

Nota Técnica

Relación entre el consumo energético y las emisiones de CO₂ con el índice de desarrollo humano en países americanos: un análisis de eficiencia usando DEA

Relationship between energy consumption and CO₂ emissions with the human development index in american countries: an efficiency analysis using DEA

Rhonmer Orlando Pérez-Cedeño^{ab*}, Carmen Luisa Vásquez Stanescu^{ac}

^aUniversidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Barquisimeto, Venezuela.

^bDirección de Investigación y Postgrado.

^cUnidad Central de Investigación, Departamento de Ingeniería Eléctrica

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6618518>

Recibido: 21-03-2022

Aceptado: 16-05-2022

Resumen

El Índice de Desarrollo Humano (IDH) es una medida sinóptica del nivel de desarrollo de cada país. El objetivo de la investigación consiste de un estudio de eficiencia aplicando Análisis Envolvente de Datos (DEA) y evaluar la relación entre el “Consumo energético de origen fósil” y las “Emisiones de CO₂” con el IDH en nueve países americanos con una capacidad instalada de generación hidroeléctrica mayor a 1000 megavatios (MW). La energía hidroeléctrica muestra una oportunidad de contribuir de forma positiva al IDH al ser un medio de generación eléctrico alternativo sin uso de combustibles fósiles. Se utiliza la variable IDH como salida y las otras dos como entradas en el análisis de eficiencia usando DEA. Se obtiene un total de seis países que muestran una eficiencia máxima del 100%, siendo México el que menor eficiencia posee. En los países con menos eficiencia técnica es oportuno considerar la reducción en el uso de combustibles fósiles y establecer medidas de mitigación en cuanto a emisiones de CO₂ para mejorar el medio ambiente y aumentar la salud humana, significando así, un impacto favorable con el IDH.

Palabras clave: consumo energético; emisiones de CO₂; índice de desarrollo humano; análisis envolvente de datos; países americanos. Código UNESCO: 3308.04 - Ingeniería de la contaminación. Código CAPE:30704057 – Control de polución.

Abstract

The Human Development Index (HDI) is a summary measure of the development level of each country. The objective of the research consists of an efficiency study applying Data Envelopment Analysis (DEA) and evaluating the relationship between “Fossil Energy Consumption” and “CO₂ Emissions” with HDI in nine American countries with an installed hydroelectric generation capacity greater than 1000 megawatts (MW). Hydropower shows an opportunity to contribute positively to the HDI as an alternative means of electricity generation without the use of fossil fuels. HDI variable is used as the output and other two as inputs in the efficiency analysis using DEA. A total of six countries show a maximum efficiency of 100 %, with Mexico being the least efficient. In countries with less technical efficiency, it's opportune to consider the reduction in the use of fossil fuels and establish mitigation measures in terms of CO₂ emissions to improve the environment and increase human health, thus meaning an improvement in the HDI.

Keywords: energy consumption, CO₂ emissions, human development index, data envelopment analysis, american countries UNESCO Code: 3308.04 - Pollution engineering. CAPE Code: 30704057 – Pollution control.

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.

Rhonmer Orlando Pérez-Cedeño*, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4343-0935>. Correo: rhonmerperez@gmail.com. Perfil en Google Académico. Ingeniero Electricista. Candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO), Barquisimeto, Venezuela.

Carmen Luisa Vásquez Stanescu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0657-3470>. Correo: cvasquez@unexpo.edu.ve. Perfil en Google Académico. Ingeniero Electricista, Magister Scientiarum en Ingeniería Eléctrica, Doctora en Ciencias Técnicas. Profesora Titular jubilada de la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO),

1. Introducción

Según Ortiz, Hernández y Martínez [1], el desarrollo humano es un proceso que está relacionado con las expansiones de las oportunidades, necesidades, preferencias e intereses. Es decir, son todas las mejoras que se emplean para afinar las condiciones de vida de una sociedad en general.

Tradicionalmente, el Producto Interno Bruto (PIB) se utiliza como indicador de Desarrollo de los países y de su calidad de vida. Éste se relaciona con el ingreso por la producción de bienes y servicios de un país, estimado de manera trimestral y anual y, finalmente, suele analizarse de manera per cápita, para poder observar la distribución relativa de las riquezas de un país entre su número de habitantes. Sin embargo, no considera otros aspectos necesarios para poder observar con mayor aproximación el nivel de Desarrollo y que sirva, adicionalmente, para la comparación entre países y regiones del mundo. En este marco, la Mesa de Concertación para la Lucha contra la Pobreza [2] señala que el Índice de Desarrollo Humano (IDH) publicado desde 1990, que comprende un rango entre cero (0) a uno (1) [3], es un indicador social estadístico utilizado para medir el nivel de Desarrollo entre países. Este se compone por tres (3) parámetros: nivel de vida digno, educación (a su vez integrado por dos ítems) y, por último, una larga vida y sana. Este indicador permite estimar el impacto de las políticas económicas de un país sobre la calidad de vida que se desarrolla en su territorio y diferenciar su nivel comparándolo con otras naciones.

La productividad, tal como lo reflejan Koss and Lewis [4], se convierte en una forma de decir lo bien que lo estás haciendo con respecto a los propios estándares, con la finalidad de dar grandes resultados o rendimientos significativos, tal concepto guarda estrecha relación con lo perseguido por las políticas de eficiencia energética y el IDH. Además, según Prokopenko [5], para mejorar la productividad no se amerita intensificar el trabajo, por el contrario, se trata del uso eficaz y eficiente de todos los recursos disponibles, en este caso en un país, como el dinero, materiales, energía, información, mano de obra y espacio, entre otros, empleados para un fin común.

