

# Análisis y Modelización de las Emisiones de CO<sub>2</sub> en Colombia

1<sup>st</sup> Andrés García Montoya

*Ingeniería de Sistemas*

*Pontificia Universidad Javeriana*

Bogotá, Colombia

andresgarciam@javeriana.edu.co

2<sup>nd</sup> José Manual Rodríguez Ardila

*Ingeniería de Sistemas*

*Pontificia Universidad Javeriana*

Bogotá, Colombia

josemrodriguez@javeriana.edu.co

**Abstract**—This paper discusses the rise of CO<sub>2</sub> emissions in Colombia due to rapid industrialization and fossil fuel dependency. It emphasizes the pivotal role of systems engineering in mitigating these emissions, using advanced analytical techniques such as cubic splines to analyze and model emission trends, aiding in identifying effective strategies to counteract this environmental and health issue.

**Index Terms**—Carbon cycle, CO<sub>2</sub> emissions, climate change, interpolation, cubic splines

**Abstract**—Este artículo discute el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Colombia debido a la industrialización acelerada y la dependencia de combustibles fósiles. Se enfatiza el papel crucial de la ingeniería de sistemas en la mitigación de estas emisiones, utilizando técnicas analíticas avanzadas como splines cúbicos para analizar y modelar las tendencias de emisión, facilitando la identificación de estrategias efectivas para contrarrestar este problema ambiental y de salud.

**Index Terms**—Ciclo del carbono, emisiones de CO<sub>2</sub>, cambio climático, interpolación, splines cúbicos

## I. INTRODUCCIÓN

Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) han sido parte intrínseca de nuestro planeta desde hace millones de años, desempeñando un rol fundamental en el ciclo de carbono. Este ciclo es un proceso natural y continuo, donde el carbono fluye de manera constante entre la atmósfera, los océanos, los ecosistemas terrestres y los organismos vivos. Sin embargo, las actividades humanas han introducido un desequilibrio significativo en este ciclo. Las emisiones originadas por acciones humanas, han incrementado considerablemente los niveles de

CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Simultáneamente, la deforestación y otras prácticas han reducido la cantidad de árboles, que actúan como receptores naturales de estos gases, lo que ha generado un desbalance aún más crítico en el ciclo del carbono.

Cómo se puede ver en el gráfico de la organización Our World In Data, las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de combustibles fósiles y de la industria en Colombia han exhibido un crecimiento prácticamente exponencial, donde año tras año se puede evidenciar un aumento significativo [1]. Este fenómeno tiene como principal responsable al desarrollo industrial acelerado y la gran dependencia de los combustibles fósiles para la energía y el transporte. Conforme a datos del IDEAM, ha habido un aumento dramático en las emisiones de varios sectores en los últimos 20 años: la industria manufacturera ha visto un aumento del 94%, de 14 a 28 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>; de manera similar, el sector de minas y energía ha visto incrementar sus emisiones en un 85%, de 14 a 25 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>; y, el sector transporte también ha experimentado un crecimiento substancial, con un incremento del 53%, pasando de 18 a 28 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> [2].

Esto es realmente alarmante, debido a que el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> conlleva graves consecuencias. Se puede decir que las principales consecuencias son el cambio climático y la afectación de la salud de las personas. Según lo presentado por El país el CO<sub>2</sub> es el principal impulsor del cambio climático, que se manifiesta en el aumento de la temperatura global, el derretimiento de los glaciares, el aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos, la

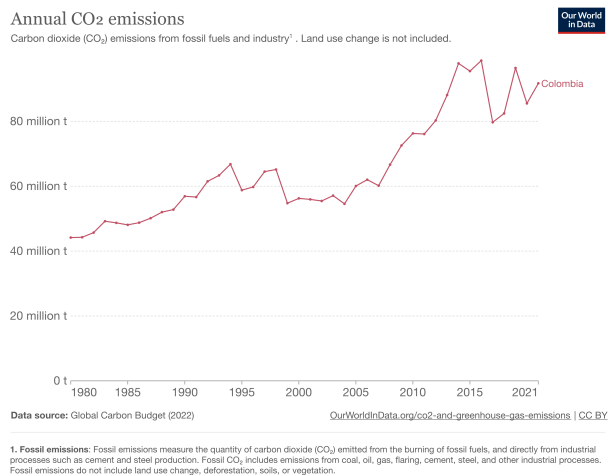


Fig. 1. Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> en Colombia [1]

intensificación de fenómenos meteorológicos extremos, entre otros [3]. Además, en las metrópolis, una alta concentración de estas emisiones se manifiesta en forma de polución atmosférica, presentando serios riesgos para la salud, incluyendo el incremento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Este contexto recalca la urgencia de tomar medidas efectivas para mitigar las emisiones y sus impactos asociados.

