



Artículo

Análisis de la variación de la eficiencia en la producción de biocombustibles en América Latina

José Morelos Gómez*

Director, Programa Administración Industrial, Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 24 de junio de 2015

Aceptado el 21 de enero de 2016

On-line el 20 de abril de 2016

Códigos JEL:

C61

L65

Palabras clave:

Eficiencia

Biocombustibles

Análisis envolvente de datos

Productividad

JEL classification:

C61

L65

Keywords:

Efficiency

Biofuels

Data envelopment analysis

Productivity

Classificações JEL:

C61

L65

R E S U M E N

Este artículo de investigación tiene como objetivo realizar la medición de las variaciones de eficiencia de los países productores de biocombustibles en Latinoamérica. Se utilizó la metodología no paramétrica de análisis envolvente de datos (DEA), que permitió calcular la frontera de eficiencia de Brasil, Colombia, Argentina, Ecuador, México, Paraguay, Perú, Bolivia y Uruguay. La información analizada se obtuvo de la base de datos FAOSTAT año 2010. Los resultados mostraron el liderazgo de Perú y Brasil, con eficiencias igual a 1 en la producción de biodiésel y bioetanol. De los 9 países analizados, 7 presentaron bajos niveles de eficiencia en la producción de biocombustibles y solo uno (Paraguay) mostró tener eficiencia media en la fabricación de bioetanol.

© 2016 Universidad ICESI. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la CC BY licencia (<http://creativecommons.org/licencias/by/4.0/>).

Analysis of the variation in the efficiency in the production of biofuels in Latin America

A B S T R A C T

This research article has as objective to carry out the measurement of changes in efficiency of the countries biofuel producers in Latin America. The methodology was used non-parametric data envelopment analysis (DEA), allowing to compute the efficient frontier of the countries Brazil, Colombia, Argentina, Ecuador, Mexico, Paraguay, Peru, Bolivia and Uruguay. The analyzed information was obtained from FAOSTAT database of 2010. The results showed the leadership of Peru and Brazil with efficiencies equal to 1 in the production of biodiesel and bioethanol. Of the 9 countries analyzed, 7 had low levels of efficiency in the production of biofuels and only one (Paraguay), showed average efficiency in the manufacture of bioethanol.

© 2016 Universidad ICESI. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Análise da variação da eficiência na produção de biocombustíveis na América Latina

R E S U M O

Este artigo de investigação tem por objectivo realizar a medição das variações de eficiência dos países produtores de biocombustíveis na América Latina. Utilizou-se a metodologia na paramétrica de análise envolvente de dados (DEA) que permitiu calcular a fronteira de eficiência dos países Brasil, Colômbia,

* Autor para correspondencia: Alto Bosque Trv 53 No. 21 C 18, Cartagena, Colombia.
Correo electrónico: jmorelog@unicartagena.edu.co

Palavras-chave:
Eficiência
Biocombustíveis
Análise envolvente de dados
Produtividade

Argentina, Ecuador, México, Paraguai, Peru, Bolívia e Uruguai. A informação analisada foi obtida pela base de dados FAOSTAT ano 2010. Os resultados mostraram a liderança do Peru e Brasil com eficiências igual a 1 na produção de biodiesel e bioetanol. Dos 9 países analisados, 7 apresentaram baixos níveis de eficiência na produção de biocombustíveis e só uma (Paraguai) mostrou ter eficiência média na fabricação de bioetanol.

© 2016 Universidad ICESI. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este é um artigo Open Access sob uma licença CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

La eficiencia energética constituye uno de los aspectos críticos de la meta mundial de desarrollo sostenible (Wang, Wei y Zhang, 2012). Por ello, muchos han sido los estudios en esta materia para abordar los avances y las previsiones futuras energéticas de gran interés para el planeta (Song, An, Zhang, Wang y Wu, 2012).

En este sentido, como aporte a estos propósitos de desarrollo sostenible, este artículo de investigación tiene como objetivo realizar la medición de las variaciones de eficiencia en la producción de combustibles orgánicos de los países que integran la región de América Latina. Dado lo anterior, el tipo de investigación desarrollado fue cuantitativo, descriptivo y evaluativo, fundamentado en el enfoque epistemológico positivista lógico. La metodología aplicada fue el método más utilizado en los estudios de eficiencia de energía, el cual ha sido el análisis envolvente de datos (*data envelopment analysis* [DEA]) (Zhou, Ang y Poh, 2008) orientado a salidas «Charnes, Cooper y Rhodes-Output» (CCR-O), que se basa en la programación lineal y tiene por objeto la evaluación de la toma de decisiones de las unidades productivas (*decision making units* [DMU]) según posición en la frontera de productividad (Farrell, 1957).

La técnica DEA facilitó la evaluación de la eficiencia de los 9 DMU seleccionados —Brasil, Colombia, Argentina, Ecuador, México, Paraguay, Perú, Bolivia y Uruguay—, considerando la relativa homogeneidad de esta región; adicionalmente, en este modelo se utilizó como input la producción anual en toneladas de caña de azúcar y soya para la fabricación de bioetanol y biodiésel, correspondiente a la información encontrada en la base de datos FAOSTAT del año 2010. Para el cálculo de las eficiencias con las variables de entrada y salida se utilizó el software licenciado DEA Solver Pro 11, el cual permitió obtener las eficiencias de los países productores de biocombustibles, así como la jerarquización de esta y las proyecciones de las variables de salida para alcanzar las eficiencias óptimas.

