

Optimización de la gestión ambiental y económica del recurso energético biomasa para la generación de energía eléctrica en Nicaragua

Optimization of the environmental and economic management of the biomass energy resource for power generation in Nicaragua

Napoleón Vicente Blanco Orozco 0000-0002-9912-1210^{1*};
Lorraine Giraud 0000-0002-1801-5978².

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Electrotecnia y Computación, Universidad Nacional de Ingeniería. Managua, Nicaragua. napoleon.blanco@fec.uni.edu.ni *

²Universidad Simón Bolívar, Departamento de Planificación Urbana, Grupo de Investigación Vida Urbana y Ambiente.

Recibido: 06 abril, 2022. **Aprobado:** 10 mayo, 2022. **Versión final:** 30 junio, 2022.

Resumen

En este artículo, utilizando un enfoque paradigmático mixto, se plantea una metodología, basada en el análisis de datos envolventes (DEA) e índices de Malmquist, que permite la optimización del aprovechamiento de la biomasa como un recurso natural energético para evitar que sea empleada en actividades poco productivas y ambientalmente no sostenibles. Por lo que, se evaluó el uso y estado actual de la biomasa de Nicaragua entre los años 2015-2020 a través de la teoría fundamentada, con lo que se confirmó el potencial de su empleo a futuro. Así mismo, se hizo un análisis comparativo de las diferentes metodologías de gestión ambiental y económica de recursos energéticos, y usando el método de síntesis se teorizó y se logró una metodología que permite optimizar la gestión ambiental y económica de la biomasa residual agrícola para generar energía eléctrica. Finalmente, usando el método de estudios de casos se aplicó la metodología de optimización y se encontró la productividad del uso de la biomasa residual en Nicaragua para la generación de energía eléctrica, lo que permite optimizar su uso al comparar la eficiencia calculada de cada unidad.

Palabras clave: optimización, gestión ambiental y económica, biomasa.

Como citar: Blanco, N., & Giraud, L. (2022). Optimización de la gestión ambiental y económica del recurso energético biomasa para la generación de Energía Eléctrica en Nicaragua. *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, 20(1), 87–103. <https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022008> 

Abstract

In this article, using a mixed paradigmatic approach, a methodology is proposed, based on the analysis of enveloping data (DEA) and Malmquist indices, that allows the optimization of the use of biomass as a natural energy resource in order to avoid its use in unproductive activities and environmentally unsustainable. Therefore, the use and current state of biomass in Nicaragua was evaluated through grounded theory, which confirmed the potential for its use in the future. Also, a comparative analysis of the different methodologies of environmental and economic management of energy resources was made and using the synthesis method, a methodology was theorized and achieved that allows optimizing the environmental and economic management of agricultural residual biomass for power generation. Finally, using the case study method, the optimization methodology was applied and the productivity of the use of residual biomass in Nicaragua for power generation was found; which allows optimizing its use by comparing the calculated efficiency of each unit.

Keywords: Optimization, environmental and economic management, biomass

1. Introducción

Los recursos energéticos están siendo explotados en Nicaragua de forma insostenible lo que supone su desperdicio y futuro agotamiento; por lo que, con el presente trabajo de investigación, se aporta para mejorar esta situación a través de la propuesta de una metodología que permite la gestión óptima del aprovechamiento de la biomasa como un recurso natural energético que constituye a un área estratégica de desarrollo sostenible.

Por lo que en esta investigación se indagó si el recurso energético biomasa está siendo usado a través de métodos de aprovechamiento sostenibles y ambientalmente adecuados; de forma que, se valoró el estado actual de los recursos energéticos determinando sus potenciales empleos a futuro de forma sostenible. Así, se calculó la biomasa aprovechable a través de la relación de los usos de la biomasa con los rendimientos agrícolas productivos empleando índices de residuos; luego, empleando el poder calorífico de los residuos, se determinó el potencial energético en 38 041 127 (MW-HR) anuales. Además, usando la teoría fundamentada se documentaron las variables que inciden en el consumo de leña como energético.

De forma similar, se analizaron metodologías de gestión ambiental y económica de recursos energéticos como los algoritmos de optimización heurística, la técnica de decisión multicriterio (TDM), el balance energético y ambiental y la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV); de forma que, usando un análisis comparativo y la síntesis, se propone una metodología basada en el análisis de datos envolventes (DEA) y los índices de Malmquist que posibilitan la gestión ambiental y económica para el aprovechamiento de la biomasa en la generación de energía eléctrica.

Este artículo está compuesto de cuatro secciones una introducción, luego se presenta la sección de metodología, la sección de los resultados obtenidos, su discusión y, finalmente, se presentan las conclusiones.

2. Metodología

La postura epistemológica de esta investigación subyace en el método mixto con mayor énfasis en el análisis inductivo cualitativo y con enfoque disciplinar de la economía ambiental. Así mismo, el estudio fue de tipo explicativo, no experimental, basado en el estudio de casos y la simulación.