Es por esto que disciplinas como la ingeniería de sistemas deben tomar cartas en el asunto. Existe una percepción común de que la web, y el mundo digital en general, operan de manera aislada del entorno físico, sin consumir recursos naturales significativos ni impactar directamente en el medio ambiente; sin embargo, esto no puede estar más lejos de la realidad. La infraestructura de tecnología de internet y telecomunicaciones que es donde reside todo el software que se utiliza día a día, tiene una gran incidencia en la producción de emisiones. Como afirma BBVA la digitalización tiene una falsa etiqueta verde y que este sector es responsable del 2% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> [4]. Por lo que es esencial que los ingenieros de sistemas trabajen para hacer que los sistemas de información y el software diseñado para estos sean lo más eficientes posibles y utilicen de la mejor manera los recursos, reduciendo las emisiones.

Por otra parte, los ingenieros de sistemas poseen habilidades especializadas en el manejo y manipulación de datos. Esto los capacita para analizar, entender y construir modelos predictivos que ilustran el comportamiento futuro de las emisiones de CO<sub>2</sub> utilizando herramientas avanzadas como el apren-

dizaje automático. Al hacerlo, estos modelos pueden facilitar una comprensión más profunda y crear conciencia sobre el crecimiento de las emisiones, promoviendo así la adopción de medidas efectivas y estrategias conscientes para abordar esta preocupante tendencia.

En este contexto, el presente artículo realiza un acercamiento inicial al análisis de datos de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Colombia a lo largo de los años, utilizando el algoritmo de splines cúbicos para la interpolación de un conjunto de datos. Se describirá meticulosamente la metodología empleada, se examinarán y discutirán los resultados obtenidos, culminando con las conclusiones derivadas de este estudio.

## II. MARCO TEÓRICO

Antes de seguir con la metodología empleada para la interpolación y análisis de datos, resulta imperativo enfocarnos en una comprensión más profunda de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Colombia.

El país ha manifestado un crecimiento notable en sus emisiones de CO<sub>2</sub>, alcanzando 77.57 megatoneladas en 2021. Esto no solo denota un aumento del 6,21% respecto al año previo, sino que también sitúa a Colombia en la posición 137 entre 184 naciones evaluadas por el Instituto Mundial de Recursos del Banco Mundial. Sectores como la industria, transporte, agricultura, ganadería y deforestación son los principales contribuyentes de este incremento, influenciados mayormente por una acelerada urbanización y expansión industrial desde finales del siglo XX. Estos cambios han intensificado la dependencia de combustibles fósiles y prácticas insostenibles [5].

Además, es vital mencionar la clara relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y la economía colombiana. Sectores significativos en emisiones también constituyen pilares fundamentales de la economía, como la agricultura y el sector energético, que se destacan por sus altas emisiones de gases de efecto invernadero [6].

Asimismo, las emisiones de CO<sub>2</sub> tienen repercusiones severas en la salud pública, contribuyendo a un aumento de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y otras relacionadas con vectores como el dengue y la malaria. En este sentido, el Instituto Nacional de Salud (INS) atribuye en Colombia 17.549 muertes anuales a factores de riesgo ambiental, siendo

la calidad del aire uno de los principales contribuyentes [7]. La deforestación, por otro lado, aumenta la exposición a enfermedades como la fiebre amarilla y la leishmaniasis, impactando igualmente la calidad del agua y la seguridad alimentaria [8].

Finalmente, frente a estos retos, el gobierno colombiano ha emprendido acciones promoviendo prácticas sostenibles, y se ha comprometido a reducir las emisiones en un 20% conforme a acuerdos internacionales, enfocándose en la adopción de tecnologías limpias y la transición hacia una economía de bajo carbono en consonancia con objetivos de sostenibilidad global [8]. Es fundamental la adopción de estrategias que mitiguen el impacto del cambio climático y promuevan prácticas sostenibles en sectores cruciales de la economía colombiana.

### III. METODOLOGÍA

Para el análisis y modelización de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Colombia, se recurrió al conjunto de datos proporcionado por la página 'Our World In Data' del 2023. Este conjunto de datos refleja las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> en Colombia desde 1980 hasta 2021. Cabe mencionar que al conjunto inicial de datos le faltaban 4 valores arbitrariamente eliminados. Graficando estos datos, se obtiene la siguiente gráfica.