Por otra parte, diversos han sido los estudios que han realizado aportes al análisis de la eficiencia de los biocombustibles en el mundo, centrándose esencialmente en el mejoramiento de los inputs a través de novedosas tecnologías y procesos que derivan en una mayor ganancia neta de energía en la elaboración de combustibles orgánicos (Ren et al., 2014). Sin duda, el interés por el aumento en la producción de biocombustibles es una necesidad para América Latina; sin embargo, se muestra contradictorio el desinterés en la aplicación de medidas que impulsen el crecimiento en la producción de estos insumos básicos para la producción de biocombustibles en la región.

Para el desarrollo de este artículo se presenta en primera instancia un estudio detallado y profundo de los principales referentes teóricos y autores que permiten fundamentar el tema de investigación; seguidamente, se presenta la metodología utilizada, relacionando el método y los materiales, las variables de entradas y salidas requeridas para el cálculo de las eficiencias de los países productores de biocombustibles en Latinoamérica; finalmente, se presentan los resultados obtenidos referentes a la medición de las variaciones de eficiencia de los países analizados por medio de la técnica del DEA y las conclusiones.

2. Marco teórico

Para el abordaje del referente teórico en este artículo, a continuación se revisan los orígenes y significados de los combustibles biológicos de primera generación, al igual que los diferentes tipos, procesos productivos y tecnologías utilizadas para mejorar la eficiencia.

2.1. Significado de biocombustibles

Desde el comienzo mismo de la humanidad, las diferencias por el poder energético han sido crecientes en cada una de las etapas que han marcado el desarrollo de los diferentes sectores de la economía mundial, sectores estos ávidos de fuentes energéticas que requieren garantizar la producción industrial y así satisfacer la demanda de bienes y servicios. No obstante, este gran propósito de competitividad económica se ve reducido por la escasez de los combustibles en el mundo, que están controlados por países productores como Rusia, Irán, Venezuela y Arabia Saudita, entre otros (López, 2008).

Frente a esta situación de dominio energético global, han surgido nuevas fuentes alternativas de combustibles biológicos que buscan satisfacer las demandas energéticas de los países no productores, de manera que se logre compensar esta fuente importante de crecimiento y desarrollo para las naciones, particularmente en los países emergentes de América Latina e India (Garvett, Vizcaya y Melean, 2011).

Los combustibles biológicos son obtenidos de manera renovable a partir de restos orgánicos (González y Valero, 2011). Entre los principales biocombustibles de primera generación se encuentran el bioetanol, el biodiésel y el biogás. La producción de etanol deriva de las biomásas de los cultivos energéticos o *feedstocks* de maíz, sorgo, yuca y caña de azúcar, entre otros; el biodiésel se produce a partir de las oleaginosas de la soya, aceite de palma, colza, jatropha curca, etc., y el biogás se obtiene a partir de residuos orgánicos mediante procesos de digestión anaerobia (Torres y Hernández, 2006).

De estos combustibles biológicos se destaca la producción de biodiésel y bioetanol, con participaciones cercanas al 18 y al 82%, respectivamente, aportando al sector transporte en el año 2008 su mayor aprovechamiento, con el 1,5% de utilización de la producción de biodiésel, de acuerdo con estudios realizados por la Agencia Internacional de Energía (AIE), y alrededor del 90% del uso mundial de la producción de bioetanol (Biofuels Taskforce, 2005).

2.2. Tipos, procesos y tecnologías de biocombustibles

Los tipos de biocombustibles líquidos más utilizados en Latinoamérica corresponden a los ya mencionados biodiésel y bioetanol, por sus bondades en los costos de fabricación y utilidad para las regiones emergentes marginales. Con relación al bioetanol, este puede ser de primera o de segunda generación; para este último, su producción se realiza con la incorporación de nuevos procesos de investigación y desarrollo (I+D), con la obtención de compuestos de plantas como el lignum, la celulosa o hemicelulosa (Callejas y Gasca, 2009), entre otros procesos tecnológicos utilizados, como la

Tabla 1
Tipos, procesos y tecnologías aplicadas en los biocombustibles

Tipo	Insumo	Proceso conversión	Utilidad	Tecnología aplicada
<i>Biocombustibles líquidos de primera generación</i>				
Bioetanol	Caña de azúcar y almidones	Fermentación	Transporte	Comercial
Biodiésel	Oleaginosas, microalgas grasas vegetales y animales	Esterificación	Transporte	Comercial e I+D
<i>Biocombustibles líquidos de segunda generación</i>				
Bioetanol	Lignocelulosa, pasto, residuos agrícolas y forestales	Hidrólisis, gasificación (Fischer-Tropsch)	Transporte	Comercial
Biodiésel	Biomasa	Gasificación (Fischer-Tropsch)	Transporte y generación de electricidad	I+D

Fuente: adaptado de CEPAL (2011).

hidrólisis enzimática (Guadix, Guadix, Páez, Gonzales y Camacho, 2000).