Cáceres [6] establece que el reporte de desarrollo humano, publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en 2013, expresa la estimación de ecuaciones que formulan la productividad en términos de una serie de variables independientes, tales como la calidad de educación, económicas y sociales. Es decir, la productividad de las regiones o países tienen una estrecha relación entre las personas que poseen un determinado IDH, porque poseen fines comunes y objetivos a desarrollar para una mejor calidad de vida. En otras palabras y focalizado en un contexto de mejora continua, la productividad es un progreso del esfuerzo perenne por emplear nuevas tecnologías y métodos persiguiendo el bienestar de la humanidad conjugado con su felicidad [7].

Entendida la productividad como un principio guía, los sistemas hombre-hombre y hombre-naturaleza, establecen el enfoque de una estructura entrelazada entre ellos. Este enfoque desarrollado por Kurosawa [8], tiene una postura adecuada ante el abordaje investigativo en desarrollo concerniente al IDH, porque la productividad se debe adoptar como un objetivo de cada país, combinando la tecnología y mejoras de la ingeniería (relacionadas con el PIB) y del esfuerzo humano (educación y condiciones de vida saludable), lo cual justifica el punto de vista productivo arraigado.

El uso de diversas fuentes de energía y la electricidad guarda una relación estrecha con el desarrollo de los países [9]. Tal como lo señala Uribe [10], la hidroelectricidad, en el caso de América Latina, la ha impulsado a ser un líder mundial en bajas emisiones en carbono, por tener una matriz energética limpia, garantizando elevar su nivel de accesibilidad y brindar importantes oportunidades de inversión.

Es clave notar que la hidroelectricidad es una fuente que se interrelaciona con el IDH, por el hecho de brindar una alternativa en cuanto al desplazamiento del uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad. De esta manera colabora de manera directa en una vertiente positiva al ambiente para disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) logrando un ambiente más limpio que será favorable para la salud de las personas.

La Agencia Internacional de la Energía [11] resalta que más del 14% de la población mundial no tienen acceso a la electricidad y cerca del 38% no tienen servicios modernos para cocinar sus alimentos. Así, los nuevos proyectos en expansión de la generación hidroeléctrica hacen accesible la electricidad a dichos sectores vulnerables que no poseen estos servicios básicos, mejorando a su vez la calidad de vida y la salud de la sociedad. Al existir un déficit de electricidad, estos sectores hacen uso de la leña como combustibles, como alternativas para la iluminación y cocción de los alimentos, que al quemarlos perjudican la salud de las familias [12] y contribuyen al calentamiento global. En este marco, la relación del IDH y las emisiones de CO₂ y el consumo de energía primaria se resumen en el diagrama mostrado en la Figura 1, siendo necesaria la descomposición del índice para agregar mayor especificidad en los vínculos existentes.

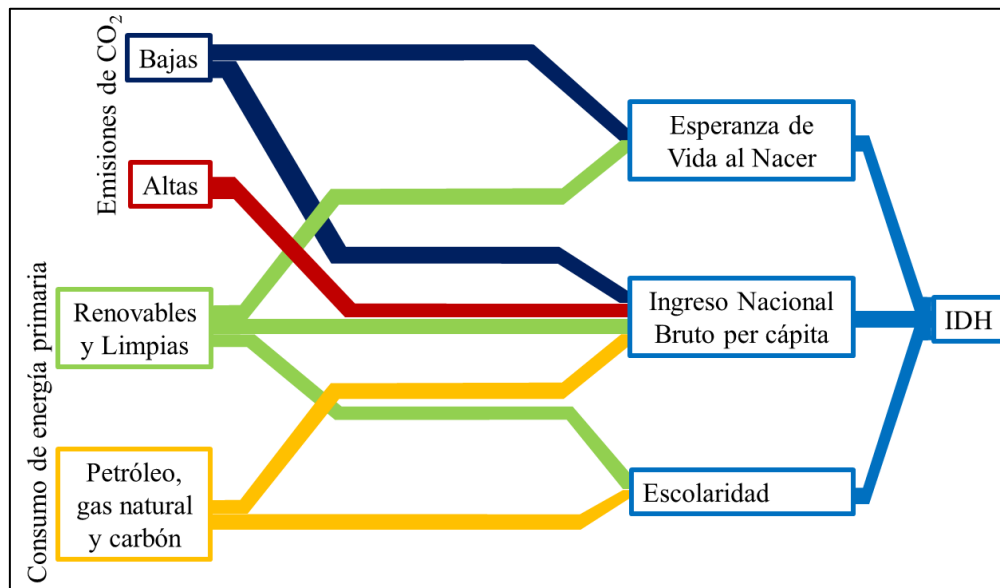


Figura 1. Vínculo entre el consumo de energía primaria y emisiones de CO₂ con el IDH.

Fuente: Elaboración propia basado en [12]–[17].

Es oportuno considerar a países de América como Unidades Objeto de Análisis (DMU por sus siglas en inglés) para un análisis de eficiencia haciendo uso del modelo de frontera de Análisis Envoltante de Datos (DEA, por sus siglas en inglés) y así poder evaluar cómo las variables denominadas Consumo Energético y Emisiones de CO₂ pueden influir en el IDH, tal como se ha venido relacionando.

