

Análisis de los factores determinantes de las emisiones de CO₂ en EcuadorAnalysis of the determining factors of CO₂ emissions in Ecuador

Jhanmel Anahí Cruzatty Vera^{a*}, Yomira Alejandra Bazurto Solórzano^a,
Rodolfo Andrés Rivadeneira Zambrano^a, Bladimir Jacinto Carrillo Anchundia^a

^aUniversidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10108784>

Recibido: 08/10/2022

Aceptado: 02/12/2022

Resumen

El análisis de la variación de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) proporciona información útil para las alternativas de reducción. En este estudio se analizó los efectos de algunos factores determinantes sobre las emisiones de CO₂ en los sectores más representativos de Ecuador durante el periodo 2000 – 2020, implementando la metodología Índice Divisia Media Logarítmica (LMDI). Se analizó los factores que están asociados con las emisiones de CO₂, estos incluyen la intensidad del carbono, la intensidad energética, la actividad económica y la población. Se aplicó la descomposición aditiva y multiplicativa para analizar los efectos de los factores determinantes haciendo uso de una extensión de la identidad Kaya. Se logró identificar los sectores productivos de mayor contribución en la variación interanual de las emisiones de CO₂. La renta económica por habitante y la intensidad energética fueron los factores que contribuyeron en mayor proporción a las emisiones, mientras que, el índice de carbonización fue el principal factor en la reducción de las emisiones de CO₂.

Palabras clave: CO₂, descomposición aditiva y multiplicativa, Factores determinantes, identidad Kaya, LMDI.
Código UNESCO: 330801 - Control de la contaminación atmosférica. Código CAPE: 306030 – Tecnología Química.

Abstract

The analysis of the variation of carbon dioxide (CO₂) emissions provides useful information for reduction alternatives. This study analyzed the effects of some determinants on CO₂ emissions in the most representative sectors of Ecuador during the period 2000 - 2020, implementing the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) methodology. The factors associated with CO₂ emissions were analyzed, including carbon intensity, energy intensity, economic activity and population. Additive and multiplicative decomposition was applied to analyze the effects of the determining factors using an extension of the Kaya identity. The productive sectors with the greatest contribution to the interannual variation of CO₂ emissions were identified. Economic income per capita and energy intensity were the factors that contributed most to emissions, while the carbonization index was the main factor in the reduction of CO₂ emissions.

Keywords: CO₂, additive and multiplicative decomposition, determining factors, Kaya identity, LMDI.
UNESCO Code: 330801 - Control of atmospheric pollution. CAPE Code: 306030 – Chemical Technology.

PUBLICACIONES EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA, revista científica de publicación continua, dos números al año, editada en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA) en la ciudad de Barquisimeto, Venezuela, bajo la Licencia CC BY-NC-SA. ISSN:1856-8890, EISSN:2477-9660. Depósitos legales: pp200702LA2730, ppi201402LA4590.

***Autor de correspondencia**

Jhanmel Anahí Cruzatty Vera*. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5943-9817>, correo: jcruzatty6479@utm.edu.ec. Ingeniero Químico egresada de la Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas, Ecuador.

Yomira Alejandra Bazurto Solórzano. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8458-6154>, correo: ybazurto2847@utm.edu.ec. Ingeniero Químico egresada de la Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas, Ecuador.

Rodolfo Andrés Rivadeneira Zambrano. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9707-7084>, correo: rodolfo.rivadeneira@utm.edu.ec. Ingeniero Químico, Magister en Ingeniería Industrial y Productividad, Ingeniería, industria y construcción. Docente en el Departamento: de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología, Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

Bladimir Jacinto Carrillo Anchundia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9948-728X>, correo: bladimi.carrillo@utm.edu.ec. Ingeniero Químico, Magister en Administración Ambiental, Diplomado en Manejo Ambiental, Docente en el Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología. Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

1. Introducción

Uno de los principales desafíos a nivel mundial en la actualidad, es el poder generar las condiciones adecuadas para un desarrollo energético sostenido en el tiempo, tanto desde un punto de vista económico, como tecnológico y social [1]. Los problemas ambientales en los últimos años han provocado que la mayoría de las naciones firmen acuerdos con miras a reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). El cumplimiento de reducción de las emisiones de GEI determinarán en gran medida las oportunidades para evitar una crisis climática que pueda frenar o impedir el desarrollo sostenible tanto en nuestro propio país como en los países en desarrollo vulnerables en el futuro [2], [3].

La contaminación del aire es un grave problema de salud medioambiental que afecta directamente a la humanidad [4]. En la actualidad, la elevada cantidad de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) es uno de los mayores problemas ambientales en el mundo, ya que está experimentando cambios climáticos en nuestro entorno debido al consumo de energía procedentes de combustibles fósiles [5]. En el año 2021, las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía se incrementaron en 6 % lo que equivale a un total acumulado de 36.300 millones de toneladas, representando un máximo histórico [6]. Según un nuevo análisis de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la economía mundial se ha recuperado con fuerza de la crisis del COVID-19 y su crecimiento ha estado relacionado en gran medida con el consumo de los combustibles fósiles [6].

Para el caso del Ecuador, de acuerdo con el Balance Energético Nacional 2018, el consumo de energía del sector transporte representó en dicho año un 48,8 % del total demandado en el país, provocando la emisión de 19,25 millones de toneladas equivalentes de CO₂ (MtCO₂-eq) al ambiente [7]. En el Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021, se identifica la importancia de disminuir los impactos ambientales en el transporte, al promover políticas como: “Impulsar la movilidad inclusiva, alternativa y sostenible, priorizando los sistemas de transporte público masivo de calidad y eficiente, así como los medios de movilidad no motorizada” [8]. Los principales sectores productivos del país que contribuyeron a las emisiones de CO₂ son: Transporte, Industria, Construcción, Residencial, Comercial-Servicios Públicos y Agroindustria-Pesca y Minería [9]. El sector transporte fue el que generó la mayor emisión de CO₂ en el año 2019 (figura 1), se registró un aumento del 0,27 % en relación del 2018, debido a que en este sector tiene la mayor demanda de combustible fósil en el país, a diferencia de otros sectores donde la demanda es en menor proporción.