Por su parte, la producción de biodiésel de segunda generación también incorpora novedosas tecnologías para su obtención y se deriva de biomasa distintas a las oleaginosas, como la madera, la paja y residuos orgánicos, mediante procesos de gasificación Fischer-Tropsch, que permiten sintetizar combustibles líquidos de alta calidad (Dufey, Vermeulen y Vorley, 2007). La tabla 1 presenta los diferentes tipos y tecnologías utilizadas en los procesos de elaboración de biocombustibles de primera y segunda generación.

2.3. Producción de biocombustibles

La producción de biocombustibles en el mundo ha crecido exponencialmente y se muestra como la principal oportunidad de sustitución que tienen los países desarrollados y emergentes para responder a la demanda energética y garantizar el consumo interno, así como también, mitigar los efectos producidos por los gases de efecto invernadero (GEI) (Gómez, 2010).

De acuerdo con información de la AIE, se estima que la demanda de biocombustibles para el transporte se incrementará para el año 2030 en un 55% respecto al consumo en 2004. Y en relación con las previsiones 2012-2021 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), se espera que la producción mundial de bioetanol y biodiésel se duplique; este incremento de la producción se concentrará especialmente en países (regiones) como Estados Unidos, Brasil y la Unión Europea (UE).

En efecto, estos países (regiones) —Estados Unidos (33,2%), Brasil (21,8%), UE (20,6%), Argentina (4,1%), Colombia (0,8%) (REN21, 2009)— representan la producción mundial de biocombustibles líquidos, aprovechando estas fuentes de energía de origen biológico en sus regiones para jalar el crecimiento y desarrollo rural, con la oportunidad de aportar una nueva fuente ecológica de bioenergía y, de esta manera, dar cumplimiento a los compromisos de reducción de GEI adquiridos bajo el Protocolo de Kioto (Banco Interamericano de Desarrollo, 2008).

En América Latina la producción de biocombustibles es liderada por Brasil, Argentina y Colombia, según datos del último estudio sobre biocombustibles publicado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), y se ha convertido en la mejor opción de fuente energética para competir con el petróleo, dados los avances tecnológicos —combustibles flexibles— con que cuentan estos países, para el abastecimiento y el consumo, particularmente en sectores como el transporte (Coelho, 2005). El consumo de biocombustibles utilizados en Latinoamérica para el transporte se muestra en la tabla 2.

En América Latina el mayor interés en los biocombustibles se tiene en la fabricación de bioetanol, con una producción cercana a los 26,3 billones de litros, con una participación de Brasil (34,2%),

Tabla 2
Consumo de biocombustibles utilizados en el sector del transporte

País	Biocombustible (%)
Brasil	21,57
Cuba	3,06
Nicaragua	4,24
Guatemala	2,74
Argentina	1,12
Ecuador	0,92
México	0,07

Fuente: adaptado de CEPAL (2009).

seguido de Colombia (0,4%) y nula acción de Argentina. En este sentido se evidencia el buen desempeño de Latinoamérica cuando se compara con Estados Unidos, que encabeza la producción con el 54% (REN21, 2009). Sin embargo, al considerarse la eficiencia en la producción de biocombustibles no se analizan los insumos o entradas del proceso productivo que maximicen la producción de dichos combustibles orgánicos, intentando mejorar la economía interna de estas regiones y la posición de América Latina en las próximas décadas.

2.4. Eficiencia en procesos productivos

El análisis de la eficiencia en la producción de biocombustibles en América Latina conduce a revisar los medios de producción y las tecnologías aplicadas, es decir, cómo y cuáles son los métodos utilizados para la optimización de los procesos que implican el uso racional de los insumos agrícolas, forestales, residuos orgánicos y tecnologías utilizadas (Altieri y Nicholls, 2000) en la producción de biocombustibles de primera y segunda generación.

En concordancia con lo anterior, evaluar la productividad y el desempeño de los países productores de biocombustibles en América Latina es fundamental para el fortalecimiento de las políticas de crecimiento energético y económico de las regiones de análisis, particularmente en lo que concierne a la toma de decisiones respecto a la innovación y desarrollo de las tecnologías y materias primas, para la mejora de la eficiencia en la producción de bioetanol y biodiésel (Cardona, 2009).

En tal sentido, estas decisiones estarán interferidas por la disponibilidad de los recursos económicos escasos, determinantes de las combinaciones de los insumos que se utilizarán para producir distintas combinaciones de productos finales (Schuschny, 2007). Por lo tanto, lograr la mejor combinación de los recursos escasos es de interés para la economía, lo cual motiva el estudio de los conceptos de la función de producción, la productividad y la eficiencia (Lidón, 1998).

Según Álvarez (2001), la medida de la eficiencia productiva puede analizarse desde la perspectiva de la eficiencia técnica, en donde pueda medirse comparativamente la eficiencia de asignación óptima de recursos, la eficiencia de los rendimientos a escala

la eficiencia de las unidades de producción entre el mismo grupo que las integra, que para el caso de estudio está representado por el grupo de países de América Latina productores de biocombustibles.