Los países bajo estudio son Argentina, Brasil, Canadá, Chile, Colombia, Ecuador, Estados Unidos de América, México y Perú, para un total de nueve (9) DMU para el estudio de eficiencia. Cabe destacar que los países seleccionados poseen un alto IDH que y, además, de acuerdo a la Asociación Internacional de Energía Hidroeléctrica (IHA, por sus siglas en inglés) [18], poseen una capacidad instalada en hidroelectricidad superior a 1.000 MW. Es oportuno destacar que este tipo de estudios de medición de eficiencia en relación al IDH y al sector energético ha sido desarrollado por otros autores tales como se desglosa a continuación:

- Torres y Vásquez [19] presentan un análisis de sensibilidad de la eficiencia del servicio en un conjunto de empresas latinoamericanas del sector eléctrico empleando indicadores denominados: imagen, suministro de energía, factura de energía, información y comunicación con el cliente y, finalmente, la atención al cliente. Se considera la variable calidad percibida del servicio como salida

y las restantes como entradas. Se usa el modelo de frontera de DEA como método de medición de la eficiencia, donde los resultados arrojados del análisis señalan que las variables factura de energía y suministro eléctrico tienen mayor incidencia en la eficiencia técnica de la calidad percibida del servicio.

- En la publicación denominada “El bienestar social en América Latina, 1990-2014: un análisis DEA a partir de las dimensiones del desarrollo humano”, se aborda un estudio de eficiencia en la generación de bienestar social de 38 economías latinoamericanas usando la técnica DEA, haciendo uso de los indicadores socioeconómicos del desarrollo humano [20].
- La eficiencia productiva tiene gran importancia en el análisis del proceso de desarrollo humano que posee rasgos distintivos multidimensionales y complejos, por esta razón, se realiza un estudio basado en la revisión bibliográfica sobre los trabajos de investigación que han utilizado el DEA para medir y analizar el proceso de desarrollo humano haciendo uso de las bases de datos de Scopus y Web of Science [21].
- La investigación titulada “Análisis de ventanas DEA e índice de Malmquist para evaluar la eficiencia energética y la productividad en el sector industrial Jordano” de Al-Refaie, Hammad y Li [22], consideran el período comprendido entre 1999-2013 y evalúan la eficiencia energética y el crecimiento de la productividad en el sector industrial de Jordania utilizando DEA, aportando resultados favorables a los planificadores de políticas y gestores operativos a utilizar mejor los recursos y la eficiencia de la gestión a lo largo del tiempo.
- Peris Martínez [23] expone una aplicación de la técnica DEA para medir la eficiencia de 22 países que conforman la Unión Europea a partir de la selección de los indicadores como lo son el IDH, Índice de planeta feliz, PIB per cápita PPA, Huella ecológica, Deuda pública total (% del PIB), Índice de Gini y el Índice de percepción de la corrupción. Este obtiene que los DMU analizados, sólo siete (7) han sido valorados como eficientes (Alemania, Bulgaria, Estonia, Lituania, Países Bajos, Rumania y Suecia).
- En el estudio de la incidencia que tienen los factores espaciales en la eficiencia de la dimensión salud del IDH en México desarrollado por Ayvar, Navarro y Gimenez [24], se emplea la metodología del DEA y de la Econometría Espacial mostrando en los resultados de eficiencia que las entidades mexicanas tuvieron elevados promedio de escolaridad y bajos niveles de deuda.
- En una ampliación del modelo DEA para considerar problemas no homogéneos de dos (2) lados, Wu et al. [25] utilizan DMU que no tienen homogeneidad tanto en las entradas como en las salidas lo cual difiere de las investigaciones anteriores, que generalmente se centran en datos regionales para evitar la no homogeneidad. Como resultado se obtuvo que la eficiencia de los sectores sigue siendo baja y dispareja. El departamento de Reciclaje y Eliminación de Residuos es quien resalta con la mejor eficiencia en ahorro energético y reducción de emisiones.

El objetivo del presente trabajo consiste de determinar la eficiencia aplicando el modelo de frontera DEA basado en la relación entre el consumo energético y las emisiones de CO₂ con el IDH en países americanos y se estructura de la manera como sigue: un apartado para el desarrollo del trabajo conformado por la metodología, resultados, la discusión del trabajo y, finalmente se presenta la sección sobre las conclusiones.

2. Desarrollo

2.1 El Método DEA

El método DEA es una técnica determinística no paramétrica que emplea la programación matemática la cual fue propuesta por Charnes, Cooper y Rhodes (1978) [26], con el objetivo de evaluar la eficiencia relativa de un conjunto de DMU de producción de bienes o servicios de carácter homogéneos entre sí, es decir, que a partir de las mismas entradas se tengan resultados del mismo tipo [27].

El DEA persigue el objetivo de obtener la combinación lineal de insumos y productos de las DMU y se obtiene el índice de eficiencia técnica de ellos, el cual nos indica en cuanto se puede expandir la producción de los productos en forma equitativa y proporcional, dados los insumos utilizados o en cuánto se puede reducir, de forma proporcional, la utilización de los insumos, dada la producción [28].

El modelo de Charnes, Cooper y Rhodes [26] se denominó DEA-CCR, en homenaje a las iniciales de los autores, el cual posee dos rasgos característicos: la orientación y el rendimiento de escala constante. El primer rasgo de este modelo determina si estará orientado a las entradas (dadas las salidas, busca la máxima reducción proporcional de entradas) u orientado a las salidas (dadas las entradas, busca el máximo incremento proporcional de salidas) manteniéndose dentro de la frontera de producción. Por su parte, el rendimiento constante de escala, es dado cuando hay una variación proporcional de la cantidad obtenida de productos y la cantidad empleada de todos los factores [27]. Otro modelo extenso del DEA-CCR denominado DEA-BCC, fue elaborado por Banker, Charnes y Cooper (1984) [29], este modelo introduce la hipótesis de rendimientos variables a escala [27]. Algunas de las limitaciones del método DEA son los siguientes:

- El método es sensible a los errores de medición, enfatizados en los valores atípicos de alta productividad, debido a que la frontera de eficiencia de referencia se construye a partir de los datos suministrados donde estos valores atípicos no son excluidos lo cual conduce a errores en los resultados.
- Las variables no consideradas pueden generar puntos de ineficiencias en la información.
- El análisis envolvente de datos permite estimar eficiencias relativas en cuanto a los DMU considerados [28].

