


DESARROLLO SOSTENIBLE EN COLOMBIA: REALIDAD ANTE EL CONSUMO DE ENERGÍA Y EL CRECIMIENTO ECONÓMICO*Sustainable Development in Colombia! Reality before the consumption of energy and economic growth***Gabriel A. Torres Díaz**

Universidad de la Costa

Colombia


gtorres6@cuc.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0002-3002-7664>**Derlis Aminta Villadiego Rincón**

Universidad de la Costa

Colombia

dvilladi3@cuc.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0002-5221-6706>

Este trabajo está depositado en Zenodo:


DOI: <http://doi.org/0.5281/zenodo.5980201>

DD:492-505

Alex Alberto Castellar Rodríguez

Grupo Gicnex, Colombia


acastell6@cuc.edu.co

 <https://orcid.org/0000-00026637-3921>**Pedro Jessid Pacheco Torres**

Grupo de Investigación CRIDI

Colombia

ppachecot@unireformada.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0002-7609-4598>**RESUMEN**

El objetivo de esta investigación es determinar estadísticamente la relación existente entre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) expresados en CO₂eq con el consumo de energía y crecimiento económico en Colombia entre los años 1988 y 2019. Se utilizó en la investigación el enfoque cuantitativo correlacional de variables lineales con información proveniente de la plataforma EDGAR, los datos fueron procesados en el programa SPSS a través de correlaciones y regresiones lineales simples bajo el enfoque de Pearson. Los resultados permitieron obtener que las emisiones de CO₂eq y el consumo de energía durante el lapso presentan un alto grado de correlación y significancia del modelo estadístico, que permitió obtener la ecuación de predictibilidad, mientras que la correlación entre las emisiones de GEI per cápita y el consumo de energía per cápita es baja, razón por la cual no se corrió el análisis de regresión lineal.

Palabras claves: GEI, consumo de energía, correlación, regresión

ABSTRACT

The objective of this research is to statistically determine the relationship between greenhouse gas (GHG) emissions expressed in CO₂eq with energy consumption and economic growth in Colombia between 1988 and 2019. The quantitative approach was used in the research correlational of linear variables with information from the EDGAR platform, the data were processed in the SPSS program through correlations and simple linear regressions under the Pearson approach. The results allowed obtaining that CO₂eq emissions and energy consumption during the period present a high degree of correlation and significance of the statistical model, which allowed obtaining the predictability equation, while the correlation between GHG emissions per capita and the per capita energy consumption is low, which is why the linear regression analysis was not run.

Keywords: GHG, energy consumption, correlation, regression



INTRODUCCIÓN

Al estudiar la relación existente entre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), con el consumo de energía y crecimiento económico de Colombia, se debe tener en cuenta que el país es un territorio considerado verde, que posee una pluridiversidad biológica que ocupa los primeros lugares del mundo en naturaleza viva, además ha mostrado en las últimas décadas un crecimiento económico en sus indicadores macro alrededor del 4.0%, con demanda proyectada del Producto Interno Bruto (PIB) para el año 2030 en el mismo orden, adicionalmente su producción de energía proviene en su mayoría de fuentes renovables, como la hídrica. Sin embargo, el país ha visto aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en los últimos años según las mediciones realizadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, (IDEAM) soportada por la metodología usada en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, acordada en la Convención Marco de Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático, (CMNUCC), donde Colombia es signataria.

Esta investigación se plantea determinar estadísticamente la relación existente entre las emisiones de GEI totales, per cápita y por cada 1.000 USD del PIB con el consumo total y per cápita de energía, buscando una correlación proporcional de estas variables bajo el enfoque del método de correlación y regresión lineal simple de Pearson. Los datos publicados por el IDEAM hasta la fecha solo están expresados hasta el año 2014 en el

Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia ante CMNUCC, por lo que fue necesario utilizar los datos provenientes de la plataforma EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research) que administra la Comisión Europea para el Cambio Climático, esta plataforma tecnológica almacena data ambiental hasta el año 2019 de cada país del mundo, con fuentes directas originarias de los sectores oficiales de cada nación.

METODOLOGÍA

Se utilizó como metodología en la investigación el enfoque cuantitativo correlacional de variables lineales, el consumo de energía total y consumo per cápita de energía en Colombia como variables independientes y se confrontaron con emisiones de totales CO₂eq totales, emisión de CO₂eq per cápita, emisiones de CO₂eq por cada 1000 USD del PIB colombiano, como variables dependientes. Los datos fueron procesados estadísticamente con el programa SPSS. A estas variables se determinó las medidas de tendencia central, estos fueron adicionalmente a partir de las variables primarias se generaron variables secundarias referidas a las variaciones porcentuales de cada una para observar los incrementos por año y los valores de media ponderada en 31 años.

Los datos procesados provienen de la plataforma EDGAR, esta contiene datos con información ambiental, económica, energética y demográfica de Colombia, la cual es suministrada por el sector oficial, y es actualizada todos los años. La plataforma es mantenida por el Centro Común de Inves-



tigaciones de la Unión Europea (JCR, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es prestar soporte a la comunidad científica y académica internacional en la ejecución de investigaciones que sirvan de apoyo a los gobiernos en la formulación de políticas dirigidas a la producción de energías alternativas que mitiguen las emisiones de GEI para ayudar a detener el alto crecimiento porcentual del cambio climático. (Comisión Europea, diciembre-12, 2020).