Por su parte, Farrell (1957), precursor del estudio sistemático del concepto de eficiencia, aportó en su trabajo seminal la metodología del DEA, orientada a comparar la eficiencia de un conjunto de unidades (DMU) que producen outputs (productos) similares a partir de una serie de inputs (insumos, recursos o factores) comunes (Pedraja, Salinas y Smith, 1997). Basados en las ideas de Farrell, Charnes, Cooper y Rhodes (1978) perfeccionaron la técnica DEA de medición de los niveles de eficiencia relativa de las DMU, con orientación a los input y output.

La técnica DEA de programación lineal pertenece a los llamados métodos de fronteras o no paramétricos, dado que no requiere hipótesis alguna sobre la frontera de producción, es decir, define la eficiencia de una DMU con respecto a las unidades observadas como el mejor comportamiento, en lugar del comportamiento medio, como se trata en el análisis estadístico o de regresión (Quesada, 2005). Se considera un método de fronteras, en razón a que evalúa el máximo nivel de los output con el menor nivel de input necesarios para la producción de un cierto nivel de output (Pastor, 1995). Sin embargo, un grave inconveniente en su utilización como método de clasificación es la posibilidad de tener unidades vinculadas con relativa eficacia igual al 100%, es decir, unidades en la frontera de la eficiencia relativa. Diversos autores abordan este inconveniente utilizando diversos dispositivos para romper el empate, tal como la evaluación cruzada (Pereira, 2000; Cook y Kress, 1990; Green, Doyle y Cook, 1996), supereficiencia (Andersen y Petersen, 1993) o de regiones (Cooper, Seiford y Tone, 1999).

Por su parte, autores como Pedraja et al. (1997), en relación con la flexibilidad del DEA, para el análisis de restricciones de los factores y muestras de tamaño reducido estiman que la técnica DEA ha de considerar una proporción elevada de DMU eficientes aplicando ponderaciones nulas a un número elevado de inputs, es decir, en la medida en que las DMU aumentan, disminuye la proporción tanto de DMU eficientes como de DMU que asignan ponderaciones nulas a los inputs utilizados. En este sentido, para la medida de la frontera de eficiencia real se recomienda introducir restricciones adicionales que reflejen la importancia relativa de los inputs.

Asimismo, para observar un mejor funcionamiento en cuanto a la efectividad del DEA, Drake y Howcroft (1994) señalan que el número de DMU consideradas debe ser aproximadamente el doble de la suma de los inputs y output definidos, supuesto que se cumplió para el desarrollo de esta investigación.

De otro lado, diversas aplicaciones de la metodología DEA evidencian la utilidad y la importancia de esta herramienta para el análisis de eficiencia técnica de las DMU, particularmente en el campo de la producción de biocombustibles. Entre las aplicaciones se encuentra el estudio realizado por Hashem, Rafiee, Jafari y Mohammadi (2011), en donde se estima la eficiencia de la conversión de energía de productores de soya en Irán considerando 8 insumos —trabajo humano, combustible diésel, maquinaria, fertilizantes, productos químicos, agua para riego, electricidad y energía de semillas— y una sola salida de rendimiento de grano. Este trabajo también ayudó a clasificar a los agricultores en eficientes e ineficientes y óptimos para identificar necesidades de energía y derroche de energía. Por su parte, Vlontzos, Niavis y Manos (2014) evaluaron la eficiencia energética y medioambiental de los sectores primarios de los países miembros de la UE aplicando el método del DEA no radial mediante ajustes no proporcionales a insumos energéticos y productos indeseables para la estimación variada de la eficiencia energética y medioambiental.

Otro estudio con aplicación del DEA fue la evaluación del ciclo de vida de eficiencia energética de 6 sistemas de biocombustibles en China examinado la eficacia de 6 enfoques para la producción

de bioetanol con una muestra de trigo, maíz, yuca y batatas como materias primas de los procesos (Ren et al., 2014).

En América Latina, diversos estudios y autores, entre ellos Brandão y Cavalcanti (2002), aplicaron la metodología DEA para el proceso de selección y clasificación de los competidores en la industria petrolera brasileña (PETROBRAS); Benita, Gaytán y Rodallegas (2012) estudiaron el comportamiento de la eficiencia e ineficiencia de las industrias mineras en el Estado de Zacatecas; Pardo y Cotte (2011) determinaron las tendencias de la eficiencia energética en la industria manufacturera colombiana, analizando los sectores intensivos energéticamente. Otros autores, como Blanco, Zuñiga, Sierra, Dios y Curbelo (2014), se apoyaron en la técnica DEA para medir el impacto del uso de biomasa en la bioeconomía de las biorrefinerías azucareras de la región centroamericana.

3. Metodología

En esta sección se describen el método y los materiales utilizados en la medición de la eficiencia de la producción de biocombustibles en América Latina, región que es considerada con un elevado potencial para el desarrollo de tecnologías orientadas a mejorar los procesos de elaboración de combustibles orgánicos, como alternativa sustentable para el crecimiento económico de dicha región.

La investigación fue de tipo cuantitativo, descriptiva y evaluativa, dado que mediante esta se realizó un análisis de las variaciones de eficiencia de los países mencionados como productores de biocombustibles; asimismo, se especificaron las variables de entrada y salida y la jerarquización de los diferentes tipos de eficiencia evaluados para la región objeto de investigación. Para el cálculo de las eficiencias con las variables de entrada y salida se utilizó el software licenciado DEA Solver Pro 11, el cual permitió obtener las eficiencias de los países productores de biocombustibles.