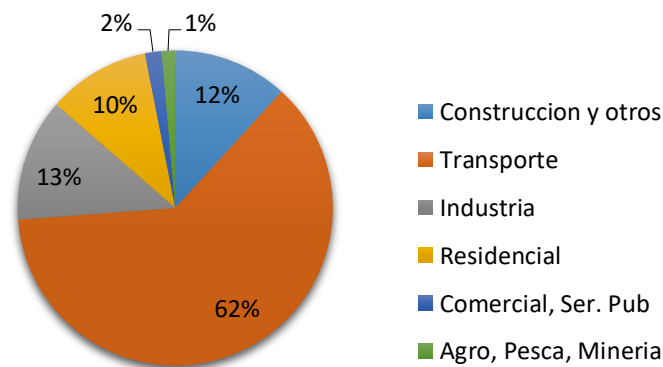


Figura 1: Principales sectores contribuyentes de las emisiones de CO₂ (%) para el año 2019.
Fuente: Balance Energético Nacional [9].

Durante el periodo de 2000 a 2020 las emisiones de CO₂ generadas anualmente para los seis sectores (figura 2) se observa un incremento de 12.288,9 kilotoneladas (kt) de CO₂ que corresponde a un aumento del 85,37 % durante este periodo; sin embargo, para el año 2014 se presentó la máxima emisión de CO₂ en

relación con los otros años esto debido al crecimiento económico y por la alta demanda de energía que se necesitó en los diferentes sectores, alcanzando una acumulación de CO₂, por la participación que tuvo el petróleo y sus derivados[10].

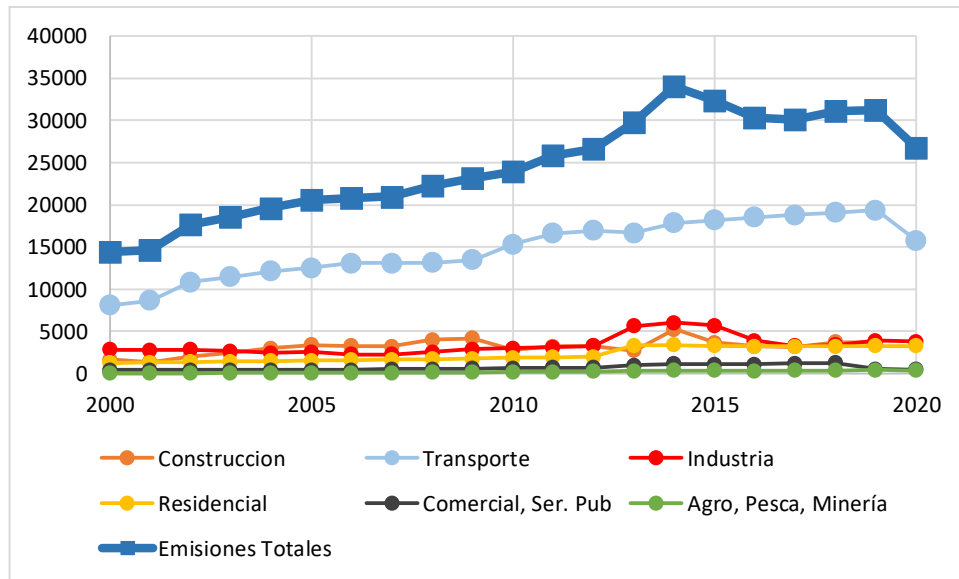


Figura 2: Emisiones totales y por sector de CO₂ en kt durante el periodo 2000-2020.
Fuente: Balance Energético Nacional [9].

El sector transporte contribuyó en gran medida a las emisiones de CO₂ durante el periodo de tiempo analizado (figura 2), reflejando una tendencia creciente, excepto en el año 2020 por motivos de la pandemia [11]; mientras que las emisiones de CO₂ producidas tanto en el sector construcción e industrial han tenido un comportamiento variable a lo largo del periodo 2000-2020, sobre todo en el año 2014 donde ambos sectores presentan la máxima emisión de CO₂ durante todo el periodo.

La identidad de Kaya es una expresión matemática que permite analizar las tendencias observadas en las emisiones de CO₂ en los principales factores que la componen y explican [12]. Según esta identidad (ecuación 1), las emisiones se descomponen en el producto de cuatro factores: población, Producto Interno Bruto (PIB) per cápita, intensidad energética, índice de carbonización [13].

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \times \frac{E}{PIB} \times \frac{PIB}{P} \times P \quad (1)$$

El presente artículo tiene como objetivo analizar los factores determinantes de las emisiones de CO₂ en los sectores más representativos en la producción de bienes y servicios del país implementando la metodología Índice Divisia Media Logarítmica (LMDI, por sus siglas en inglés) la misma que permite analizar los factores que están asociados con las emisiones, estos incluyen la intensidad del carbono, la intensidad energética, la actividad económica y la población.

2. Desarrollo

2.1. Metodología

La identidad Kaya es también una herramienta analítica utilizada para explorar cuáles son las principales fuerzas motrices causante de este comportamiento de dióxido de carbono (CO₂) [14]. Esta expresión puede

ser abierta, a su vez, en más subcomponentes. Cada factor juega un rol determinado dentro de un sistema económico, social y tecnológico complejo y altamente interconectado, lo que plantea desafíos sustanciales en materia de modelización y análisis prospectivo [15]. La ecuación 2 es una extensión de la identidad Kaya [16]:

$$C = \frac{CO_2}{E} \times \frac{E}{PIB_i} \times \frac{PIB_i}{PIB_T} \times \frac{PIB_T}{POB} \times POB \quad (2)$$

De acuerdo con esta ecuación, las emisiones de CO₂ se descomponen en el producto de cinco factores determinantes: índice de carbonización definida como el CO₂ generado por la energía que producen los derivados del petróleo ($\frac{CO_2}{E}$); la intensidad energética definida como la energía consumida por unidad de PIB de cada actividad económica ($\frac{E}{PIB_i}$); la estructura de la actividad económica definida como la relación entre el PIB por actividad económica y el PIB total ($\frac{PIB_i}{PIB_T}$); la renta económica per cápita definida como la relación ($\frac{PIB_T}{POB}$) y la población. De este modo, podemos reescribir la extensión de la identidad Kaya tal como se muestra en la ecuación 3:

$$C = c * e * s * r * P \quad (3)$$

Siendo C las emisiones totales de CO₂ emitidos a la atmósfera, cuyas unidades se expresa en unidades de kt de CO₂ equivalente, c es el índice de carbonización expresado en unidades de kt de CO₂ por unidades energéticas de petróleo (kBEP), e es la intensidad energética medido en unidades energéticas por MUSD 2007, s es la relación del PIB de cada sector por el PIB total, r conocida como la renta económica per cápita resumidos en MUSD 2007 por habitantes, y P la población del país [17].