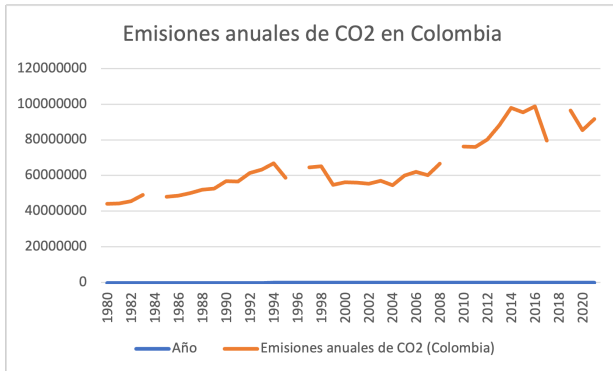


Fig. 2. Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> en Colombia con datos faltantes [1]

Para solventar esta carencia y lograr una reconstrucción precisa de la secuencia de datos, se empleó un método de interpolación basado en el algoritmo de splines cúbicos. Este método se implementó eficientemente utilizando Python, un lenguaje de programación poderoso y versátil, conocido por su aplicabilidad extensiva en la ciencia de datos y análisis estadístico.

Un spline cúbico  $S(x)$  es una función definida a trozos por polinomios cúbicos en cada intervalo  $[x_i, x_{i+1}]$ , y tiene la forma:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (1)$$

donde:

- $a_i = y_i$  es el valor de la función en  $x_i$ .
- $b_i$ ,  $c_i$ , y  $d_i$  son coeficientes que se determinan para que  $S(x)$  sea continua, y sus primeras y segundas derivadas también sean continuas en todo el dominio.

Este algoritmo fue seleccionado por su precisión comparativa frente a otros métodos de interpolación como Newton-Raphson, Secante, Lagrange y Hermite. Este algoritmo tiene una gran capacidad para producir curvas suaves y continuas, permitiendo estimaciones más precisas y coherentes de los valores faltantes en los datos de emisiones de CO<sub>2</sub>, garantizando así una representación más fiel y completa del comportamiento histórico de las emisiones en Colombia.

### IV. RESULTADOS

Los resultados de nuestro análisis se visualizan claramente en la siguiente gráfica, la cual contrasta los datos originales con los obtenidos del algoritmo de splines cúbicos implementado. Una observación inicial revela una concordancia casi perfecta entre ambos conjuntos de datos, destacando la precisión del algoritmo utilizado, ya que los errores aparentes no son prominentes.

En el proceso de interpolación, para los años 1984, 1996, 2009 y 2018, se estimaron las emisiones de CO<sub>2</sub> como 49309995, 58570526, 73418476 y 86005495, respectivamente. Estas cifras se compararon con los datos reales, que fueron 48701540, 59770880, 72556720 y 82426790 para los mismos años. Al calcular los errores relativos, se encontró que estos fueron del 1.2%, 2%, 1.2% y 4.3%, lo que resulta en un error relativo promedio del 2.2%.

Es importante mencionar que los errores son más prominentes principalmente en los años situados dentro de intervalos caracterizados por una mayor volatilidad y fluctuaciones

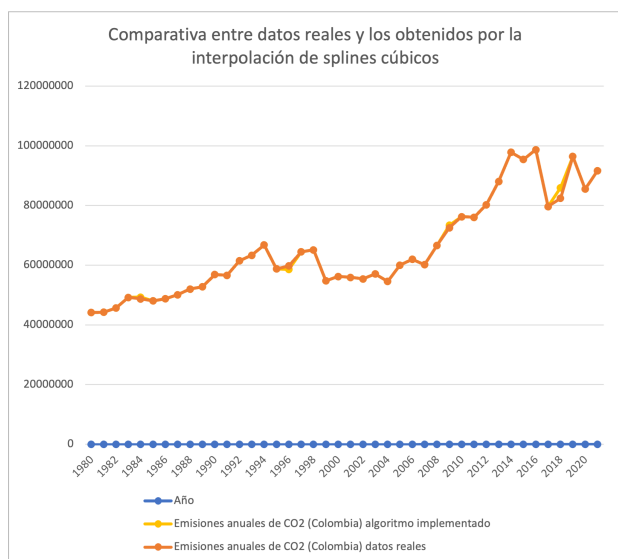


Fig. 3. Comparativa de datos reales y datos obtenidos de la interpolación [1]

drásticas en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Estas fluctuaciones se manifiestan en cambios de pendiente pronunciados, alternando rápidamente entre incrementos y decrementos de emisiones, lo cual naturalmente presenta un mayor desafío para la precisión de la interpolación.

## V. DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se observa que la interpolación de los datos faltantes fue notablemente precisa, con un error promedio inferior al 5%. Esto sugiere que la función interpolada mediante el algoritmo de splines cúbicos representa de manera fiable el comportamiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Colombia. Este enfoque permite una comprensión más profunda del fenómeno, estableciendo una base inicial para predecir las futuras emisiones de CO<sub>2</sub> en el país.