2.2 Metodología

Para evaluar la eficiencia del desarrollo humano se establece como entradas: el consumo de energía primaria fósil (petróleo, gas natural y carbón) en exajoules y las emisiones de CO₂ dado en toneladas métricas per cápita. Estas entradas impactan de forma desfavorable al aumento del IDH, siendo esto último considerado como la salida para la medición de eficiencia. Al ser definidas las dos (2) entradas y la salida para medir la eficiencia de los países americanos con mayor consumo de energía, se enlistan los pasos para determinar dicho cómputo:

a. *Determinación de la orientación del análisis de eficiencia*

Se plantea un modelo de orientación a los insumos o entradas puesto a que se busca minimizar las entradas (inputs) manteniendo los productos (outputs) sin alterar.

b. *Determinación del tipo de rendimiento a escala*

Se emplea un rendimiento variable porque no se evidencia un comportamiento constante entre los datos de entradas y salidas a emplear en el análisis de eficiencia.

c. *Establecimiento de los clúster para el estudio*

Se identifican tres (3) clústeres. El primer está basado en una sección de países americanos que poseen más de 1.000 MW de capacidad instalada en hidroelectricidad y con un consumo energético representativo de la región. Como segundo clúster se toman los países con la capacidad instalada en hidroelectricidad mayor o igual al valor promedio de las muestras del Cuadro 1 y, finalmente, el tercer para el análisis, consta de los países que tengan menor capacidad instalada en hidroelectricidad respecto al promedio ya mencionado. La Figura 2 muestra un diagrama de dispersión para señalar los países (DMU) que serán incluidos en cada clúster.

Cuadro 1. Datos de densidad poblacional y capacidad instalada en hidroeléctricas para la clusterización de los países en estudio.

País	Densidad de población (Personas por km ²)	Capacidad Instalada en Hidroeléctricas (MW)
Argentina	16,259	11.288
Brasil	25,062	104.139
Canadá	4,134	81.386
Chile	25,189	6.753
Colombia	44,760	11.837
Ecuador	68,789	5.072
Estados Unidos	35,730	102.745
México	35,730	12.117
Perú	24,992	4.995
Valor promedio	31,18	37.814,67

Fuente: Elaboración propia a partir de [30], [18].

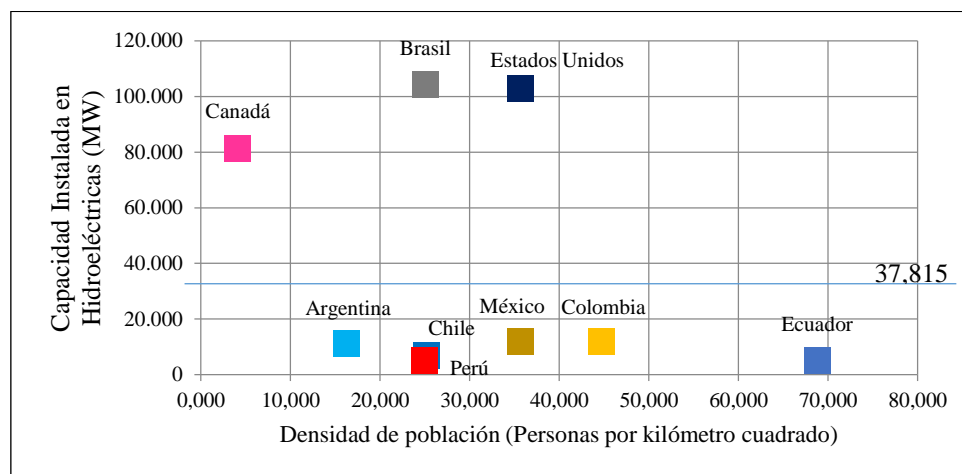


Figura 2. Relación entre la densidad de población y capacidad instalada en hidroeléctrica en los países del estudio para determinar los clúster. **Fuente:** Elaboración propia.

A partir de la Figura 2 se presenta a continuación el Cuadro 2, el cual detalla los clúster generados del diagrama, donde uno de ellos engloba los países con mayor superficie territorial de la muestra considerada.

Cuadro 2. Clasificación de los países conforme a la capacidad instalada en hidroeléctricas.

Clúster	Países asignados al clúster	Descripción
1	Canadá, Brasil, Estados Unidos	Países con mayor capacidad instalada que el valor promedio entre los DMU seleccionados para el estudio
2	Argentina, Perú, Chile, México, Colombia y Ecuador	Con una capacidad instalada de hidroeléctricas menor al promedio de la muestra (37,82 MW)

Fuente: Elaboración propia.

d. *Establecimiento del modelo*

El modelo a emplear es el DEA, el cual aporta medidas de eficiencias con la orientación a la minimización de los insumos bajo un estudio de eficiencia de escala variable, el cual se ajusta al estudio del desarrollo humano.

e. *Elección de las DMU y la elección de los datos a emplear*

Para utilizar el modelo DEA, se eligen nueve (9) países americanos que muestran disponibilidad de datos y alto niveles de consumo energético, buen desempeño en el desarrollo humano y una capacidad instalada en hidroelectricidad mayor a 1.000 MW.

f. *Descripción de las bases de datos para las variables y clúster a considerar:*

Para realizar el proceso de clusterización, se recopila datos del Banco Mundial [30] el cual publica datos de densidad de población; respecto a los valores de la capacidad instalada en hidroeléctricas, estos se extraen de [18]. El británico multinacional de petróleo y gas bp p.l.c [31] informa los datos correspondientes al consumo de energía primaria (petróleo, gas natural y carbón), el Banco Mundial [32] señala las Emisiones de CO₂ a utilizar y el IDH está disponible en [3]. El Cuadro 3 reúne estos datos.

g. *Aplicación del Software Frontier Analyst® [33] para el cálculo de eficiencia anterior descrita.*

Cuadro 3. Sección de países americanos con capacidad hidroeléctrica superior a 1000 MW.