El método Índice Divisia Media Logarítmica (LMDI) permite descomponer a una variable agregada en factores de interés, de esta manera, el método nos permite determinar cuáles son los factores explicativos de cada uno de los cambios para un periodo determinado [18]. En este trabajo se aplicará la descomposición aditiva y multiplicativa para desagregar y analizar los efectos de los factores determinantes de una extensión de la identidad Kaya, logrando con esto identificar los sectores productivos de mayor contribución en la variación interanual de las emisiones de CO₂.

La forma aditiva descompone la diferencia del indicador entre 0 y T , en donde 0 corresponde al año de referencia y T al año objetivo. La forma multiplicativa descompone el crecimiento relativo de un indicador entre los períodos 0 y T en el producto del número de efectos considerados.

Para la descomposición aditiva en base a la ecuación 3 se puede afirmar que la variación de las emisiones de CO₂ (ΔC) en un periodo entre 0 y T es igual a las emisiones de CO₂ en el año objetivo (C_T) menos las emisiones de CO₂ que es el año de referencia (C_o), es igual al suma de las variaciones de los cinco factores considerados en este estudio, representados por: el efecto del índice de carbonización (ΔC_c), la intensidad energética (ΔC_e), la renta económica (ΔC_r), la relación del PIB_i/PIB_T (ΔC_s) y la cantidad de habitantes (ΔC_p), donde podemos expresarla según la ecuación 4:

$$\Delta C = C_T - C_o = \Delta C_c + \Delta C_e + \Delta C_s + \Delta C_r + \Delta C_p \quad (4)$$

Dado que la atención de las emisiones se centra en la tasa de cambio de las emisiones a través del tiempo, consideramos derivar la ecuación 4, obteniendo la siguiente ecuación 5:

$$\frac{d \ln C}{dt} = \frac{d \ln c}{dt} + \frac{d \ln e}{dt} + \frac{d \ln s}{dt} + \frac{d \ln r}{dt} + \frac{d \ln P}{dt} \quad (5)$$

De acuerdo con Ang y Choi [19], la forma aditiva para descomponer los efectos de cada variable de las emisiones de CO₂ está dada por el resultado de la integración de la ecuación anterior, obteniendo la ecuación 6:

$$\Delta C = L(C_T, C_O) \ln \frac{C_T}{C_O} + L(C_T, C_O) \ln \frac{e_T}{e_O} + L(C_T, C_O) \ln \frac{s_T}{s_O} + L(C_T, C_O) \ln \frac{r_T}{r_O} + L(C_T, C_O) \ln \frac{P_T}{P_O} \quad (6)$$

Donde el término $L(C_T, C_O)$ corresponde a la media logarítmica de C_T y C_O , que establece una descomposición aditiva más exacta, obteniendo así la ecuación 7:

$$L(C_T, C_O) = \frac{C_T - C_O}{\ln C_T - \ln C_O} \quad (7)$$

Por otra parte, la descomposición multiplicativa en base a la ecuación 3 da como resultado la multiplicación de los cinco factores anteriormente mencionados, cuya expresión demuestra el comportamiento de las variaciones de CO₂ en un periodo determinado según la ecuación 8:

$$\Delta C = \frac{C_T}{C_O} = \Delta C_c * \Delta C_e * \Delta C_s * \Delta C_r * \Delta C_p \quad (8)$$

De igual manera se deriva la ecuación 8 debido a que la tasa de las emisiones varía con el tiempo, dando paso a la siguiente ecuación 9:

$$\frac{d \ln C}{dt} = \sum \frac{c * e * r * s * p}{C} \left(\frac{d \ln c}{dt} + \frac{d \ln e}{dt} + \frac{d \ln s}{dt} + \frac{d \ln r}{dt} + \frac{d \ln p}{dt} \right) \quad (9)$$

Luego integramos la ecuación 9, obteniendo así la ecuación 10 y 11 en la cual, la expresión $w(t)$ representa la multiplicación de los cinco factores sobre las emisiones de CO₂ para un periodo determinado.

$$w(t) = \frac{C_c * C_e * C_s * C_r * C_p}{C_T} \quad (10)$$

$$\ln \frac{C_T}{C_O} = \sum \int_0^T w(t) \left(\frac{d \ln c(t)}{dt} + \frac{d \ln e(t)}{dt} + \frac{d \ln s(t)}{dt} + \frac{d \ln r(t)}{dt} + \frac{d \ln p(t)}{dt} \right) dt \quad (11)$$

Aplicamos la función exponencial en la ecuación 11, obteniendo como resultado la ecuación 12:

$$\frac{C_T}{C_O} = e^{\int w(t) \frac{d \ln c(t)}{dt}} e^{\int w(t) \frac{d \ln e(t)}{dt}} e^{\int w(t) \frac{d \ln s(t)}{dt}} e^{\int w(t) \frac{d \ln r(t)}{dt}} e^{\int w(t) \frac{d \ln p(t)}{dt}} \quad (12)$$

Ang *et al.* [20] indica que se puede usar la siguiente fórmula (ecuación 13) para el cambio logarítmico:

$$\frac{C_T}{C_O} = e^{\int w(t) \frac{C_T}{C_O}} e^{\int w(t) \frac{e_T}{e_O}} e^{\int w(t) \frac{s_T}{s_O}} e^{\int w(t) \frac{r_T}{r_O}} e^{\int w(t) \frac{P_T}{P_O}} \quad (13)$$

Según Ang y Liu [21] señalan que las ecuaciones 13 y 6 posee amplias ventajas, entre ellas: la inexistencia de componente residual, cumplimiento de las propiedades de reversión temporal y de factores, la existencia de una relación sencilla entre los enfoques aditivo y multiplicativo, la capacidad de tratar la presencia de ceros en el conjunto de datos, y la consistencia en la agregación.

Los datos recopilados (cuadro 1) de las emisiones de CO₂, consumo de energía y PIB se obtuvieron del Balance Energético Nacional [9], mientras que las cifras de la población se tomaron del INEC [22] para el periodo comprendido entre los años 2000 y 2020.