No obstante, el algoritmo presenta ciertas limitaciones, principalmente en la extrapolación de datos, ya que no fue diseñado específicamente para esta tarea. Una estrategia para mejorar la precisión del modelo podría ser incrementar la frecuencia de los datos recopilados, reduciendo el intervalo temporal de años a meses, semanas o incluso días.

Además, la implementación de algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) puede potenciar aún más la capacidad predictiva del modelo. Estos algoritmos, gracias a

su habilidad para manejar grandes volúmenes de datos y adaptarse con el tiempo, permiten identificar patrones complejos de manera más efectiva. Implementando técnicas de aprendizaje automático, se pueden superar algunas de las limitaciones inherentes a los métodos de interpolación tradicionales, facilitando predicciones más precisas y robustas respecto a las emisiones futuras de CO<sub>2</sub> en Colombia.

## VI. CONCLUSIÓN

Para finalizar este artículo, es importante destacar la crítica influencia de las actividades humanas en perturbar el ciclo natural del carbono. Las emisiones de CO<sub>2</sub> se han intensificado, causando un desequilibrio significativo en el ciclo de carbono, impulsado en gran medida por la industrialización acelerada, deforestación y prácticas insostenibles en sectores como la manufactura, minería, energía y transporte en Colombia. Este desequilibrio ha catapultado problemas urgentes como el cambio climático, que amenaza la biodiversidad y la supervivencia de ecosistemas diversos y supone un gran riesgo para la salud de las personas.

En lo que respecta a la metodología utilizada en este análisis, la selección de un conjunto de datos sólido y confiable de 'Our World In Data', junto con la implementación de técnicas de interpolación como el algoritmo de splines cúbicos, ha sido crucial. Esta aproximación ha permitido una estimación más precisa y una reconstrucción fiel de la secuencia histórica de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Colombia, superando las limitaciones presentadas por los datos incompletos y las fluctuaciones notables en las emisiones anuales.

Los resultados obtenidos subrayan la efectividad del método de interpolación utilizado, con un error relativo promedio de 2.2%, lo que refleja una representación confiable y coherente del comportamiento histórico de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Es esencial mencionar las áreas donde existen oportunidades de mejora, tales como la extrapolación de datos y la capacidad de manejar fluctuaciones drásticas en las emisiones, sugiriendo el potencial de optimización y refinamiento en la metodología aplicada.

Mirando hacia el futuro, este trabajo sugiere la implementación de algoritmos de aprendizaje automático y el aumento de la frecuencia de los datos recopilados como estrategias promisorias para mejorar la precisión y la ro-

bustez de las predicciones relativas a las tendencias futuras de las emisiones de CO<sub>2</sub>. En última instancia, estos hallazgos y recomendaciones buscan informar y orientar políticas y estrategias más efectivas, que aspiren a mitigar el impacto ambiental y promover un futuro más sostenible.

## REFERENCES

- [1] "Annual CO emissions", Our World in Data. Accedido el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?time=1980..2021country=COL>
- [2] "En 20 años Colombia aumentó en un 15% sus emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes ELIMINACIÓN DE DOCUMENTOS POR VIGENCIA SEGÚN EL TIEMPO DE RETENCIÓN DEL ARCHIVO CENTRAL - NOTICIAS - IDEAM", IDEAM - IDEAM. Accedido el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: [http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset\\_publisher/LdWW0ECY1uXz/content/en-20-anos-colombia-aumento-en-un-15-sus-emisiones-de-co2-equivalentes](http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/LdWW0ECY1uXz/content/en-20-anos-colombia-aumento-en-un-15-sus-emisiones-de-co2-equivalentes)
- [3] M. PLANELLES, "El CO<sub>2</sub> en el cambio climático — La Cumbre del Clima en EL PAÍS", EL PAÍS. Accedido el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://elpais.com/especiales/2019/el-co2-en-el-cambio-climatico/>
- [4] "Ignorando el impacto climático de las Tecnologías digitales — OpenMind", BBVA OpenMind. Accedido el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medioambiente/impacto-climatico-tecnologias-digitales/>
- [5] Repositorio Institucional UDCA. Accedido el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/4706/MO-Alvarez-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] P. V. Sosa, "Vista de Crecimiento, complejidad económica y emisiones de CO<sub>2</sub>: un análisis para Colombia", Revistas Universidad Santo Tomás - Colombia. Accedido el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://revistas.usantotomas.edu.co/index.php/cife/article/view/6039/5872>
- [7] M. Ledezma Rodríguez, "Marco de análisis del mecanismo de desarrollo limpio y las oportunidades del mercado del carbono para el desarrollo de Colombia", Scielo, vol. 8, n.º 1, 2013.
- [8] "Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible", Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Accedido el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/estrategia-colombiana-de-desarrollo-bajo-en-carbono-ecdbc/>