Los datos de GEI totales por año se graficaron en diagramas para observar la línea de tendencia. También se confrontaron los datos de consumo de energía con emisiones de CO₂eq totales para observar la relación de incremento de emisiones de GEI y consumo de energía ante el aumento de la demanda. Además, para observar impactos ante el aumento de la población en el país, se confrontó el consumo de energía per cápita con emisiones de CO₂eq per cápita. Se graficaron también, la emisión de CO₂eq en Kg por cada 1.000 USD del PIB de Colombia y emisión per cápita de CO₂eq, para medir la eficiencia medioambiental que se produce a los largo del tiempo producto de los ajustes y medidas de mitigación ejecutada por el país en el área productiva.

Adicionalmente se utilizó el método estadística bivalente bajo el enfoque correlacional de Pearson para el procesamiento de los datos que permitió vincularlos variables simultáneamente. A tal efecto, se ejecutaron correlaciones y regresiones lineales simples, para determinar la relación existente y la predictibilidad del com-

portamiento de emisión de GEI en el futuro cercano. Mediante las correlaciones se determinaron el coeficiente de correlación (r) y la intensidad de correlación, que al resultar correlativas, positivas o negativas, se corrieron en el programa las regresiones lineales simples que permite conocer el coeficiente de determinación R^2 que indica la significancia del modelo. También se obtiene la función matemática lineal que permitirá predecir el comportamiento de las emisiones totales de CO₂eq frente a las variaciones del consumo total de energía. Finalmente se obtiene el modelo matemático de predictibilidad de consumo de energía per cápita frente a las emisiones per cápita de GEI.

GEI, FUENTES DE EMISIÓN Y ABSORCIÓN

El dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) es el significado utilizado universalmente para designar cada uno de los gases de efecto invernadero (GEI), que producen potencialmente cambios climáticos debido al efecto del calentamiento global. Existen una gran diversidad de fuentes de emisión y absorción de CO₂eq, éste representa la sumatoria de los equivalentes a: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido de nitrógeno (N₂O), clorofluorocarbonados (HFC), hexafluoruro de azufre (SF₆) y perfluorocarbonados (PFC). El dióxido de carbono (CO₂) no es el que produce más efectos sobre el calentamiento, los otros GEI son convertidos a valor equivalente.

El efecto de calentamiento total a lo largo del tiempo, está definido por el potencial de calentamiento global



que produce 1 kg de un GEI, en comparación con el causado por el CO₂. De esta manera se referencia el efecto de calentamiento de los demás gases y adicionalmente también se determina los periodos de permanencia de cada gas en la atmosfera (Greenfacts, enero-05, 2021). Los resultados de los GEI distintos del dióxido de carbono CO₂, en sus valores equivalente son convertidos utilizando una fórmula que multiplica la masa del gas por su potencial de calentamiento global, siendo la unidad de medición de CO₂eq la tonelada. La tabla 1, muestra el potencial de calentamiento global de cada GEI, siendo el CO₂ igual a 1, debido a la referencia explicada. Para entender el significado, un ejemplo sería: el metano es 21 veces más potencialmente calentador que el CO₂.

Tabla 1.
Potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero, GEI

Gas de Efecto Invernadero, GEI	GWP
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21
Óxido Nitroso (N ₂ O)	296
Perfluorocarburos (PFC)	120 – 12.000
Clorofluorocarbonos (HFC)	5.700 – 11.900
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	22.200

Fuente: GreenFacts (05 de enero de 2021). <https://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/potencial-calentamiento-global.htm>

El dióxido de carbono (CO₂) es el GEI que común y frecuentemente es expelido en mayores cantidades a la atmosfera, producto de las diversas actividades antrópicas como: producción de energía, industria manufacturera, transporte, deforestación y otras actividades: Los otros GEI se expulsan en menores cantidades, sin embargo, tienen un efecto más no-

civo porque absorben con más facilidad la radiación térmica que emite la superficie planetaria. Esa radiación es luego devuelta a la superficie y a la atmósfera, lo que provoca un incremento de la temperatura. El crecimiento demográfico, que lleva consigo mayor industrialización, producción de energía de fuentes fósiles y prácticas agrícolas más intensivas ha contribuido a la mayor tasa porcentual de expulsión de GEI a la atmosfera. Se ha determinado que el GEI más abundante es el CO₂, que resulta de la quema de combustibles fósiles para producir energía, y este representa más de 66% del total expulsado al atmosfera, (ONU, 2021)⁵.