Cuadro 1. Datos recopilados de la población, emisiones de CO₂, PIB y consumo de energía para el periodo comprendido entre los años 2000 a 2020.

| Actividad económica | Población | kt de CO ₂ Equivalentes | PIB (MUSD2007) | PIB total | Consumo de energía (kBEP) |
|----------------------|------------|---------------------------------------|-------------------|-----------|--------------------------------|
| | | SIELAC | | | Balance energético nacional |
| Año 2000 | | | | | |
| Construcción y otros | 12.531.210 | 1.658,6 | 2.254 | 37.726 | 277 |
| Transporte | | 8.132,9 | 2.691 | | 25.063 |
| Industria | | 2.849,4 | 4.581 | | 7.423 |
| Residencial | | 1.261,7 | 132 | | 4.800 |
| Comercial, Serv. Pub | | 423,61 | 4.234 | | 217 |
| Agro, Pesca, Minería | | 67,89 | 3.544 | | 246 |
| Año 2001 | | | | | |
| Construcción y otros | 12.814.503 | 1.395,5 | 2.279 | 39.241 | 1.503 |
| Transporte | | 8.647,6 | 2.787 | | 24.684 |
| Industria | | 2.761,3 | 4.818 | | 7.106 |
| Residencial | | 1.326,9 | 136 | | 5.088 |
| Comercial, Ser. Pub | | 408,8 | 4.434 | | 213 |
| Agro, Pesca, Minería | | 68,5 | 3.720 | | 248 |
| Año 2002 | | | | | |
| Construcción y otros | 13.093.527 | 2.004,3 | 3.361 | 40.849 | 1.185 |
| Transporte | | 10.875,1 | 2.808 | | 27.145 |
| Industria | | 2.868,3 | 4.938 | | 7.636 |
| Residencial | | 1.372,2 | 139 | | 5.299 |
| Comercial, Ser. Pub | | 447,5 | 4.527 | | 210 |
| Agro, Pesca, Minería | | 69,54 | 3.786 | | 252 |
| Año 2003 | | | | | |
| Construcción y otros | 13.319.575 | 2.424,3 | 3.329 | 41.961 | 1.300,3 |
| Transporte | | 11.457,8 | 2.870 | | 27.851,1 |
| Industria | | 2.663,5 | 5.100 | | 7.286,4 |
| Residencial | | 1.430,6 | 145 | | 5.600,2 |
| Comercial, Ser. Pub | | 462,5 | 4.667 | | 163,3 |
| Agro, Pesca, Minería | | 73,3 | 4.036 | | 265,5 |

Continuación Cuadro 1

| Año 2004 | | | | | |
|----------------------|------------|-----------|-------|--------|----------|
| Construcción y otros | 13.551.875 | 3.039,2 | 3.502 | 45.407 | 1.355,7 |
| Transporte | | 12.155,1 | 2.930 | | 30.378,7 |
| Industria | | 2.436,2 | 5.231 | | 7.192,6 |
| Residencial | | 1.491,1 | 151 | | 5.992,3 |
| Comercial, Ser. Pub | | 418,4 | 4.855 | | 145,9 |
| Agro, Pesca, Minería | | 79,4 | 4.132 | | 287,6 |
| Año 2005 | | | | | |
| Construcción y otros | 13.721.297 | 3.383 | 3.802 | 47.809 | 1.079 |
| Transporte | | 12.534,45 | 3.003 | | 32.367,7 |
| Industria | | 2.553,64 | 5.565 | | 7.747,1 |
| Residencial | | 1.552,23 | 144 | | 6.554,9 |
| Comercial, Ser. Pub | | 462,22 | 5.148 | | 146,9 |
| Agro, Pesca, Minería | | 96,05 | 4.424 | | 347,7 |
| Año 2006 | | | | | |
| Construcción y otros | 13.964.606 | 3.303,6 | 3.977 | 49.915 | 859,8 |
| Transporte | | 13.072,08 | 3.167 | | 34.491,3 |
| Industria | | 2.290,31 | 5.835 | | 7.458 |
| Residencial | | 1.614,12 | 148 | | 6.862 |
| Comercial, Ser. Pub | | 447,41 | 5.346 | | 155,9 |
| Agro, Pesca, Minería | | 114,4 | 4.614 | | 414,1 |
| Año 2007 | | | | | |
| Construcción y otros | 14.213.955 | 3.242,3 | 4017 | 51.008 | 699 |
| Transporte | | 13.104,97 | 3231 | | 3.6798 |
| Industria | | 2.276,88 | 6077 | | 6.930,1 |
| Residencial | | 1.677,18 | 149 | | 7.114,9 |
| Comercial, Ser. Pub | | 535,62 | 5356 | | 153,6 |
| Agro, Pesca, Minería | | 125,01 | 4772 | | 454,3 |
| Año 2008 | | | | | |
| Construcción y otros | 14.472.879 | 4.024,2 | 4.372 | 54.250 | 838,9 |
| Transporte | | 13.165,27 | 3.409 | | 39.288,2 |
| Industria | | 2.573,94 | 6.635 | | 7.616,9 |
| Residencial | | 1.742,16 | 148 | | 7.162,7 |
| Comercial, Ser. Pub | | 562,78 | 5.933 | | 134,8 |
| Agro, Pesca, Minería | | 154,13 | 4.852 | | 547,3 |

Continuación Cuadro 1.