El grupo de países seleccionados para el análisis de eficiencia estuvo conformado por los 9 Estados que representan las DMU objeto de estudio, como son: Brasil, Colombia, Argentina, Ecuador, México, Paraguay, Perú, Bolivia y Uruguay.

La selección de la región latinoamericana como caso de estudio permitió mayor validez a la investigación con la aplicación del método DEA, dado que los países analizados pertenecen a una región relativamente homogénea y, por lo tanto, la eficiencia técnica de los procesos productivos no se verá afectada por las condiciones climáticas en la producción de insumos y biolimitaciones físicas. En razón de lo anterior, los insumos para la producción de biocombustibles considerados en este estudio correspondieron a las variables de los inputs producción anual en toneladas de caña de azúcar y soya obtenidos de la base de datos FAOSTAT, y de los outputs o productos finales biodiésel y bioetanol obtenidos en los procesos productivos y repostados en la CEPAL, y cuyos datos más recientes corresponden al año 2010.

A continuación se presentan las variables de entrada y salida identificadas para la evaluación de las eficiencias relativas de los países latinoamericanos seleccionados; asimismo, se describen los inputs considerados como recursos de entrada y los outputs o productos finales evaluados en dichos procesos productivos.

Dentro de los insumos identificados para la evaluación de las eficiencias de producción de biocombustibles en América Latina, se consideraron los siguientes:

- Caña de azúcar: planta cespitosa con tallos de hasta 5 o 6 metros por 2–5 centímetros, con numerosos entrenudos alargados vegetativamente, dulce, jugosa y dura, utilizada en la elaboración de bioetanol.
- Soya: planta oleaginosa cultivada por sus semillas, de alto contenido en aceite y proteínas, utilizada en la elaboración de biodiésel.

Como variables de salidas se tienen los productos finales bioetanol y biodiésel obtenidos en los procesos productivos de cada país seleccionado, como se muestra a continuación:

- Bioetanol: alcohol que deriva de la fermentación de los azúcares que se encuentran en ciertos vegetales.
- Biodiésel: combustible compuesto de ésteres monoalcalinos de ácidos grasos de cadenas largas, derivados de aceites vegetales o grasas animales.

Para la aplicación de la técnica DEA se asumieron m inputs $\{x_{ij}; i = 1, \dots, m\}$ y s outputs $\{y_{rj}; r = 1, \dots, s\}$. Para las j DMU $\{DMU_j; j = 1, \dots, n\}$, los pesos de los inputs y de los outputs se denotaron $v_i \{i = 1, \dots, m\}$ y $u_r \{r = 1, \dots, s\}$, respectivamente. La eficiencia técnica de una DMU es definida como la relación entre los outputs e inputs (García, Serrano y Roa, 2003), como se muestra en la ecuación 1.

$$Eficiencia_j = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \quad (1)$$

La eficiencia en la producción de biocombustibles de las DMU_{j0} analizadas fue medida utilizando el modelo CCR (abreviatura de los nombres de los inventores: Charnes, Cooper y Rhodes) orientado a outputs (CCR-O), que tomó como constante los inputs caña de azúcar y soya, como se muestra en ecuación 2. La ecuación 3, representa el límite superior de eficiencia de las demás DMU, cuyo valor máximo de eficiencia técnica es 1.

$$\text{Max } \theta_{j0} = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij0}} \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij0}} \leq 1 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (3)$$

$$u_r \geq 0 \dots (r = 1, \dots, s)$$

$$v_i \geq 0 \dots (i = 1, \dots, m)$$

Donde θ_{j0} representa la eficiencia técnica de las DMU j_0 .

En este estudio, el enfoque orientado a output se consideró más apropiado debido a que la producción de input de las DMU estudiadas presenta variaciones exiguas dadas las limitaciones presupuestales de los países latinoamericanos para cumplir e impulsar el crecimiento agrícola (CEPAL, IICA y FAO, 2012); además, como una recomendación, la conservación de entrada de productos parece ser más lógica.

4. Resultados

De los resultados obtenidos en esta investigación (tabla 3) se observa que de los 9 países latinoamericanos analizados, los que

Tabla 3
Eficiencia calculada en la producción de biodiésel de soya con el modelo CCR-O

Número	DMU	Score	Rank	1/Score
1	Argentina	2,14E-03	6	467,871715
2	Bolivia	5,20E-03	5	192,355079
3	Brasil	1,39E-03	7	721,645866
4	Colombia	0,2751787	2	3,63400219
5	Ecuador	2,66E-02	3	37,6575527
6	México	0,01839393	4	54,3657658
7	Paraguay	7,44E-05	9	13.449,5611
8	Perú	1	1	1
9	Uruguay	2,20E-04	8	4.535,51995

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4
Eficiencia calculada en la producción de bioetanol de caña de azúcar con el modelo CCR-O

Número	DMU	Score	Rank	1/Score
1	Argentina	3,42E-02	9	29,2220863
2	Bolivia	0,29552393	4	3,38382073
3	Brasil	1	1	1
4	Colombia	0,21785178	5	4,5902769
5	Ecuador	0,40995686	3	2,43928104
6	México	5,26E-02	8	19,0101018
7	Paraguay	0,67266656	2	1,48662065
8	Perú	0,13926662	7	7,18047143
9	Uruguay	0,20732095	6	4,82343923