Las emisiones globales de CO₂eq durante la última década del 2010 aumentaron a un ritmo promedio anual de 1,5%, solo se mantuvieron estable en el lapso 2014-2016. Para tener una idea cuantitativa de las emisiones, el año 2018 representó una cifra sin precedentes de emisión al contabilizar 53.3 Gt CO₂eq y para el año 2019 el ritmo interanual de aumento fue más pronunciado y representó un incremento de 2.6%, ubicando la emisión de masa a la atmosfera en 54.68 Gt CO₂eq, (ONU, 2019). Este incremento

5 La ONU ha establecido que: "...Los gases de efecto invernadero (GEI) se producen de manera natural y son esenciales para la supervivencia de los seres humanos y de millones de otros seres vivos ya que, al impedir que parte del calor del sol se propague hacia el espacio, hacen la Tierra habitable. Después de más de un siglo y medio de industrialización, deforestación y agricultura a gran escala, las cantidades de gases de efecto invernadero en la atmósfera se han incrementado en niveles nunca antes vistos en tres millones de años. A medida que la población, las economías y el nivel de vida — con el asociado incremento del consumo — crecen, también lo hace el nivel acumulado de emisiones de ese tipo de gases" [Publicación web: <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change/>]



representa un indicador peligroso, ya que los científicos han advertido que en incremento anual de 3% hasta el 2025 llegaría a un punto de no retorno para la salvación al planeta Tierra. Con la llegada de la pandemia del Covid-19, debido a los cierres parciales de la economía global se ha desacelerado las emisiones de GEI, a tal punto que se estima que para el año 2020 las emisiones de CO₂eq podrían descender entre un rango de 2% a 12% en el 2020, en promedio 7% en comparación con los índices del 2019, (Ídem).

Para el año 2019 a nivel global, los principales países emisores de GEI son China, Estados Unidos, los 27 integrantes de la Unión Europea, el Reino Unido y la India han contribuido con el 55% de las emisiones. Como dato importante los países más desarrollados del planeta agrupados en el G-20 generan un total del 78% de las emisiones, (Ídem). Este indicador representa una desproporcionada desigualdad en función de los más de 200 países del planeta. Según estudio de la Comisión de la Unión Europea Sobre el Cambio climático, para el año 2018 el total de producción global de CO₂ estuvo en el orden de 33.143. 836 kt. China el mayor productor par ese mismo año expulsó a la atmosfera 11.535.200 kt CO₂; mientras que Estados Unidos expulsó 5.107.261 kt de CO₂; Colombia con sus 49 millones de habitantes ocupó el puesto 47 con 86.550 kt de CO₂, (Muntean, et al., 2018).

Las actividades socioproductivas varían por continentes o por país y las emisiones de GEI va de acuerdo a factores como: tipo de desarrollo

económico y estilo de vida de la sociedad en general. Ejemplo la Unión Europea para el año 2017 expulsó a la atmosfera 4.323.163 de kilotoneladas de CO₂eq, exceptuando los provenientes del uso de la tierra, cambio de uso y la silvicultura, que porcentualmente se presentan en los siguientes sectores: energía 80,70%; procesos industriales y uso del producto 7,82%; agricultura 8,72% y gestión de residuos 2,75%. Siendo los principales países emisores: Alemania, (906.611 KtCO₂eq); Reino Unido, (470.509 KtCO₂eq); Francia, (464.593 KtCO₂eq); Italia, (427.708 KtCO₂eq) y Polonia (413.781 KtCO₂eq), resultando ser el dióxido de carbono el responsable de 81% de las emisiones para ese año, el metano 11%, óxido nitroso 5%, hidrofluorocarburos 2% y el resto menos de 0.2%, (Parlamento Europeo, 2018).

También es cierto, que así como existe la emisión de CO₂, también la naturaleza es capaz de absorber por sí sola el carbono, proceso que produce la regulación de la temperatura en el planeta. Para tal función reguladora existen los llamados sumideros de carbono naturales, como los bosques, suelos y los océanos. Los primeros son considerados las principales trampas y sumideros de CO₂, a través de la dinámica de las olas, los organismos como el plancton, los corales, peces, algas y otros absorben más del 50% del CO₂. Los bosques primarios realizan la captura del carbono a través de la fotosíntesis, las plantas absorben CO₂ de la atmosfera, almacenan cierta cantidad y devuelven oxígeno a la atmosfera, (Arango, 2011, p. 20). Esta función primigenia planetaria se ha



estado deteriorando progresivamente por la intervención humana, con la destrucción de especies marinas, arrecifes coralinos y la deforestación continua en las zonas de reservas y patrimonios naturales de la humanidad.

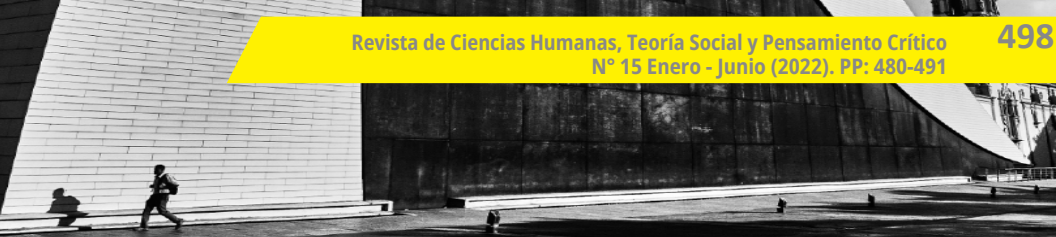
En Colombia, a raíz de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Acuerdo de París-1994, se crearon compromisos de monitoreo del ambiente y reducciones de GEI, a través del Instituto de Ambiente y Meteorología, IDEAM, ente adscrito al Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sustentable (MADS), quien es responsable del apoyo técnico y científico del sistema nacional ambiental, además tiene como función, producir información y datos confiables sobre las emisiones de GEI en el país. A tal efecto para el año 2016 realizó la entrega del Inventario Nacional y Departamental de Gases de Efecto Invernadero, Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático en Colombia con información desde el año 1990 hasta el 2012. En el reporte se expresan la producción de los diferentes GEI por sectores a nivel nacional y también sectoriza los datos por departamentos del país. Adicionalmente se han consignado dos actualizaciones bienales del inventario de GEI en Colombia.