| Año 2009 | | | | | |
|----------------------|------------|-----------|-------|--------|----------|
| Construcción y otros | 14.738.466 | 4.195,7 | 4.495 | 54.558 | 674,3 |
| Transporte | | 13.475,31 | 3.632 | | 40.790,9 |
| Industria | | 2.874,11 | 6.534 | | 8.676,2 |
| Residencial | | 1.809,23 | 172 | | 6.900,4 |
| Comercial, Ser. Pub | | 614,5 | 5.700 | | 148,6 |
| Agro, Pesca, Minería | | 174,9 | 4.935 | | 624,8 |
| Año 2010 | | | | | |
| Construcción y otros | 15.012.228 | 2.833,2 | 4.649 | 56.481 | 6.684,2 |
| Transporte | | 15.346,13 | 3.709 | | 30.240 |
| Industria | | 3.006,13 | 6.868 | | 7.462,3 |
| Residencial | | 1.870,97 | 184 | | 5.476,1 |
| Comercial, Ser. Pub | | 653,84 | 5.896 | | 1.542,2 |
| Agro, Pesca, Minería | | 199,04 | 4.971 | | 686,4 |
| Año 2011 | | | | | |
| Construcción y otros | 15.266.431 | 3.230,7 | 5.465 | 60.925 | 7.638,4 |
| Transporte | | 16.629,43 | 3.914 | | 32.712,8 |
| Industria | | 3.115,11 | 7.266 | | 7.688,9 |
| Residencial | | 1.940,97 | 177 | | 5.681,8 |
| Comercial, Ser. Pub | | 704,37 | 6.238 | | 1.661 |
| Agro, Pesca, Minería | | 222,11 | 5.366 | | 763,3 |
| Año 2012 | | | | | |
| Construcción y otros | 15.520.973 | 3.306,8 | 6.132 | 64.362 | 7.766,8 |
| Transporte | | 16.982,2 | 4.152 | | 33.846,1 |
| Industria | | 3.311,56 | 7.510 | | 7.940,2 |
| Residencial | | 2.008,02 | 175 | | 5.878,2 |
| Comercial, Ser. Pub | | 725 | 6.530 | | 1.710 |
| Agro, Pesca, Minería | | 249,79 | 5.408 | | 852,6 |
| Año 2013 | | | | | |
| Construcción y otros | 15.774.749 | 2.738 | 6.587 | 67.546 | 7.640,5 |
| Transporte | | 16.668 | 4.577 | | 36.103,1 |
| Industria | | 5.651 | 7.972 | | 8.791,5 |
| Residencial | | 3.344 | 178 | | 6.078,8 |
| Comercial, Ser. Pub | | 1.014 | 6.973 | | 1.871,1 |
| Agro, Pesca, Minería | | 347 | 5.770 | | 878,3 |

Continuación Cuadro 1

| Año 2014 | | | | | |
|----------------------|------------|--------|-------|--------|----------|
| Construcción y otros | 16.027.466 | 5.231 | 7.062 | 69.828 | 7.152,9 |
| Transporte | | 17.844 | 4.807 | | 38.775,6 |
| Industria | | 6.028 | 8207 | | 9.286,4 |
| Residencial | | 3.406 | 187 | | 6.287,1 |
| Comercial, Ser. Pub | | 1.146 | 7.205 | | 1.961,9 |
| Agro, Pesca, Minería | | 371 | 5.605 | | 944,6 |
| Año 2015 | | | | | |
| Construcción y otros | 16.278.844 | 3.667 | 6.939 | 69.805 | 6.041,7 |
| Transporte | | 18.186 | 4.707 | | 40.657,8 |
| Industria | | 5.698 | 8.143 | | 8.402 |
| Residencial | | 3.303 | 185 | | 6.294,2 |
| Comercial, Ser. Pub | | 1.124 | 7.146 | | 1.798,8 |
| Agro, Pesca, Minería | | 372 | 5.748 | | 941,3 |
| Año 2016 | | | | | |
| Construcción y otros | 16.528.730 | 3.269 | 6.324 | 68.625 | 5.706,8 |
| Transporte | | 18.506 | 4.713 | | 42.418,4 |
| Industria | | 3.908 | 8.100 | | 6.301,3 |
| Residencial | | 3.236 | 192 | | 6.191,1 |
| Comercial, Ser. Pub | | 1.110 | 7.064 | | 1.367,2 |
| Agro, Pesca, Minería | | 330 | 5.732 | | 832,2 |
| Año 2017 | | | | | |
| Construcción y otros | 16.776.977 | 3.174 | 6.098 | 70.410 | 6.129,1 |
| Transporte | | 18.819 | 5.027 | | 45.090,4 |
| Industria | | 3.279 | 8.189 | | 6.171,6 |
| Residencial | | 3.213 | 213 | | 6.206,6 |
| Comercial, Ser. Pub | | 1.224 | 7.228 | | 1.342,4 |
| Agro, Pesca, Minería | | 371 | 5.958 | | 940,3 |
| Año 2018 | | | | | |
| Construcción y otros | 17.023.408 | 3.731 | 6.194 | 71.871 | 7.688,1 |
| Transporte | | 19.074 | 5.224 | | 45.704,9 |
| Industria | | 3.409 | 8.364 | | 6.824,6 |
| Residencial | | 3.253 | 212 | | 6.404,5 |
| Comercial, Ser. Pub | | 1.276 | 7.372 | | 1.464,2 |
| Agro, Pesca, Minería | | 396 | 6.807 | | 1.001,6 |

Continuación Cuadro 1.

| Año 2019 | | | | | |
|----------------------|------------|--------|-------|--------|----------|
| Construcción y otros | 17.267.986 | 3.678 | 5.875 | 71.909 | 7.657,3 |
| Transporte | | 19.371 | 5.280 | | 46.416,6 |
| Industria | | 3.924 | 8.490 | | 6.330,8 |
| Residencial | | 3.288 | 208 | | 6.607,6 |
| Comercial, Ser. Pub | | 531 | 7.309 | | 1.294,6 |
| Agro, Pesca, Minería | | 433 | 6.927 | | 1.094,1 |
| Año 2020 | | | | | |
| Construcción y otros | 17.510.643 | 2.925 | 5.250 | 66.308 | 6.173,8 |
| Transporte | | 15.768 | 4.556 | | 37.737,4 |
| Industria | | 3.796 | 7.835 | | 6.066,8 |
| Residencial | | 3.293 | 207 | | 6.740 |
| Comercial, Ser. Pub | | 506 | 6.716 | | 1.230,6 |
| Agro, Pesca, Minería | | 395 | 6.945 | | 994,8 |

Fuente: [9], [22].

2.2. Resultados

Una vez determinado los factores que se han considerado para este estudio, se muestran los gráficos de los efectos de cada uno de los factores respecto a la contribución de las emisiones de CO₂; aplicando el método LMDI aditivo y multiplicativo para un periodo único entre 2000 y 2019. En donde la forma aditiva (figura 3) descompone la diferencia del indicador expresado en kt de CO₂; mientras que la descomposición multiplicativa (figura 4) se muestra representado en términos porcentual.