País	Consumo de Energía Primaria (Petróleo, Gas Natural, Carbón) en Exajoules	Emisiones de CO ₂ (toneladas métricas per cápita)	IDH
Argentina	3,000	3,987	0,830
Brasil	6,680	2,042	0,761
Canadá	9,500	15,497	0,922
Chile	1,290	4,625	0,847
Colombia	1,330	1,601	0,761
Ecuador	0,540	2,314	0,758
Estados Unidos	131,390	15,241	0,920
México	7,200	3,741	0,767
Perú	0,820	1,697	0,759
Valor Promedio	17,972	5,638	0,814

Fuente: Elaboración propia con datos de [31], [32], [3].

2.3 Resultados

Para agrupar las escalas de eficiencia de los DMU, el Software *Frontier Analyst* establece los rangos que se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Rangos de eficiencia del Software *Frontier Analyst*.

Rango (%)	Nivel de Eficiencia
0-80	Baja
81-90	Media
91-99,9	Alta
100	Máxima

Fuente: Elaboración propia con base en [33].

De acuerdo al Cuadro 5, de los nueve (9) países bajo estudio, seis (6) de ellos muestran una eficiencia máxima del 100%. Es decir, sólo un (1) país figura con alta eficiencia y dos (2) con bajo valores. Los países que señalan una eficiencia máxima son Argentina, Canadá, Chile, Colombia, Ecuador y Perú. Por su parte, Brasil y México con el 78,4 y 48,3% de eficiencia, respectivamente, entran en el rango media.

Cuadro 5. Eficiencia calculada en los DMU y la contribución de cada insumo al producto.

País	Eficiencia (%)	Consumo de Energía Primaria (Petróleo, Gas Natural, Carbón) en Exajoules	Emisiones de CO ₂ (toneladas métricas per cápita)
Argentina	100	1,7	98,2
Canadá	100	99,9	0
Chile	100	99,9	0
Colombia	100	13,5	86,4
Ecuador	100	35,5	64,4
Perú	100	13,6	86,3
Estados Unidos	99,8	0	99,9
Brasil	78,4	0	99,9
México	48,3	0	99,9
Contribución total (%) de cada variable a la eficiencia		29,37	70,63

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de eficiencia empleando el clúster 1, Canadá se mantiene en un nivel de máxima eficiencia y los Estados Unidos junto a Brasil, se unen a ésta categoría, teniéndose un clúster completo de máxima eficiencia. Las contribuciones de las variables se detallan en el Cuadro 6.

Empleando el clúster 2, se obtienen resultados invariables con respecto al primer análisis de eficiencia realizado mostrado en el Cuadro 5, además de señalarse la contribución porcentual de cada variable al estudio, plasmado en el Cuadro 7.

Cuadro 6. Contribución de las variables a la eficiencia calculada en el clúster 1.

País	Eficiencia (%)	Consumo de Energía Primaria (Petróleo, Gas Natural, Carbón) en Exajoules	Emisiones de CO ₂ (toneladas métricas per cápita)
Brasil	100	99,9	0
Canadá	100	99,9	0
Estados Unidos	100	0	99,9
Contribución (%) a los países de máxima eficiencia		66,67	33,33

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 7. Contribución de las variables a la eficiencia calculada en el clúster 2.

País	Eficiencia (%)	Consumo de Energía Primaria (Petróleo, Gas Natural, Carbón) en Exajoules	Emisiones de CO ₂ (toneladas métricas per cápita)
Argentina	100	0	99,9
Chile	100	0	99,9
Colombia	100	0	99,9
Ecuador	100	99,9	0
Perú	100	51,5	48,4
México	48,3	0	99,9
Contribución (%) a los países de máxima eficiencia		30,31	69,68

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Discusión

América Latina es un líder mundial en bajas emisiones en carbono por la capacidad instalada en generación hidroeléctrica de la región. Como se observa en los nueve (9) países en estudio, tienen una Capacidad Instalada en Hidroelectricidad de 340.332 MW (en promedio 37.815 MW) para una población estimada en promedio de 31,2 hab/km². Para este estudio, esta correlación nos permite dividir en dos (2) clúster, donde Canadá, Brasil y Estados Unidos pertenecen a los que tienen un Capacidad superior a 37,82 MW y el resto de los países al otro grupo.

Como se muestran en las Figuras 3 y 4, Canadá y Estados Unidos se encuentran entre los países con mayor IDH de los analizados y, a su vez, entre los que poseen mayores emisiones de CO₂ y consumo de energía primaria. Además, en la Figura 4 se detalla que a medida se desarrollan los países también sus emisiones lo hacen de una manera proporcional, esto es un punto considerable para tratar de revertir esta relación y lograr un desarrollo más limpio y sostenible.

La Figura 5 muestra para el análisis de eficiencia de los DMUs considerados, los países que señalan una eficiencia máxima son Argentina, Canadá, Chile, Colombia, Ecuador y Perú. Sin embargo, sólo tres (3) de ellos (Canadá, Chile y Argentina) se catalogan, a nivel mundial con un IDH muy alto, es decir, mayor o igual a 0,8. El resto de los países utilizan el mínimo necesario de energía primaria dependiente de petróleo y similares a pesar de tener una densidad poblacional mayor si se comparan con los tres (3) países anteriormente señalados con un IDH muy alto.