En los reportes de actualización oficiales en Colombia, corresponde a datos e indicadores de emisión de GEI, sectores responsables, junto medidas de mitigación y otros aspectos, presentados en el primer Reporte

Bienal de Actualización de Colombia en el año 2015 ante la CMNUCC. El reporte se elaboró en trabajo conjunto entre el IDEAM con apoyo del Programa de Desarrollo Sustentable de Naciones Unidas, (PNUD), Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sustentable de Colombia, (MADS), Dirección Nacional de Planificación, (DNP) y La Cancillería de Colombia.. También se entregó el Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia en el año 2.018. Los reportes contienen indicadores e inventarios de GEI. De manera de sostener el compromiso creado en el acuerdo de París de 2015 como signatario de la CMNUCC.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El aumento de las emisiones de GEI en Colombia en los últimos 30 años mostró una tasa promedio de aumento de 1,6%, muy inferior de la media en Latinoamérica, las emisiones para el año 2017 fueron 77.531 de Kts, estas se ubicaron por debajo de Brasil, México, Argentina y Venezuela, en general la región produce el 5% de las emisiones globales (Comisión Europea, 2018). El promedio de emisión en ese mismo lapso fue de 64.524 Kts de CO₂eq al ir de 49.555 Kts de CO₂eq en 1.988 a 86.550 Kts en el 2019 (figura 1a). Es de particular importancia, el hecho que, después de la firma del compromiso de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en el año 2015 en París, hubo una reducción drástica significativa de las emisiones hasta el año 2018, y durante el año 2019 hubo un aumento de alrededor de 10,9% en las emisiones motivado al crecimen-



to del sector transporte y la deforestación en el territorio colombiano. Como corolario, Colombia para el año 2015, las emisiones representaron solo el 0.4% del total de GEI global, (IDEAM-PNUD, 2018, p. 132).

Según la Unidad de Planeación Minero Energética, (UPME), entedel Ministerio de Minas y Energía, que es la unidad administrativa del gobierno colombiano en materia de energía, el consumo de energía primaria en Colombia para el año 2018 fue de 363.333,3 GWh, distribuidos de la siguiente manera: sector transporte un 40%; un 22% del sector industrial; un 20 % del sector residencial; un 6% del sector comercial y público y otros sectores con un 12%, (UPME, 2019, p.12). Como se indica en los números la balanza energética de consumo del país está inclinada hacia la productividad y la movilidad de personas, por ende a la producción de bienes de consumo y a otros procesos productivos del país. Por tal motivo estos sectores con la co-responsabilidad de la deforestación son los principales emisores de GEI a la atmosfera.

Cuando se grafican el consumo de energía y emisiones de CO₂eq, se observa un crecimiento proporcional paralelo desde el año 1988 hasta aproximadamente el año 2004, solo en los años 2013 al 2015 las emisiones estuvieron en el orden de 238.335 Kts, representado un aumento de 12,5% con respecto al trienio que lo antecedió. Este dato es casi concordante liberalmente con lo reportado por el IDEAM-PNUD,(2018, p. 100),en el Segundo Informe de Actualización

del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, (INGEI), que reportaron un aumento de casi 10% y una participación del sector de energía de 35%. Estos indicadores para el siguiente trienio se desvincularon en menor porcentaje y se fueron a la baja, aunque el consumo y la demanda de energía siguió creciendo, las emisiones de CO₂eq disminuyeron hasta tal punto que hasta el año 2018 su variación porcentual fue negativa y paso de 89.038 Kts en el año 2016 a una emisión de 77.531 Kts de CO₂ en el año 2017, con una variación negativa de -12.92% y para el 2018 se expulsaron unas 77.988 Kts para una variación interanual de 0.59% (figura 1b).

Figura 1a
 Emisiones de CO₂eq expresadas en Kts en Colombia durante los años 1990-2019

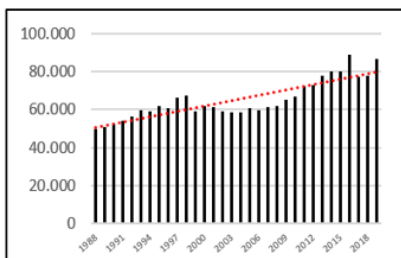
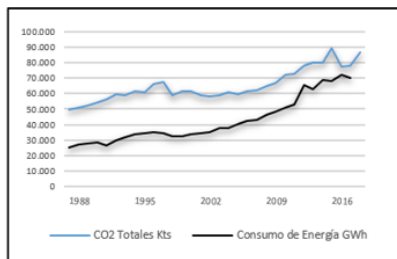


Figura 1b
 Representación de consumo de energía eléctrica (GWh) y emisiones de CO₂eq Kts en Colombia desde 1988 hasta el 2019





Nota: El grafico fue elaborado a partir de los datos de Muntean et al, del reporte: Fossil CO₂ emissions of all world countries 2018. European Commission

Para el año 2019 las emisiones de GEI se incrementaron sustancialmente, fue de 10.98% con respecto al 2018, estuvo en el orden de 86.560 Kts, probablemente activadas por la creciente tasa de las actividades en tierras forestales, que aportan 33% de las emisiones, en estas se incluye la deforestación, cuyo aporte es de 25%, conjuntamente con el uso de leña, actividades propias agropecuarias que han crecido en los últimos años en Colombia (Ídem). De esta manera, el aumento de los parches de deforestación desequilibra el balance fotosintético O₂-CO₂, altera el equilibrio hídrico y el ciclo hidrológico, esto se convierte en agente facilitador de emisiones GEI. En este sentido el mismo IDEAM ha reportado tasa de deforestación de 230.000 hectáreas en 2017, principalmente en Amazonía Colombiana donde esta actividad esta in crescendo en la actualidad.