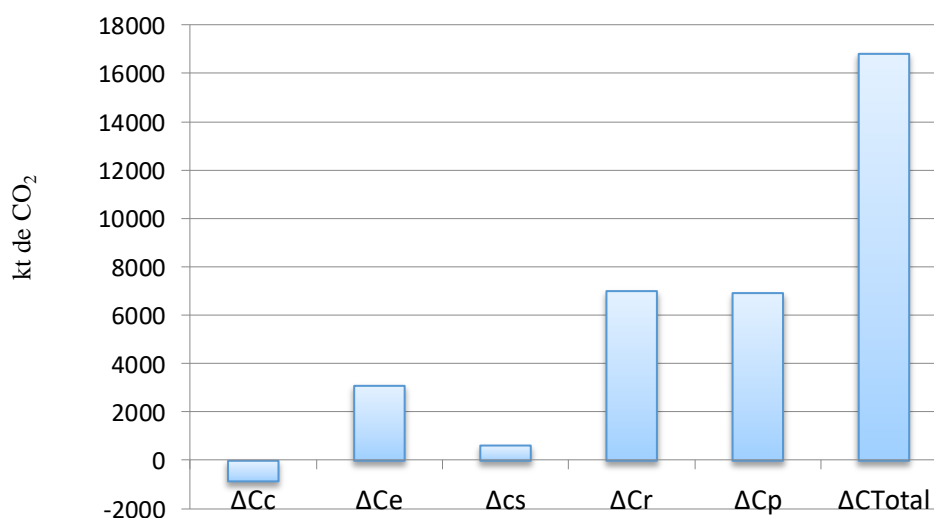


Figura 3: Descomposición aditiva LMDI para las variaciones de emisiones de CO₂ en Ecuador en el período único 2000 – 2019. **Fuente:** Elaboración propia.

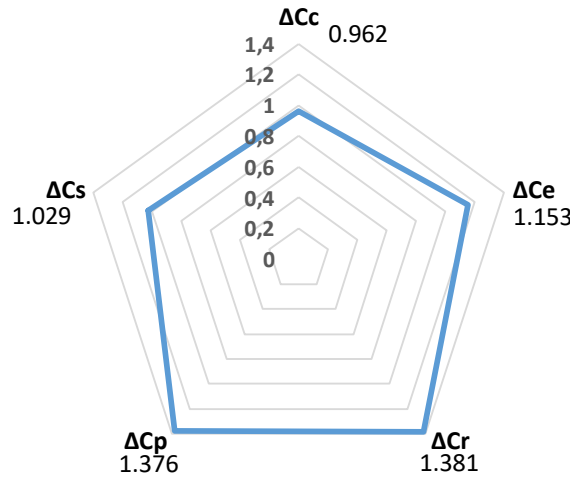


Figura 4: Descomposición multiplicativa LMDI para las variaciones de emisiones de CO₂ en Ecuador en el período único 2000 – 2019. **Fuente:** Elaboración propia.

Después que se obtuvieron los valores de cada uno de los factores, se hicieron los respectivos cálculos con la ecuación 6 para cada año del periodo en estudio. En términos generales, se puede distinguir (figura 5) el efecto de la descomposición aditiva que impusieron los cinco factores en la variación total acumulada. De modo idéntico se ve manifestado (figura 6) los efectos que tienen mayor participación en la descomposición multiplicativa.

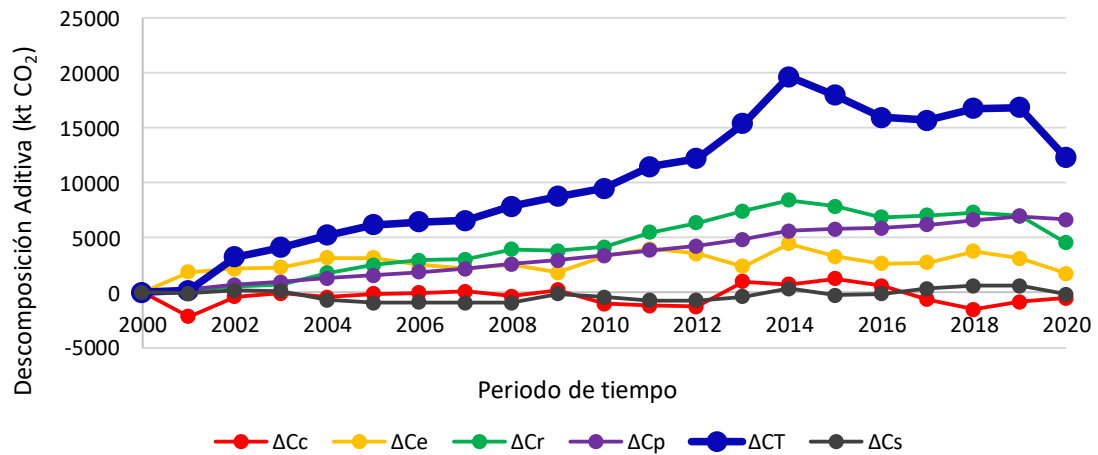


Figura 5: Descomposición aditiva LMDI para las variaciones de emisiones de CO₂ en serie anual desde 2000 a 2020. **Fuente:** Elaboración propia.

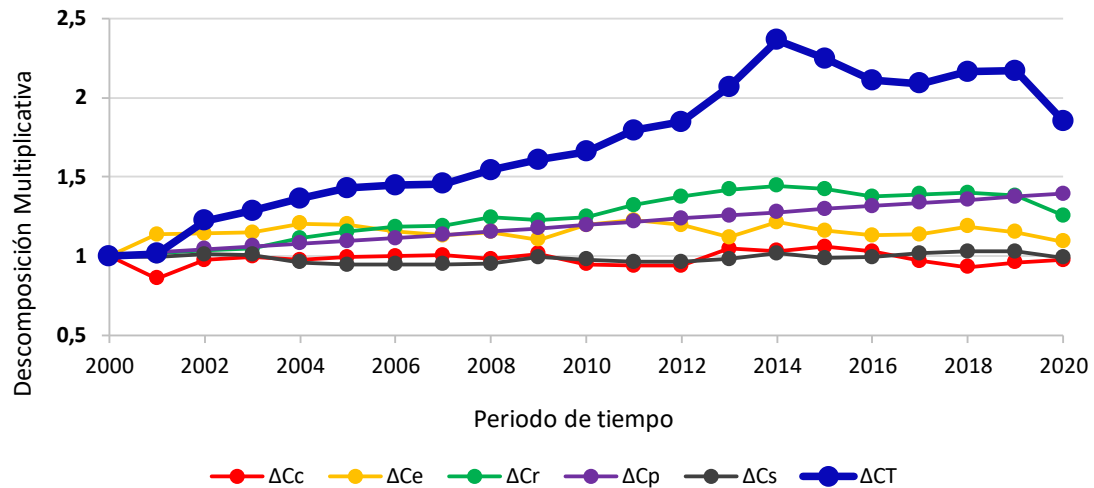


Figura 6: Descomposición multiplicativa LMDI para las variaciones de emisiones de CO₂ en serie anual desde 2000 a 2020. **Fuente:** Elaboración propia.