Schuschny (p. 38) [28] en el estudio realizado a países de América Latina y el Caribe, señala que México desde el año 1980 a 1999 ha ido incrementando su eficiencia técnica al pasar de 28 a 40% en

ese período, si destacamos que ese país posee una eficiencia técnica bajo rendimientos de escala tanto constantes como variables de un 46% para el 2004 y comparamos ese resultado con el obtenido en nuestra estimación (48,3%) se nota una buena correlación de los resultados y además que México ha seguido en mejora continua de su eficiencia. Al detallar a [28] y [34] podemos observar que Argentina y Perú han mantenido una eficiencia técnica media-alta, lo cual también coincide con los resultados obtenidos en este trabajo.

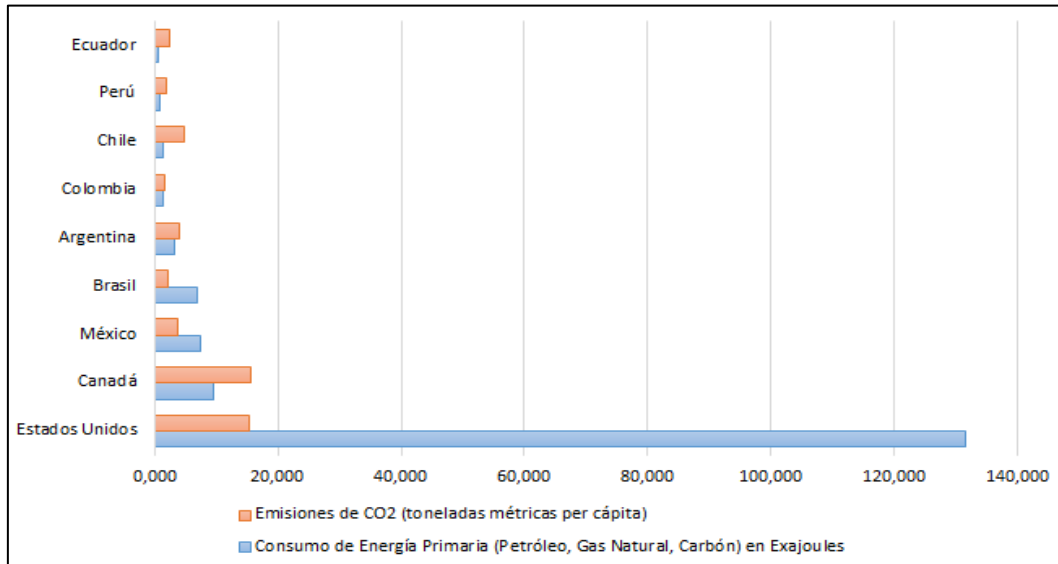


Figura 3. Emisiones de CO₂ y consumo de energía fósil primaria de los países bajo estudio. **Fuente:** Elaboración propia con datos de [32], [31].

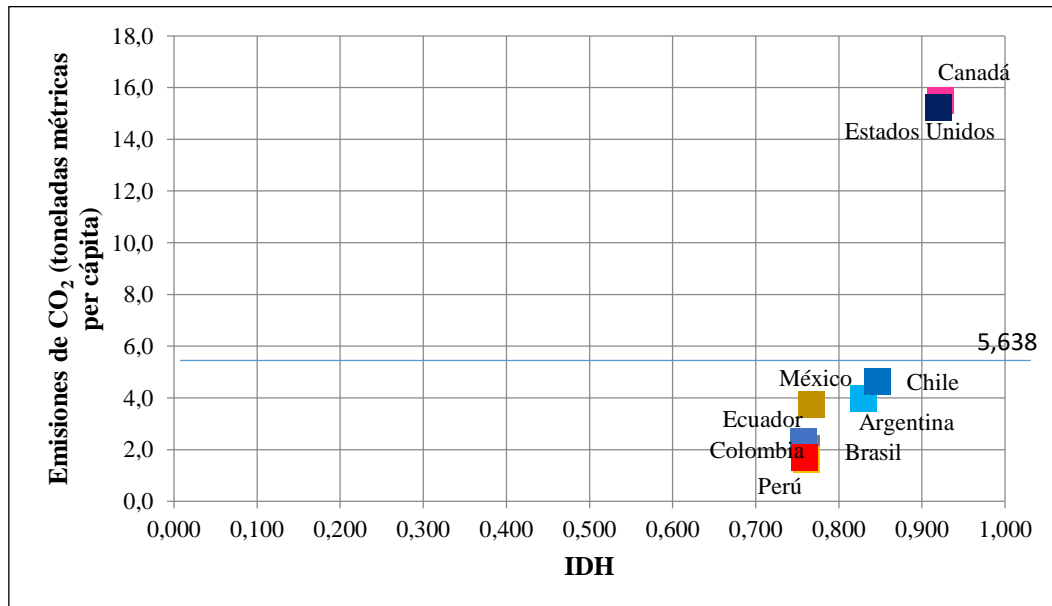


Figura 4. Diagrama de dispersión del IDH comparado con las emisiones de CO₂ de los países bajo estudio. **Fuente:** Elaboración propia con datos de [3], [32].