A pesar que la población colombiana ha crecido un 52% al pasar de 32.764.000 habitantes en 1988 a 49.834.000 en 2018, no presenta una variación importante en las emisiones per cápita que solo varió 5.3% en 30 años, de 1.50 de CO₂eq t per cápita en 1988 a 1,58 CO₂eq t en el año 2018, mostrando un aumento porcentual interanual de 0.30%. Esto indica que ante el aumento de la población y de los sistemas productivos del país, se han tomado medidas de mitigación de emisiones de GEI. En el mismo orden

de ideas, el consumo de energía ha ido en aumento progresivo, manteniendo un crecimiento anual de 2,16%, siendo los picos más altos los años 2017 y 2018 al estar en 1464,5 KWh y 1408,0 KWh de consumo de energía per cápita, (figura 2a). A partir del año 2000 la curva de emisiones de GEI per cápita y consumo energético per cápita mostraron tendencia a desvincularse, al ir el consumo energético per cápita a un crecimiento promedio de 0,44% y la emisión de GEI per cápita a 3,04%

Figura 2a

Consumo per cápita de energía (GWh) y emisiones per cápita de CO₂eq Kts en Colombia desde 1988-2019

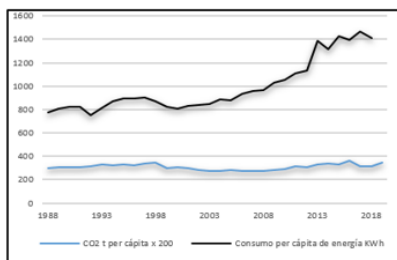
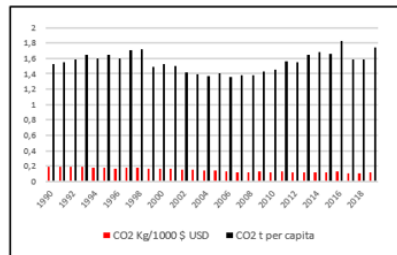
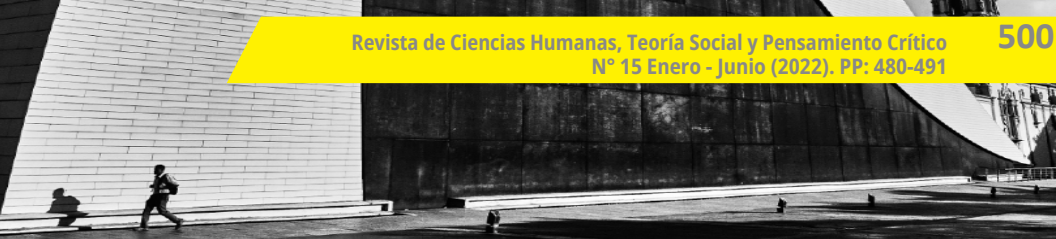


Figura 2b

Valores de emisión de CO₂ en Kg por cada 1.000 USD del PIB de Colombia y emisión per cápita de CO₂ expresada en toneladas. Años 1990-2019





Nota: En la figura 2a la emisión per cápita de CO₂eq fue magnificado x 200 veces para visualizar el comportamiento de la curva. Los gráficos fueron elaborado a partir de los datos de Muntean et al, del reporte: Fossil CO₂ emissions of all world countries. European Commission.

En los últimos años los indicadores del PIB de Colombia muestran un crecimiento positivo desde 1988 al 2019, excepto en el año 1999 que tuvo un balance negativo, (DANE, 2020). Para la interpretación, se confrontaron los valores de emisiones de CO₂Kg por cada 1.000 USD del PIB con las emisiones de CO₂eq t per cápita. Los resultados muestran que las emisiones de CO₂Kg por cada 1.000 USD del PIB tuvieron tendencia hacia la baja, disminuyeron de 0.19 a 0.12, lo que indica que mientras la economía creció por cada 1000 USD la emisión de CO₂eq disminuyó indicando un cierto nivel de eficacia medio ambiental en los procesos productivos. En tanto las emisiones de CO₂eq per cápita mantuvo un ritmo más o menos estable, con variación interanual de 0.30%, (figura 2b). Todo indica que mientras las emisiones totales de CO₂eq crecieron, al igual que el PIB se optimizaron los procesos relacionados con la productividad y la mitigación de las emisiones en este sector fue tratada convenientemente.