2.3. Análisis y discusión de resultados

El factor que mayor emisión produjo (figura 3) fue la renta económica per cápita, dado que aportó un valor de 7.017,48 kt de CO₂ durante todo el periodo evaluado, seguido de la población con una participación de 6.935,54 kt de CO₂ y la intensidad energética con una contribución de 3.099,16 kt de CO₂ por motivos que presentó variaciones en su dinámica con respecto al total, la investigación de Ortega, Mena y García [23] presentan resultados similares, la cual indica que el principal factor contribuyente es también la renta económica. Por el contrario, el índice de carbonización contribuyó con una reducción de 850,78 kt de CO₂ la cual resultó de poca relevancia en comparación con los demás factores de estudio, cuyo resultado se refleja en la investigación de Gutiérrez [24], indicando que la intensidad de carbonización muestra una baja contribución de las emisiones; de la misma forma los resultados que se obtienen aplicando el LMDI multiplicativo, se ve representado en términos porcentual (figura 4), donde se indican que las principales variables que contribuyen a las emisiones de CO₂ son la renta económica per cápita con un valor relativo de 38,1 %, la población con 37,6 %, la intensidad energética con 15,3 %, mientras que el índice de carbonización contribuyó con una disminución del 3,8 %; esto se debe a que este método descompone el crecimiento relativo de las variables de estudio. Un aumento en la población en cada año produce un crecimiento económico y por ende una mayor demanda en los productos y servicios de cada sector, estableciendo así un elevado consumo de energía en la fabricación de maquinarias, equipos [25].

En términos generales, la dinámica de la variación total de las emisiones de CO₂ de cada año en relación con el año 2000, refleja la contribución cambiante de cada uno de los factores del modelo LMDI (aditiva), donde podemos notar que el factor de la renta económica (PIB per cápita) indicó ser el principal contribuyente en la variación de las emisiones a partir del año 2006 hasta el 2019 (figura 5). Las emisiones totales tuvieron su valor máximo en el año 2014 de 20.000 kt de CO₂, influenciado por los altos ingresos provenientes de la subida de precio del petróleo en años posteriores próximos [26]. Ecuador al ser un país económicamente menos desarrollado, podrían alcanzar altas tasas de CO₂ con niveles de PIB muy bajos por el alto consumo de derivados de petróleo en algunos subsidiados [27], [28]. De igual manera se puede evidenciar el efecto de cada factor en la metodología LMDI multiplicativa (figura 6), resaltando que el factor que predominó fue la renta económica per cápita con contribuciones entre 22 - 44 %; seguido de la intensidad energética mostrando contribuciones variables entre 12 - 37 % en el periodo de estudio.

3. Conclusiones

La descomposición de los seis sectores comerciales más demandantes del Ecuador que se alcanzó por medio de la utilización del método LMDI permitió conocer cuáles fueron los principales factores que contribuyeron a las emisiones de CO₂ durante los años 2000 – 2019, siendo éstos, la renta económica per cápita y la intensidad energética con aportes totales de 38,1 % y 15,3 % respectivamente, donde el impacto de estos factores muestra la dinámica de los sectores más intensivos en energía y que hacen uso de combustibles de alta carbonización.

Por otro lado, durante el periodo 2000 – 2019 la estructura de la actividad económica contribuyó en menor grado con aportaciones de 629,49 kt de CO₂ que corresponde a un 2,9 % de emisiones producidas, mientras que en el mismo periodo el índice de carbonización registró una reducción de 850,78 kt de CO₂ lo que significa una disminución del 3,8 % en relación de la emisión total en dichos años. Estas disminuciones en las emisiones de CO₂ evidencian una posibilidad de reducción de las emisiones ante el aumento de la demanda de energía para los procesos industriales.

Referencias

- [1] F. N. Plaza Hernández, “Fuentes energéticas renovables en Ecuador. Perspectivas a futuro”, *Polo del Conocimiento*, (Edición núm. 68) vol. 7, no 3, pp. 1382-1394, 2022. URL: <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/3798>
- [2] F.R. Arroyo, L. J.Miguel, “Análisis de la variación de las emisiones de CO₂ y posibles escenarios al 2030 en Ecuador”, *Espacios*, vol. 40, no 13, pp. 5, 2019.
- [3] P. Posso Espinosa, "Emisión de gases de efecto invernadero en las opciones dominantes de movilidad del Distrito Metropolitano de Quito", Maestría en Cambio Climático y Negociación Ambiental, Área de Gestión, Universidad Andina Simón Bolívar, Quito, Ecuador, 2020. URL: <https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/7972>
- [4] M. Córdova Suárez, M. Carrasco, P. Padilla, y E. Garcés Sánchez, “Estudio de la Huella de Carbono en Unidades Desconcentradas de Terminales Terrestres,” *Revista Politécnica*, vol. 41, no. 1 pp. 6, 2018. URL:<http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v41n1/2477-8990-rpolit-41-01-00039.pdf>
- [5] D. Sarango, “Análisis de la relación entre el consumo de energía y las emisiones de carbono en Ecuador”. *Revista Económica*, vol. 4, no. 1, pp. 35-48. 2018, URL: <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/economica/article/view/506>
- [6] ONU, Organización de las Naciones Unidas, Cambio Climático, 14 de marzo de 2022. *Las emisiones mundiales de CO₂ repuntaron en 2021 hasta su nivel más alto de la historia*. Emisiones Mundiales. <https://unfccc.int/es/news/las-emisiones-mundiales-de-co2-repuntaron-en-2021-hasta-su-nivel-mas-alto-de-la-historia>
- [7] Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), *Balance Energético Nacional*. , Ecuador, 2018, URL:<https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/03/Balance-Energe%CC%81tico-Nacional-2018.pdf>
- [8] Consejo Nacional de Planificación (CNP), *Plan Nacional de Desarrollo, Toda una Vida*. Quito, Ecuador, 2017-2021. URL: https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL_OK.compressed1.pdf
- [9] Energía, sociedad y ambiente, *Balance Energético Nacional*, Cap. 1, Refinería Shushufindi Sucumbíos, Ecuador, 2021. https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2022/08/Cap_1_opt.pdf
- [10] D. G. Pérez Darquea, “Estudio de emisiones contaminantes utilizando combustibles locales”, *Innova Research Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 23-34, 2018. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6369767>
- [11] C. Mosquera, J. Chicaiza Vaca, B. Pinza, “Impacto de la pandemia de COVID -19 en el sector del transporte pesado de carga: Empresas de la Provincia de Pichincha como caso de estudio”, *Revista Tecnológica – Espol*, vol. 34, no 2, pp. 214–227, 2022. <https://doi.org/10.37815/rte.v34n2.941>