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5
Clasificación de países por niveles de eficiencia en la producción de biodiésel

Eficientes Países: 1	Eficiencia alta Países: 0	Eficiencia media Países: 0	Eficiencia baja Países: 8
Perú			Argentina Bolivia Brasil Colombia Ecuador México Paraguay Uruguay

Fuente: elaboración propia.

presentan mejores resultados en la producción de biodiésel, considerando como materia prima la soya y el modelo CCR-O utilizado, con orientación a las salidas, es Perú, con la máxima eficiencia de 1¹, seguido de Colombia y Ecuador, con 0,27 y 0,26, respectivamente. En cuanto a Perú, su máxima eficiencia está relacionada con las políticas energéticas limpias y el aumento de las capacidades técnicas y tecnológicas en la producción de oleaginosas.

Del análisis de eficiencia de los 10 países de Latinoamérica que producen bioetanol a partir de la caña de azúcar (tabla 4), se tiene que Brasil es considerado el país con la mayor eficiencia (igual a 1), seguido de países como Paraguay (0,67) y Ecuador (0,40), siendo Brasil el líder en la producción de energías renovables a partir de la destilación y fermentación de los azúcares provenientes de la caña.

En este sentido, los resultados obtenidos permiten identificar las potencialidades, las fortalezas y las capacidades productivas de las regiones objeto de estudio (Brasil, Colombia, Paraguay y Ecuador) en lo que respecta a la producción de biocombustibles tales como el biodiésel y bioetanol a partir de la soya y la caña de azúcar. No obstante, cuando se evalúan sus capacidades productivas, estos son subutilizados en algunos países como Colombia y Ecuador, que presentan niveles bajos de eficiencia en la producción de biodiésel, al igual que Ecuador y Paraguay en la fabricación de bioetanol, teniendo este último un nivel de eficiencia medio.

Con base en los índices de eficiencia del modelo DEA CCR-O con orientación a salidas, se definió la siguiente clasificación en 4 categorías (países eficientes, con eficiencia alta, con eficiencia media y eficiencia baja) para identificar los intervalos por grupos de eficiencia obtenidos en la evaluación de eficiencia de los países productores de biodiésel y bioetanol; así: a) países eficientes: eficiencia = 1 y cero holguras; b) países con eficiencia alta: 1 > eficiencia ≥ 0,80; c) países con eficiencia media: 0,80 > eficiencia ≥ 0,60, y d) países con eficiencia baja: eficiencia < 0,60. Los resultados de esta clasificación para los países productores de biodiésel y bioetanol se presentan en las tablas 5 y 6.

¹ Una organización es eficiente cuando el nivel de eficiencia alcanza el valor máximo de 1.

Tabla 6
Clasificación de países por niveles de eficiencia en la producción de bioetanol

Eficientes Países: 1	Eficiencia alta Países: 0	Eficiencia media Países: 1	Eficiencia baja Países: 7
Brasil		Paraguay	Argentina Bolivia Colombia Ecuador México Perú Uruguay

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7
Incremento requerido para alcanzar la eficiencia óptima en la producción de biodiésel por país

DMU	Score	Incremento en la producción de soya (t)
Argentina	2,14E-03	563.240.572,9
Bolivia	5,20E-03	34.288.916,62
Brasil	1,39E-03	1.042.918.698
Colombia	0,2751787	784.100.3069
Ecuador	2,66E-02	1.205.520,277
México	0,01839393	2.161.313,514
Paraguay	7,44E-05	70.201.488,81
Perú	1	0
Uruguay	2,20E-04	21.303.174,71

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8
Incremento requerido para alcanzar la eficiencia óptima en la producción de bioetanol por país

DMU	Score	Incremento en la producción de caña de azúcar (t)
Argentina	3,42E-02	780.258,279
Bolivia	0,29552393	164.745,279
Brasil	1	0
Colombia	0,21785178	860.192,647
Ecuador	0,40995686	149.819,657
México	5,26E-02	1.405.120,04
Paraguay	0,67266656	47.083,8767
Perú	0,13926662	256.307,982
Uruguay	0,20732095	7.043,08094

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Con base en los resultados de las variaciones en los niveles de eficiencia identificados para los países productores de biodiésel y bioetanol, considerando el modelo DEA CCR-O, se obtuvo que Perú y Brasil presentaron eficiencias igual a 1; 7 de ellos presentaron bajos niveles de eficiencia en la producción de biocombustibles, y solo uno (Paraguay) mostró tener eficiencia media en la fabricación de bioetanol. Para alcanzar el óptimo de eficiencia para el caso de los países que mostraron bajas variaciones, el modelo permitió cuantificar los valores necesarios que deberían tomar las variables de salidas del proceso a fin de lograr la eficiencia máxima, es decir, 1. Este valor de salida de cada país según el tipo de biocombustible procesado se presenta en las **tablas 7 y 8**.