La economía colombiana entre 2002 y 2014 tuvo un crecimiento promedio anual de 4,5%, siendo su mayor expansión desde el período 2004 al 2006, con un promedio de 6,06% impulsado por la recuperación de la industria y la construcción, el fortalecimiento del comercio y la banca, y el precio alto de las materias primas, en particular, el petróleo, con niveles de precios que alcanzaron su punto máximo entre 2010 y 2014, período durante el cual el precio promedio se ubicó en 108 USD/barril, (UPME, 2019, p. 24). Los promedios de crecimiento económico más bajos fueron durante los años 2008 y 2009 producto de la crisis económica global y durante los años 2017 y 2018 que el PIB cayó a un 1,94%. En ese sentido el sector minero-energético en Colombia contribuyó con 29,40 CO₂eq Mt de emisiones GEI en el año 2010, este indicador no representó una relación proporcional con respecto al PIB, de hecho durante los años 2009 al 2011 el sector creció a un ritmo de 8,8% a pesar de la crisis global que repercutió en Colombia (Ibíd., p. 25).

Las correlaciones lineales simple entre consumo de energía eléctrica y emisiones totales de CO₂eq y por otro lado, el consumo de energía per cápita y emisiones de GEI per cápita (figuras 3a y 3b), mostraron un índice de correlación $r=0,93$ para la primera correlación, lo que indica una clara y consistente relación positiva perfecta entre las dos variables y por consiguiente a mayor consumo de energía, mayores son las emisiones de GEI a la atmósfera. Mientras que la correlación entre el consumo de energía per cápita y emisiones per cápita de CO₂eq, resultaron en un $r=0,41$ que muestra una relación de muy débil a moderada, lo que indica que no se considera significativa la relación del consumo per cápita de energía de la población colombiana con las emisiones per cápita

de la población colombiana con las emisiones per cápita

de GEI. La ecuación de predictibilidad para la segunda correlación presenta un error de moderado a alto por lo que no tiene uso como modelo estadístico, significa entonces que las emisiones per cápita de CO₂eq en Colombia no están relacionadas con el consumo de energía per cápita.

Figura 3a

Correlación y regresión lineal simple entre las variables: consumo de energía y emisiones de CO₂eq en Colombia

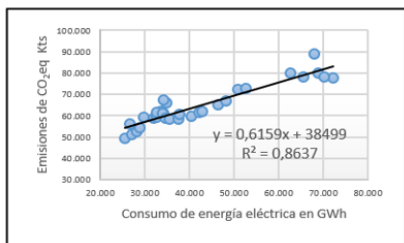
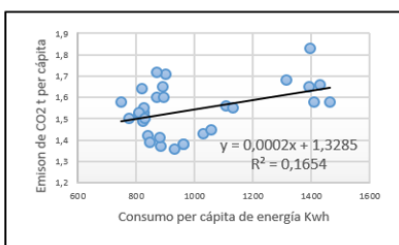


Figura 3b

Correlación y regresión lineal simple entre las variables: consumo de energía per cápita y emisiones per cápita de CO₂eq en Colombia.



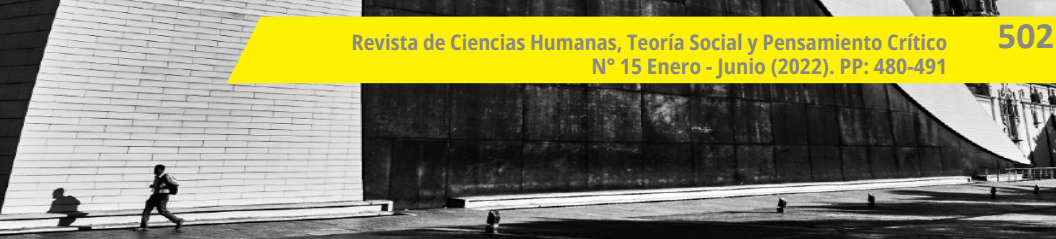
Nota: La regresión lineal simple fue elaborado bajo el modelo de Pearson para obtener el coeficiente de determinación y la ecuación matemática lineal. Los datos son provenientes del informe: Muntean, et al. (2018). Reporter: Fossil CO₂ Emissions of all World Countries. European Commission

Para las variables correlacionadas de emisión total de GEI y consumo de energía, los resultados de la regresión lineal simple permitieron determinar el modelo matemático y ajustar la ecuación de predictibilidad:

$$y = 0,6159x + 38.499$$

Además se obtuvo el coeficiente de determinación $R^2 = 0,86$ para un buen ajuste matemático y teórico del modelo estadístico, indicando que la variación de emisión de CO₂eq dependerá en un 86% del consumo total de energía. Se obtuvo también una gran significancia del modelo estadístico, al obtener un valor crítico de $F > 0,05$. Interpretando la significación individual del modelo estadístico tenemos que los coeficientes de la ecuación resultan en, para un valor la variable independiente de $x = 0$ de Gwh consumido, la variable dependiente o sea las emisiones GEI serán de, $y = 38.499$ CO₂eq y para un consumo de energía de $0,62$ GWh aumenta en valor en una unidad de emisión de CO₂eq t, siendo la probabilidad para ambos coeficientes menores a $0,05$ interpretándose una buena significancia individual del modelo estadístico de Pearson.

Es importante destacar, que en los años noventa la economía colombiana alcanzó puntos extremos del ciclo económico. Después de registrar crecimientos promedio de $5,1\%$ durante la primera mitad de esa década, el crecimiento económico se desaceleró, y en 1999 tuvo la mayor caída registrada en cerca de 100 años, con una contracción de $-4,2\%$, (Banco de la República de Colombia, 2006, p. 4).