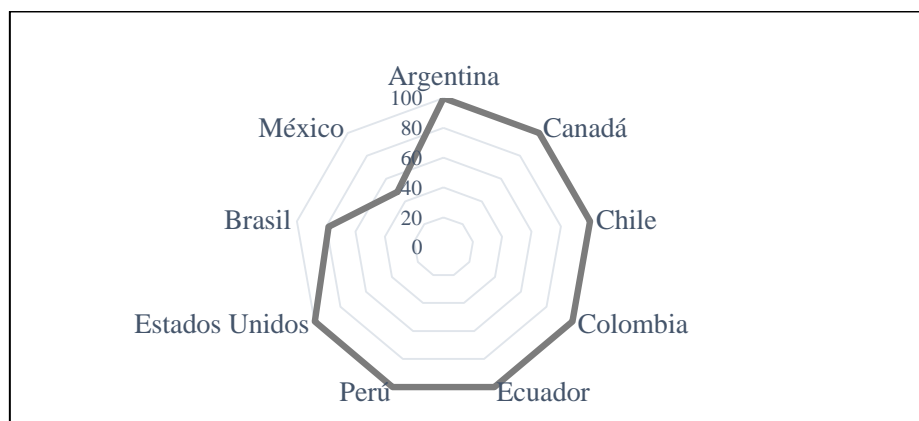


Figura 5. Eficiencia (%) calculada en los países americanos bajo estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3. Conclusiones

Con la finalidad de cambiar los criterios productivos y energéticos que guardan relación con la búsqueda de la mejora del IDH en los países americanos presentados, de acuerdo al primer análisis de eficiencia, es posible focalizar una mejora potencial a Brasil, que tiene una eficiencia de 78,4%, en la reducción del 80% de su consumo de energía primaria de origen fósil y mitigar un 20% de las emisiones de CO₂ per cápita. Por otra parte siendo Estados Unidos el país con mayor PIB per cápita de la muestra seleccionada, es recomendable implementar medidas para reducir más del 90% de la dependencia energética del petróleo, gas natural y carbón de su matriz, para mejorar su actividad económica y garantizar un mayor IDH.

Brasil, Canadá y Estados Unidos poseen una eficiencia del 100% sin ninguna mejora potencial, sin embargo, las cifras relacionadas al consumo de energías dependientes del petróleo y otras fuentes y las emisiones de CO₂ asociadas a estos países son los valores más altos de la muestra bajo estudio, razón por la cual es oportuno señalar la necesidad de disminuir dichas cifras empleando energías limpias.

Respecto a los países Argentina, Chile, Colombia, Ecuador, Perú y México, este último es quien posee la menor eficiencia del estudio con un 48,3% lo cual implica la necesidad de implantar políticas de energías verdes, enfatizando la reducción de un 79% de su matriz de energía primaria que emplea combustibles fósiles y reducir no menos del 50 % de sus emisiones de CO₂.

Referencias

- [1] I. Ortiz Medina, M. Hernández Ortiz, and J. Martínez Pérez, “Producto interno bruto e índice de desarrollo humano dos variables inconexas Gross Domestic product and Human Development Index Two unrelated variables”, *Rev. Ciencias Soc.*, vol. 29, no. 44, pp. 97–116, 2020, <http://www.revistacienciasociales.cl/ojs/index.php/publicacion/article/view/155/125>.
- [2] MCLCP, “El índice de desarrollo humano 2021”. <https://www.mesadeconcertacion.org.pe/el-indice-de-desarrollo-humano> (accessed Jan. 25, 2022).
- [3] PNUD, “Informe sobre Desarrollo Humano”, Nueva York, 2019. http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2019_es_0.pdf.
- [4] E. Koss and D. A. Lewis, “Productivity or efficiency— Measuring what we really want”, *Natl. Product. Rev.*, vol. 12, no. 2, pp. 273–284, 1993, doi: <https://doi.org/10.1002/npr.4040120212>.

- [5] J. Prokopenko, La gestión de la productividad. Manual Práctico, vol. 1, no. 92-2-305901-1. Oficina Internacional del Trabajo, Ginebra, 1989.
- [6] L. Cáceres, “La productividad laboral en América Latina”, *ECA Estud. Centroam.*, vol. 73, no. 754, pp. 245–275, 2018, doi: <https://doi.org/10.51378/eca.v73i754.3169>.
- [7] Asian Productivity Organization, “Productivity Measurement”, APO News, Tokio, Japan, vol. 37, no. 5, pp. 1–8, 2006.
- [8] K. Kurosawa, Medición y Análisis de la Productividad en la Empresa. FIM-Productividad, 1983.
- [9] R. O. Pérez Cedeño, C. L. Vásquez Stanescu, L. Suárez-Matarrita, R. N. Vásquez Stanescu, W. J. Osal Herrera, and R. Ramírez-Pisco, “Methane emissions and energy density of reservoirs of hydroelectric plants in Venezuela”, in *Proceedings of the III Ibero-American Conference on Smart Cities*, 2020, pp. 728–739, <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/memorias/issue/view/575/93>.
- [10] C. Uribe, “Grandes oportunidades para el mercado hidroeléctrico en América Latina,” CAF, Visiones, 2017. <https://www.caf.com/es/conocimiento/visiones/2017/05/grandes-opportunidades-para-el-mercado-hidroelectrico-en-america-latina/> (accessed Jan. 25, 2022).
- [11] IEA, “Energy Access Outlook, from poverty to prosperity,” Paris, 2017. doi: 10.1016/0022-2828(72)90097-1.
- [12] A. Navarro and M. Santillán Vera, “El acceso a la energía”, *Economía y Política Energética*, 2020. https://www.encyclopedie-energie.org/es/acceso-energia/#_ftn1 (accessed Jan. 25, 2022).
- [13] M. A. Hossain and S. Chen, “Nexus between Human Development Index (HDI) and CO₂ emissions in a developing country: decoupling study evidence from Bangladesh,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 41, pp. 58742–58754, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-14822-5.
- [14] H. Amer, “The Impact of Renewable Energy Consumption on the Human Development Index in Selected Countries: Panel Analysis (1990-2015)”, *Int. J. Econ. Energy Environ.*, vol. 5, no. 4, pp. 47–68, 2020, doi: 10.11648/j.ijeee.20200504.12.
- [15] A. Yumashev, B. Ślusarczyk, S. Kondrashev, and A. Mikhaylov, “Global indicators of sustainable development: Evaluation of the Influence of the Human Development Index on Consumption and Quality of Energy”, *Energies*, vol. 13, no. 11, pp. 3–13, 2020, doi: 10.3390/en13112768.
- [16] S. Bedir and V. M. Yilmaz, “CO₂ emissions and human development in OECD countries: Granger causality analysis with a panel data approach”, *Eurasian Econ. Rev.*, vol. 6, no. 1, pp. 97–110, 2016, doi: 10.1007/s40822-015-0037-2.
- [17] N. S. Ouedraogo, “Energy consumption and human development: Evidence from a panel cointegration and error correction model”, *Energy*, vol. 63, pp. 28–41, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.09.067.
- [18] International Hydropower Association, “Hydropower status report 2019: Sector trends and insights”, Kingdom, 2019. https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/2019_hydropower_status_report_0.pdf.
- [19] M. Torres and C. Vásquez, “Estudio de Sensibilidad de la Eficiencia de la Calidad Percibida del Servicio en Empresas del Sector Eléctrico Usando DEA”, *II Simp. Int. Ing. Ind. Actual. y Nuevas Tendencias 2008. IV Jornadas Product. Calid. e Innovación*, October 2008, pp. 8–10, 2008, doi: 10.13140/2.1.4003.8723.
- [20] F. J. Ayvar, J. C. L. Navarro, and V. M. Giménez, “El bienestar social en América Latina, 1990-2014: un análisis DEA a partir de las dimensiones del Desarrollo Humano”, *Rev. Nicolaita Estud. Económicos*, vol. 10, no. 2, pp. 7–28, 2015, doi: 10.33110/rnee.v10i2.200.
- [21] E. B. Mariano, V. A. Sobreiro, y D. A. do N. Rebelatto, “Human Development and Data Envelopment Analysis: A Structured Literature Review”, *Omega*, vol. 54, pp. 33–49, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.002>.
- [22] A. Al-Refai, M. Hammad, y M. H. Li, “DEA window analysis and Malmquist index to assess energy efficiency and productivity in Jordanian industrial sector,” *Energy Effic.*, vol. 9, no. 6, pp. 1299–1313, 2016, doi: 10.1007/s12053-016-9424-0.