En la **tabla 7** se observa que el país líder en la producción de biodiésel de soya en Latinoamérica es Perú, con una eficiencia de 1, seguido de Colombia y Ecuador, cuyas eficiencias están clasificadas como bajas; para que estos 2 últimos países incrementen su eficiencia productiva se requiere considerar aumentar las entradas de insumos de soya en 784.100,30 y 1.205.520,27 toneladas en general, respectivamente. De igual forma, en el análisis para el resto de países productores de biodiésel que presentan eficiencias

muy bajas, como es el caso de Paraguay, sus esfuerzos serán mayores al considerar no solo sus capacidades productivas, sino también las capacidades técnicas, tecnológicas e innovadoras, y se requiere incrementar en 70.201.488,81 toneladas de soya para lograr la eficiencia máxima, es decir, aumentar en 9 veces la producción de soya de Colombia.

Con relación a la **tabla 8**, se mantiene la fortaleza de Brasil como primer país latinoamericano productor de bioetanol a partir de la caña de azúcar, seguido de Paraguay y Ecuador. Sin embargo, para que estos 2 últimos países alcancen la frontera de eficiencia se hace necesario que eleven sus niveles de producción de caña de azúcar en 47.083,87 y 149.819,65 toneladas, respectivamente. Con relación a Colombia, sus propósitos deben orientarse a mejorar sus procesos productivos, dado que el esfuerzo que se requiere para lograr la eficiencia de Brasil está alrededor de las 860.192,647 toneladas.

En general, los países latinoamericanos productores de biocombustibles mostraron en promedio una eficiencia del 11% y una ineficiencia del 88%, lo que evidencia el rezago importante de esta región en cuanto a las capacidades productivas y tecnológicas que permitan alcanzar altos niveles de productividad y disminución en la dependencia del uso de combustibles fósiles.

Evidentemente, la investigación muestra en sus resultados que a pesar de que América Latina tiene un alto potencial para la producción de combustibles biológicos, este no es plenamente aprovechado debido a las deficientes capacidades productivas y tecnológicas aplicadas en las regiones. Esta exigua capacidad productiva derivada por la baja inversión en proyectos de expansión e innovación limita las oportunidades de desarrollo y crecimiento de estos países.

Asimismo, de esta investigación se resalta la importancia de los resultados, así como la metodología utilizada, la cual se ofrece a los sectores energéticos de la región a fin de que se puedan realizar futuras investigaciones en donde se requiera evaluar las eficiencias de las empresas que constituyan el sector, con el propósito de tomar decisiones acertadas encaminadas al mejoramiento de la política energética de las organizaciones objeto de análisis.

La realización de futuras investigaciones permitirá considerar, en los sectores energéticos de cada país, diferentes variables de entradas y salidas del modelo DEA, y considerar, de acuerdo con los propósitos estratégicos, el tipo de orientación CCR-O – CCR-I que facilite la mejor evaluación del desempeño productivo y las correspondientes oportunidades y recomendaciones para el incremento de la eficiencia en los países de América Latina.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

Altieri, M. y Nicholls, C. I. (2000). *Teoría y práctica para una agricultura sustentable. Serie Textos Básicos para la Formación Ambiental* (1.ª ed.). México D.F: PNUMA - Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe.

Álvarez, A. (2001). *La medición de la eficiencia y la productividad*. Madrid: Pirámide.

Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2008). *Desarrollo sostenible: medio ambiente cambio climático y energía*. Washington: BID.

Andersen, P. y Petersen, N. C. (1993). *A Procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis*. *Management Science*, 39(10), 1261–1264.

Benita, F. J., Gaytán, E. D. y Rodallegas, M. (2012). *Un estudio no paramétrico de eficiencia para la minería de Zacatecas, México*. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 14(1), 54–75.

Biofuels Taskforce (2005). *Report of the Biofuels Taskforce to the Prime Minister*. Australian Government. Commonwealth of Australia [consultado 15 Sep 2015]. Disponible en: http://www.soe-townsville.org/data/biofuel_pm_report.pdf

Blanco, N. V., Zuñiga, C. A., Sierra, P., Dios, R. y Curbelo, A. J. (2014). *Impacto del uso de biomasa en la bioeconomía de los ingenios azucareros centroamericanos*. *Universitas (León): Revista Científica de la UNAN León*, 5(1), 26–58.

Brandão, R. y Cavalcanti, M. A. (2002). *A data envelopment analysis model for ranking suppliers in the oil industry*. *Pesquisa Operacional*, 22(2), 123–131.

Callejas, E. y Gasca, V. (2009). *Los biocombustibles*. *El Cotidiano*, (157), 75–82.