Durante ese periodo el consumo de energía disminuyó pero no al ritmo de la recesión. Es importante sustentar que la generación de energía en Colombia, depende principalmente de fuentes hídricas en un 62%, el resto del carbón, gas natural y otros derivados del petróleo, en los últimos años han surgido proyectos de fuentes alternativas verdes de energía. Sin embargo las emisiones de CO₂eq se mantuvieron en aumento con tendencia estandarizada, lo que implica nuevamente que las emisiones pudiesen provenir de otras fuentes, como del transporte, la deforestación y uso agropecuario de la tierra.

Sin embargo, estadísticamente se estableció a través de la correlación y regresión, la relación existente del crecimiento de las emisiones de GEI con el consumo de energía. Por esta razón, se utilizó la ecuación de regresión para evaluar la predictibilidad de las emisiones de CO₂eq y observar la alineación de los parámetros de fuentes oficiales colombianas, como: proyección de la demanda de energía, PIB, temperaturas medias y crecimiento poblacional, (tabla 2). En las proyecciones de demanda de energía se utilizó un escenario medio determinado por UPME, no diferenciado de la metodología 266 que es un escenario en el que el gobierno colombiano está comprometido con los logros de las metas de los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) de la Agenda 2030 de la ONU para el crecimiento con sostenibilidad, que se traduce en su esfuerzo para la reducción de emisiones de GEI.

Tabla 2
 Predictibilidad a partir de la regresión lineal simple para determinar las emisiones de CO₂eq con la proyección de demanda de energía eléctrica en Colombia

ANO	2023	2025	2027	2029	2031
Proy. de demanda energía, escenario medio GWh	81.917	85.971	90.514	95.504	101.043
Proy. del PIB MM COP	660.722	699.659	743.740	791.003	840.697
Proy. de temperaturas medias °C	24,19	24,26	24,33	24,32	24,39
Proy. de población Mhab	51.244	51.854	52.409	52.907	53.347
Predicción de CO₂eq t (ecuación de regresión)	88.952	91.449	94.247	97.319	100.731

Nota: Los datos de la proyección de demanda de energía fueron tomados de UPME-2017, los datos de la proyección del PIB del DANE cálculos UPME, los datos de temperatura de IDEAM-2015 y los de población ONU-2017

Finalmente si comparamos, el consumo de energía en Colombia por sectores, para el año 1975, el sector residencial representaba el primer consumidor de energía con un 46%, seguido del sector transporte que consumía un 20%, industrial 19%, el sector terciario 7% y agricultura, construcción y minería en su conjunto consumía el 7%. Para el año 2018 el consumo de energía por el sector transporte aumento más de 100% al pasar a un 49% del total nacional, mientras que el sector industrial solo aumento un 5% para un 24%, y el residencial disminuyó su consumo a más de la mitad con un 22%, (UPME, 2019, p. 10). Significa entonces, que el sector transporte tuvo un crecimiento voraz, pasó a ser proporcionalmente el principal emisor de GEI a la atmosfera, que en total ascendieron de 34.292 CO₂eq en el año 1975 a 77.988 de CO₂eq en el año 2018. (Muntean, et al., 2018). En base a estos indicadores se puede interpretar factores multivariados que van a la par, como responsables de las



emisiones.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos procesados, cuando el país se comprometió con la CMNUCC en el año 2015 en París, hubo una reducción drástica de las emisiones de CO₂eq desde el año 2016 al 2018, que representó un 12,4% al pasar de 89.036 a 77.968 Kts, representando una disminución importante de la meta planteada de 20% en el marco de la misma convención para el año 2030. Para el periodo de estudio el crecimiento interanual promedio de las emisiones de GEI estuvieron en el orden del 1,65% muy por debajo del crecimiento crítico de no retorno de emisiones que es del 3% interanual para el año 2025. En el mismo orden, la generación de energía en Colombia mantuvo un crecimiento interanual promedio sostenido de 3.60% para el periodo de la investigación, desacelerando el ritmo del consumo en los últimos cuatro años desde el 2014 al 2018 en un 1,53% de crecimiento anual.

Las emisiones per cápita de CO₂eq no mostraron relación directa con el consumo per cápita de energía, sobre todo en las dos primeras décadas del siglo XXI donde el consumo de energía mantuvo una media interanual 3,16% en el periodo 2000-2018 y en los últimos 5 años del periodo de estudio, la variación de las emisiones de GEI tendió a disminuir al situarse en una variación negativa del -6,33%, concordando con las medidas de reducción de emisiones a partir del acuerdo de París del 2015. Mientras que el consumo energético per cápita mantuvo una variación contraria a las

emisiones per cápita para el mismo periodo analizado al situarse en una variación positiva interanual promedio de 53,58% desde el año 2000, al pasar de 32.586 GWh a 70203 GWh y mostrando un aumento positivo menor de 6,72% para el último lustro del periodo de estudio. Estos indicadores destacan que podemos estar en presencia de una correlación espuria, ya que las emisiones de CO₂eq a partir del año 2000 aumentaron junto a la población, precisamente donde hubo mayor crecimiento sostenido del transporte, deforestación y la agricultura.