- [12] A. Gutman y V. Gutman, “Emisiones energéticas e Identidad de KAYA: Nota metodológica”, Documento de Trabajo 05, Fundación Torcuato Di Tella, Argentina, 2017. URL:<http://fdt.cc/wp-content/uploads/2017/08/DT-05-Emisiones-energ%C3%A9ticas-e-Identidad-de-KAYA-Nota-metodol%C3%B3gica.pdf>
- [13] J. S. Gallegos Yaruquí, “Análisis de la evolución de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en Ecuador (1980 - 2010), mediante la Identidad de Kaya”, Trabajo de fin de Titulación, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, 2015. URL:<https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/11557/1/Gallegos%20Yaruqui%20Jessica%20Stefania.pdf>
- [14] A. Mena Nieto, C. Meñaca Guerrero, A. Barrero Romero de la Osa, y M. Bellido Odriozola, “Application of the system dynamics methodology for modeling and simulation of the greenhouse gas emissions (GGE) in Cartagena de Indias (Colombia)”, Área de Proyectos de Ingeniería, Escuela Politécnica Superior, Cartagena de Indias, Colombia, 2009. URL:http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/2721/CIIP09_1159_1176.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [15] A. Castaño Fernández, “Estudio de los factores conductores del cambio climático en base a la identidad de Kaya para un conjunto de países de Iberoamérica. Propuesta de escenarios de futuro”, Trabajo final de grado en Ingeniería Química, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2020. URL:<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/180330>
- [16] Y. Kaya y K. Yokobori, “Environment, energy, and economy: Strategies for sustainability”. *Tokio: United Nations University Press*. 1997
- [17] M. L. Rodríguez Arévalo, “Analysis of the main drivers of CO₂ emissions in different economies: the Spain and Chile cases”, Doctoral Thesis, Programa de Doctorado en Ciencias Económicas, Empresariales y Sociales, Universidad de Sevilla, España, 2018, URL:<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/76275/MemoriaTesisDoctoralsinPublicaciones.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [18] D. Rojas Lozano, “Método para identificación de periodos en análisis de descomposición LMDI de la Intensidad de Carbono del sector eléctrico”, Trabajo de grado de Maestría en Ingeniería eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2020, URL:<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/50984/23659.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [19] B. W. Ang, Ki-Hong Choi. “Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry: A Refined Divisia Index Method”. *The Energy Journal*, vol.18, no.3, pp. 59-73 (15 pages), 1997. URL:<https://www.iaee.org/en/publications/ejarticle.aspx?id=1254>
- [20] B. W. Ang, F. Q Zhang, Ki-Hong Choi, “Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition”. *Energy*, vol. 23, no. 6, pp. 489-495, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00016-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00016-4)
- [21] B. W. Ang, F. L. Liu, “A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation”. *Energy*, vol. 26, no. 6, pp. 537-548, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00022-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00022-6)
- [22] INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos. *Censo de Población y Vivienda 2010*. 2010 <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- [23] G. Ortega-Ruiz, A. Mena-Nieto, J. E. García-Ramos, “Is India on the right pathway to reduce CO₂ emissions? Decomposing an enlarged Kaya identity using the LMDI method for the period 1990–2016”, *Science of The Total Environment*, vol. 737, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139638>
- [24] M. T. Gutiérrez Escajeda, “Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Sector Industrial en el Estado de San Luis Potosí: proyección al 2020 y propuesta de mitigación”, Tesis doctoral en Ciencias Ambientales, Departamento de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. 2015 <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3931>
- [25] C. Vallejo Carpio, “Análisis de Intensidad Energética para los Sectores de Uso Final de la Economía Ecuatoriana”, *Cuestiones Económicas*, vol. 27, no. 2, pp. 29, 2017, <https://estudioeconomicos.bce.fin.ec/index.php/RevistaCE/article/view/59>
- [26] J. P. Martínez Mesías, E. P. Naula Pérez, “El crecimiento económico y el deterioro ambiental en la economía ecuatoriana”, Trabajo de fin de Titulación de Economía, Departamento de Contabilidad y Auditoría, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2020. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/30613>

- [27] D. J. Espinoza y C.J. Viteri, “Análisis económico de la eliminación del subsidio de la gasolina súper en el Ecuador”, *Espacios*, vol. 40, no. 24, pp. 8. 2019
URL:http://www.revistaespacios.com/a19v40n24/19402408.html#_ftn1
- [28] M. T. Gutiérrez Escajeda, P. Medellín Milán, y C.J. Ábrego Góngora, "Factores determinantes de las emisiones de CO₂ asociadas al uso de combustibles en el sector industrial de San Luis Potosí", *Investigación y Ciencia*, vol. 24, no. 68, pp. 22-28, México. 2016. URL: <https://www.redalyc.org/pdf/674/67448742003.pdf>

Como citar este artículo

J.A. Cruzatty Vera, Y. A. Bazurto Solórzano, R. A. Rivadeneira Zambrano, B. J. Carrillo Anchundia. “Análisis de los factores determinantes de las emisiones de CO₂ en Ecuador”. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol.17, no 1, pp. 4-18, 2023. <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt>

Fuente de financiamiento

Los autores declaran que la investigación presentada en este artículo no recibió financiamiento alguno.

Contribuciones intelectuales de los autores

Concepción y diseño del trabajo: JACV, YABS, RARZ.

Revisión de literatura: JACV, YABS.

Recolección de datos: JACV, YABS.

Análisis e interpretación de los datos/literatura: JACV, YABS.

Redacción o revisión crítica del manuscrito: JACV, YABS, RARZ, BJCA.

Todos los autores aprobaron la versión final del manuscrito.