- Cardona, C. A. (2009). *Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: contextos latinoamericano y mundial*. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, (29), 109–120.
- CEPAL (2009). *Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe*. CEPAL-Colección de Documentos de proyectos. Copyright Naciones Unidas.
- CEPAL (2011). *Estudio regional sobre la economía de los biocombustibles en 2010: temas clave para los países de América Latina y el Caribe*. COMU- NIICA (IICA) [consultado 17 Sep 2014]. Disponible en: <http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3906/LCW412.es.pdf?sequence=1>
- CEPAL, IICA y FAO. (2012). *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: FAO, CEPAL IICA.
- Charnes, A., Cooper, W. W. y Rhodes, E. (1978). *Measuring the efficiency of decision making units*. *European journal of operational research*, 2(6), 429–444.
- Coelho S. (2005). *Biofuels — Advantages and Trade Barriers*. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) [consultado 15 Sep 2014]. Disponible en: <http://unctad.org/en/docs/ditcted20051.en.pdf>
- Cook, W. D. y Kress, M. (1990). *A data envelopment model for aggregating preference rankings*. *Management Science*, 36(11), 1302–1310.
- Cooper, W. W., Seiford, L. M. y Tone, K. (1999). *Data Envelopment Analysis*. Nueva York: Kluwer Academic Publishers.
- Drake, L. y Howcroft, B. (1994). *Relative efficiency in the brand network of a UK bank: An empirical study*. *Omega*, 22(1), 83–90.
- Dufey, A., Vermeulen, S. y Vorley, W. (2007). *Biofuels: Strategic Choices for Commodity Dependent Developing Countries*. Common Fund for Commodities (CFC) [consultado 15 Sep 2014]. Disponible en: <http://www.common-fund.org/download/actualiteit/07Biofuels.pdf>
- Farrell, M. J. (1957). *The measurement of productive efficiency*. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(3), 253–281.
- García, J. E., Serrano, V. C. y Roa, A. L. L. (2003). *Competitividad y eficiencia*. *Estudios de Economía Aplicada*, 21(3), 423–450.
- Garvett, M. L., Vizcaya, F. y Melean, C. A. (2011). *Objetivos de sostenibilidad agrícolas referida a la tendencia en los patrones de producir etanol a partir del maíz y de la caña de azúcar en Venezuela como materia prima* [consultado 18 Sep 2014]. Disponible en: http://www.mp.gob.ve/c/document_library/get_file?p.Lid=10240&folderId=4366311&name=DLFE-7759.pdf
- Gómez, D. P. (2010). *Suramérica y la seguridad energética: Una visión a la luz del sistema político internacional*. *Dikaion*, 19(1), 195–217.
- González, J. y Valero, E. (2011). *Energía y desarrollo humano. Un acercamiento a los biocombustibles*. *Revista Electrónica Intec*, 1(2), 66–84.
- Green, R. H., Doyle, J. R. y Cook, W. D. (1996). *preference voting and project ranking using DEA and cross-evaluation*. *European Journal of Operational Research*, 90(6), 461–472.
- Guadix, A., Guadix, E. M., Páez, M. P., Gonzales, P. y Camacho, F. (2000). *Procesos tecnológicos y métodos de control en la hidrólisis de proteínas*. *Ars Pharmaceutica*, 41(1), 79–89.
- Hashem, S., Rafiee, S., Jafari, A. y Mohammadi, A. (2011). *Optimization of energy consumption for soybean production using Data Envelopment Analysis (DEA) approach*. *Applied Energy*, 88(11), 3765–3772.
- Lidón, J. (1998). *Conceptos básicos de economía*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- López, J. H. (2008). *Geopolítica del petróleo y crisis mundial*. *Dyna*, 75(156), 1–7.
- Pardo, C. I. y Cotte, A. (2011). *La eficiencia energética en la industria manufacturera Colombiana: una estimación con análisis envolvente de datos-DEA y datos de panel*. *Economía, Gestión y Desarrollo*, (11), 39–58.
- Pastor, J. M. (1995). *Eficiencia, cambio productivo y cambio técnico en los bancos y cajas de ahorro españolas: un análisis frontera no paramétrico*. *Revista Española de Economía*, 12, 35–73.
- Pedraja, F., Salinas, J. y Smith, P. (1997). *On the role of weight restrictions in data envelopment analysis*. *Journal of Productivity Analysis*, 8(2), 215–230.
- Pereira, M. (2000). *Análise envoltória de dados e perspectivas de integração no ambiente de apoio à decisão*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- Quesada, V. (2005). *Análisis de eficiencia en la logística portuaria mediante DEA [tesis doctoral]*. Universidad de Sevilla.
- REN21 (2009). *Renewables Global Status Report: 2009 Update*. Paris, REN21 Secretariat. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH [consultado 18 Sep 2014]. Disponible en: <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/RE.GSR.2009.Update.pdf>
- Ren, J., Tan, S., Dong, L., Mazzi, A., Scipionia, A. y Sovacool, B. K. (2014). *Determining the life cycle energy efficiency of six biofuel systems in China: A Data Envelopment Analysis*. *Bioresource Technology*, 162, 1–7.
- Schuschny, A. R. (2007). *Método DEA y su aplicación al estudio del sector energético y las emisiones de CO₂ en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Song, M., An, Q., Zhang, W., Wang, Z. y Wu, J. (2012). *Environmental efficiency evaluation based on data envelopment analysis*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4465–4469.
- Torres, E. y Hernández, R. (2006). *Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabras*. *Acta Universitaria*, 16(2), 27–37.
- Vlontzos, G., Niavis, S. y Manos, B. (2014). *A DEA approach for estimating the agricultural energy and environmental efficiency of EU countries*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 91–96.
- Wang, K., Wei, Y. M. y Zhang, X. (2012). *A comparative analysis of China's regional energy and emission performance: Which is the better way to deal with undesirable outputs?* *Energy Policy*, 46, 574–584.
- Zhou, P., Ang, B. W. y Poh, K. (2008). *A survey of data envelopment analysis in energy and environment studies*. *European Journal of Operational Research*, 189(1), 1–18.