- [23] M. B. Peris Martínez, “Aplicación de la técnica DEA en la medición de la eficiencia de los países de la Unión Europea”, *Rev. Digit. Medio Ambient.* “Ojeando la agenda,” no. 46, pp. 1–13, 2017.
- [24] F. J. Ayvar-Campos, J. C. L. Navarro-Chávez, y V. M. Giménez-García, “Incidencia de los factores espaciales en la eficiencia de la dimensión salud del índice de desarrollo humano en México , 1990-2015”, *Espacios*, vol. 39, no. 37, p. 9, 2018, <http://www.revistaespacios.com/a18v39n37/a18v39n37p09.pdf>.
- [25] J. Wu, M. Li, Q. Zhu, Z. Zhou, and L. Liang, “Energy and environmental efficiency measurement of China’s industrial sectors: A DEA model with non-homogeneous inputs and outputs”, *Energy Econ.*, vol. 78, pp. 468–480, 2019, doi: 10.1016/j.eneco.2018.11.036.
- [26] A. Charnes, W. W. Cooper, and E. Rhodes, “Measuring the efficiency of decision making units”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 429–444, 1978, doi: 10.1016/0377-2217(78)90138-8.
- [27] F. Villarreal and F. Tohmé, “Data envelopment analysis. A case study for one Argentinian university”, *Estud. Gerenciales*, vol. 33, no. 144, pp. 302–308, 2017, doi: 10.1016/j.estger.2017.06.004.
- [28] A. R. Schuschny, “Método DEA y su aplicación al estudio del sector energético y las emisiones de CO₂ en América Latina y el Caribe”, no. 46. Santiago de Chile, 2007.
- [29] R. Banker, A. Charnes, and W. W. Cooper, “Some Models for Estimation of Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis”, *Manage. Sci.*, vol. 30, no. 9, pp. 1078–1092, 1984, doi: 10.1287/mnsc.30.9.1078.
- [30] Banco Mundial, “Densidad de población (personas por kilómetro)”, Data, 2018. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.POP.DNST> (accessed Jan. 25, 2022).
- [31] bp p.l.c, “Statistical Review of World Energy”, 2020. <https://www.bp.com/statisticalreview>.
- [32] Banco Mundial, “Emisiones de CO₂ (toneladas métricas per cápita)”, Data, 2018. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC> (accessed Jan. 25, 2022).
- [33] Banxia Software, “Frontier Analyst”, Data Envelopment Analysis Software, 2022. <https://banxia.com/frontier/> (accessed Apr. 23, 2022).
- [34] V. Moutinho, J. A. Fuinhas, A. C. Marques, and R. Santiago, “Assessing eco-efficiency through the DEA analysis and decoupling index in the Latin America countries,” *J. Clean. Prod.*, vol. 205, no. 1, pp. 512–524, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.322.
- [35] Banco Mundial, “PIB per cápita (US\$ a precios actuales) - United States,” Data, 2018. <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD?locations=US> (accessed Jan. 25, 2022).

Cómo citar:

R.O.Pérez-Cedeño y C.L.Vásquez-Stanescu, “Relación entre el consumo energético y las emisiones de CO₂ con el índice de desarrollo humano en países americanos: un análisis de eficiencia usando DEA”, *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol. 16, nro.1, pp.3-15, 2022.

Fuente de financiamiento

Los autores declaran que financiaron íntegramente el estudio.

Contribuciones intelectuales de los autores

Concepción y diseño del trabajo: ROPC, CLVS.

Adquisición, análisis o interpretación de los datos: ROPC, CLVS.

Redacción y/o revisión crítica del manuscrito: ROPC, CLVS.

Todos los autores han leído y aceptado la versión final del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.