A. M., Bourgault, G., De Bruille, V., Cao, V., Hauschild, M., Henderson, A., Humbert, S., Kashef-Haghighi, S., Kounina, A., Laurent, A., Levasseur, A., Liard, G., Rosenbaum, R. K., Roy, P. O., Shaked, S., Fantke, P., & Jolliet, O. (2019). IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 1653–1674. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- Chen, P. F., & Lee, C. C. (2007). Is energy consumption per capita broken stationary? New evidence from regional-based panels. *Energy Policy*, 35(6), 3526–3540. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.027>
- DANE. (2016). *Metodología para calcular el Indicador de Importancia Económica Municipal Cuentas Departamentales*. http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/metodologia_importancia_economica_CD-02_V5_15-07-16.pdf
- DANE. (2023a). *Valor agregado por municipio: serie 2011-2021 provisional*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>
- DANE. (2023b). *Cuentas Nacionales*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>
- DANE, & Alcaldía de Medellín. (2011). *Proyecciones de Población 2006-2015*. <https://www.medellin.gov.co/es/centro-documental/proyecciones-poblacion-viviendas-y-hogares/>
- Du, X., & Xie, Z. (2020). Occurrence of turning point on environmental Kuznets curve in the process of (de)industrialization. *Structural Change and Economic Dynamics*, 53, 359–369. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2019.06.003>
- Dupuits, E., Garcés, A., Llambi, L. D., & Bustamante, M. (2024). Strategies for monitoring and evaluation of climate change adaptation: localizing global approaches into Andean realities. *Npj Climate Action*, 3(19). <https://doi.org/10.1038/s44168-023-00097-8>
- Gobierno de Colombia. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*. <https://bit.ly/3pT18li>
- Guo, R. (2018). *Cross-Border Environmental Pollution and Management*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64002-4.00009-x>
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, & Cancillería. (2022). *Informe del Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2018 y Carbono Negro 2010-2018 de Colombia. Tercer informe Bienal de Actualización de Cambio Climático, BUR3*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Annex_BUR3_COLOMBIA.pdf
- Kula, F., Aslan, A., & Ozturk, I. (2012). Is per capita electricity consumption stationary? Time series evidence from OECD countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 501–503. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.015>
- Li, J., Irfan, M., Samad, S., Ali, B., Zhang, Y., Badulescu, D., & Badulescu, A. (2023). The Relationship between Energy Consumption, CO2 Emissions, Economic Growth, and Health Indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2335. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032325>
- MADS, IDEAM, WWF Colombia, & UK Pact. (2021). *Guía para Elaboración o Actualización de Inventarios de Emisiones de GEI en Ciudades Colombianas*. https://woflac.awsassets.panda.org/downloads/wwf_guia_de_emisiones_ciudades_v12_04_21_digital_version_final.pdf
- Medellín Cómo Vamos. (2022). *Calidad de Vida de Medellín 2021*. http://www.medellincomovamos.org/download/informe-de-indicadores-objetivos-sobre-la-calidad-de-vida-en-medellin-2016/?utm_source=Documentos_Home&utm_campaign=Encuesta_2016&utm_medium=Botones_Sidebar&utm_term=Informe
- Medina-Pérez, P. C., Quiroz-Jiménez, J. D., & Tapia-Fernández, H. J. (2023). Pobreza energética y cambio climático. Aproximación desde el análisis territorial en los municipios de México. *Revista INVI*, 38(109), 134–171. <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2023.70731>
- Mishra, V., Sharma, S., & Smyth, R. (2009). Are fluctuations in energy consumption per capita transitory? Evidence from a panel of Pacific Island countries. *Energy Policy*, 37(6), 2318–2326. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.022>
- Ota, T. (2017). Economic growth, income inequality and environment: assessing the applicability of the Kuznets hypotheses to Asia. *Palgrave Communications*, 3(1). <https://doi.org/10.1057/palcomms.2017.69>
- Rodríguez, J. P., Ruiz-Ochoa, M. A., & Meneses, A. (2020). Revisión de los factores de emisión en las metodologías de huella de carbono en Colombia. *Espacios*, 41(47), 74–84. <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n47p06>
- Siclari Bravo, P. (2017). Desafíos urbanos latinoamericanos y caribeños de cara a los objetivos de desarrollo sustentable y a la nueva agenda urbana. *Revista INVI*, 32(89), 199–211. <https://doi.org/10.4067/s0718-83582017000100199>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2023). *Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios. Plataforma SUI*. <https://sui.superservicios.gov.co/>
- Tachega, M. A., Yao, X., Liu, Y., Ahmed, D., Ackaah, W., Gabir, M., & Gyimah, J. (2021). Income Heterogeneity and the Environmental Kuznets Curve Turning Points: Evidence from Africa. *Sustainability*, 13(10), 5634. <https://doi.org/10.3390/su13105634>
- UPME. (2016a). *Factores de emisión de los combustibles colombianos FECOC*. http://www.upme.gov.co/Calculadora_Emisiones/aplicacion/Informe_Final_FECOC_Correcciones_UPME_FunNatura.pdf
- UPME. (2016b). *Factores de Emisión del SIN Sistema Interconectado Nacional Colombia 2015*. https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_del_FE_SIN_2015_dic_2016.pdf
- UPME. (2017). *Documento de cálculo del FE del SIN 2016*. https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_del_FE_SIN_2016_Rev_Dic_2017.docx
- UPME. (2018). *Documento de cálculo del FE del SIN 2017*. https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_del_FE_SIN_2017_Rev_Dic_2018.docx
- UPME. (2019). *Documento de cálculo del FE del SIN 2018*. https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_del_FE_del_SIN_2018_Rev_Dic_26_2019.docx
- UPME. (2023). *Factores de Emisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN) en Colombia para el 2022*. <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/calculo-factor-de-emision-de-Co2-del-SIN.aspx>
- UPME, Minenergía, & XM. (2021). *Cálculo del Factor de Emisiones de la Red de Energía Eléctrica en Colombia para 2020*. https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_del_FE_del_SIN_2020.pdf
- UPME, Minenergía, & XM. (2022). *Cálculo del Factor de Emisiones de la Red de Energía Eléctrica en Colombia para 2021*. https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_Cartilla_Factor_de_emision_2021.pdf
- UPME, XM, Minenergía, & IDEAM. (2020). *Cálculo del Factor de Emisiones de la Red de Energía Eléctrica en Colombia*. https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_FE_del_SIN_2019_Dic_2020.pdf
- World Resources Institute, C40 Cities, & ICLEI. (2021). *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Inventories. An Accounting and Reporting Standard for Cities. Version 1.1*. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/GPC_Full_MASTER_RW_v7.pdf
- WWF, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & IDEAM. (2021). *Inventario de Emisiones de Gases Efecto Invernadero. Valle de Aburrá*. <http://www.cambioclimatico.gov.co/jsp/loader.jsf?Servicio=Publicaciones&ITipo=publicaciones&Funcion=loadContenidoPublicacion&id=1305>