Respecto al indicador de emisiones de GEI total por cada 1.000 USD producto del PIB de Colombia, presenta una variación hacia la baja en el periodo 1990 al 2019, al pasar de 0,19 a 0,12 CO₂ Kg, indicando de esta manera una baja relación del crecimiento económico con las emisiones de CO₂eq. A pesar que Colombia es considerado un país con buena perspectiva de desarrollo, y que mantiene un promedio de crecimiento del PIB alrededor del 4%, junto a los llamados CIVETS (Colombia, Indonesia, Vietnam, Egipto, Turquía, Sudáfrica), este crecimiento puede implicar mayores emisiones GEI, (Campo y Olivares, 2013, p. 62). Sin embargo los datos para Colombia muestran lo contrario, tendencia hacia la baja en emisiones y su relación con el PIB, que puede indicar una eficiencia ambiental del proceso productivo de la industria y la manufactura que son los emisores importantes y requieren de altos volúmenes de energía para su funcionamiento.



La correlación lineal de Pearson aplicada para observar la relación entre las variables emisión de CO₂eq y consumo de energía fue muy consistente al resultar 0,92 sin indicar la cuantía en volúmenes o masa de CO₂eq y la intervención de otras variables, como deforestación y actividades agropecuarias. El coeficiente de terminación R² y la ecuación de predictibilidad obtenidas a partir de la regresión lineal simple muestra un buen ajuste y significancia del modelo estadístico al ser el valor crítico de $F = 4,43e-14$, que es menor a 0,05 indicando una relación directa entre variables. A partir de la ecuación de predictibilidad se determinaron las emisiones a futuro hasta el año 2031 en concordancia con las proyecciones y la demanda de consumo de energía generados por la UPME, estimando una emisión de GEI de 100.7731 de CO₂eq para el año 2031. Esta ecuación no considera las medidas de mitigación de emisiones a futuro planificadas por los entes públicos y privados de Colombia.

En efecto, a pesar del crecimiento energético y del sector transporte en Colombia, el país ocupa un lugar privilegiado en Latinoamérica y el mundo en cuanto a emisiones de GEI a la atmósfera, según la Comisión Europea para el Cambio Climático ocupa el lugar 138 de 184 de países emisores, y según el IDEAM ocupa el puesto no 5 en Latinoamérica, por debajo inclusive de Venezuela que tiene una población mucho menor que Colombia. De hecho el factor de emisión de CO₂eq por generación eléctrica es de 164,38 gramos por cada KWh producido,

indicador incorporado por los lineamientos definidos por la CMNUCC y es mucho menor que otros países del mundo comparables en vías de desarrollo, esto es el resultado de que la producción energética en el país es de tipo hidroeléctrica, que representa el 64% de la oferta energética del país.

REFERENCIAS

Arango Castaño, Beatriz Elena (2011). Sumideros de carbono en el marco del Protocolo de Kioto. Dialnet. Memorando de Derecho, ISSN-e 2027-9442, ISSN 2027-9442, Año 2, N° 2, págs. 13-21.

Banco de la República de Colombia. (2006). La economía colombiana: situación actual frente a los noventa y sus perspectivas. Grupo Macroeconomía. [Publicación web] <https://www.banrep.gov.co/docum/ftp/borra429.pdf>. [Febrero-03, 2021].

Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J. and Vignati, E., (2020). Fossil CO₂ emissions of all world countries - Report, EUR 30358 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-21514-1, doi:10.2760/56420, JRC121460.

DANE (2020) Boletín Técnico: Producto Interno Bruto-2019. Bogotá D.C. 14 de febrero de 2020. [Publicación Web] https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/presen_rueda_de_prensa_PIB_IV-trim19.pdf. [Mayo-02, 2021]

Campo Robledo, Jacobo y Olivares Wilmer (2013) Relación entre las emisiones de CO₂eq, el consumo de



energía y el PIB: el caso de los CIVETS. Semestre Económico, volumen 16, No. 33, pp. 45-66 • ISSN 0120-6346, enero-junio de 2013, Medellín, Colombia

Comisión Europea (febrero-02, 2021), Centro común de investigaciones [publicación web] https://ec.europa.eu/info/departments/joint-research-centre_es

GreenFacts, (Enero-05, 2021) Hechos sobre Salud y Medioambiente. [Publicación blog]. <https://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/potencial-calentamiento-global.htm>

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA(2016). Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia.

IDEAM, PNUD (2018). Segundo Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia.

Muntean, M., Guizzardi, D., Schaaf, E., Crippa, M., Solazzo, E., Olivier, J. and Vignati, E., (2018). Fossil CO₂ emissions of all world countries. Report, EUR 29433 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-97239-3, doi:10.2760/83904, JRC113738.

ONU (2019). Resumen del Informe sobre la disparidad en las emisiones

de 2019. [Publicación web.] <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30798/EGR19ESSP.pdf?sequence=17>[Diciembre-09, 2020].

ONU (Abril-24, 2021).Cambio Climático. Desafíos Globales. [Publicación web] <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

Parlamento Europeo (2018). Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector. Noticias [publicación web]. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-país-y-sector-infografía>[febrero-05 de 2021]

UPME (2017). Plan de expansión de referencia generación – transmisión 2017 – 2031. Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, Colombia

UPME, (2019). Proyección Regional de la Demanda de Energía Eléctrica y Potencia Máxima en Colombia, Revisión Julio de 2019, Bogotá.

UPME, (2019).Plan energético nacional 2020- 2050 - Documento de consulta - Bogotá D.C., Colombia