Inicialmente, se utilizó la revisión documental de métodos y herramientas para el cumplimiento de los objetivos de este estudio. Luego, usando la teoría fundamentada y el soporte informático Atlas ti, se valoró el uso de la biomasa como recurso energético entre los años 2015-2020. Así mismo, se realizó un análisis comparativo de metodologías de gestión ambiental y económica y, luego, se sintetizó una propuesta metodológica sustentada en el análisis de datos envolvente (DEA) y los índices de Malmquist que permiten optimizar la gestión ambiental y económica del recurso energético biomasa.

Finalmente, para validar la propuesta metodológica se utilizó el método de estudio de casos; aplicando la metodología en un ejemplo del recurso de residuo biomásico para generar energía eléctrica.

3. Resultados y discusión

Como resultado del empleo de la teoría fundamentada y el soporte informático Atlas ti, se obtuvieron los códigos y familias relacionados al propósito de la evaluación del uso de la biomasa con fines energeticos, y del análisis de la unidad Hermenéutica se encontró que para el cálculo de la biomasa aprovechable tiene sentido hacer una relación de los usos de la biomasa con los rendimientos agrícolas productivos a través de índices de residuos. Por lo que, se emplearon datos de producción agrícola entre los años 2015 y 2020 (Sistema Nacional de Producción y Consumo, 2021) los que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Áreas de producción agrícola en Nicaragua 2015-2021

Tipo de cultivo	Áreas cultivadas en Ha 2015-2016	Áreas cultivadas en Ha 2016-2017	Áreas cultivadas en Ha 2017-2018	Áreas cultivadas en Ha 2018-2019	Áreas cultivadas en Ha 2020-21	Promedio anual de áreas cultivadas en Ha 2015-2021
Frijol rojo	220287	246680	220640	225260	240976	230769
Arroz	54320	66710	67690	69300	74724	66549
Maíz	268823	350700	318010	282380	262905	296564
Frijol negro	2887	2500	3290	3080	1613	2674
Sorgo rojo	23449	24920	14630	6650	6770	15284
Sorgo blanco	24690	25830	19530	15400	14491	19,988
Sorgo millón	12751	12600	10570	15400	13481	12960
Café	100842	120050	133056	148862	163268	133216
Maní	36093	42280	46060	46200	46200	43367
Caña de azúcar	65381	74130	76160	77140	76238	73810
Ajonjolí	8184	4634	6650	6370	6593	6486
Cacao	8632	12950	13510	15820	1666	10516

Fuente: Sistema Nacional de Producción y Consumo, 2021

De forma que, al obtener las áreas de producción y con el índice de producción de residuos agrícolas asociado a cada cultivo, se obtiene la cantidad de residuos disponibles considerando un factor de residuo técnico a cada cultivo y una biomasa aprovechable del 65%. De manera que, se obtuvo la cantidad disponible de residuos anuales que se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Residuos agrícolas en Nicaragua

Tipo de cultivo	Área en Hectáreas	Cantidad promedio anual 2015-2020	Biomasa aprovechable
Frijol rojo	230769	92307	60000
Arroz	66549	114464	74401
Maíz	296564	177938	76659
Frijol negro	2674	1390	903
Sorgo rojo	15284	275112	178822
Sorgo blanco	19988	359784	233859
Sorgo millón	12960	233280	151632
Café	133216	55418	36021
Maní	43367	80662	52430
Caña de azúcar	73810	324764	211096
Ajonjolí	6486	1816	1180
Cacao	10516	2103	1366
Bagazo de caña en fábrica			7072630

Fuente: Sistema Nacional de Producción y Consumo, 2021

Así, una vez determinada la cantidad de residuos biomásicos, fue posible obtener el potencial energético teórico disponible de generación de energía eléctrica. De tal suerte que, el potencial energético se obtuvo en base a referencias de índices de la literatura consultada que se multiplican a las cantidades de residuos agrícolas para obtener el potencial energético de la biomasa en estudio. Así, en la tabla 3 se muestra el potencial energético calculado de la producción agrícola considerada para el estudio a nivel nacional de forma anual de 38 041 127 (MW-HR); esta energía se puede aprovechar utilizando la combustión directa o la gasificación para la generación de energía eléctrica.

Tabla 3. Potencial energético teórico de biomasa en Nicaragua

Tipo de cultivo	Cantidad de residuos en toneladas	PCI (kcal/ton)	Potencial energético (Kcal) anuales	Potencial energético (MW-HR) anuales
Frijol rojo	60000	3,845	230400	0,268
Arroz	74401	3,700	275283	0,320
Maíz	76659	4,180	320434,620	0,372
Frijol negro	903	3,845	3472,035	0,004
Sorgo rojo	178822	3,991	713678,602	0,83
Sorgo blanco	233859	3,991	933331,269	1,085
Sorgo millón	151632	3,991	605163,312	0,703
Café	36021	4,200	151288,200	0,175
Maní	52430	4,533	237665,19	0,27
Ajonjolí	1180	3,991	4,709.380	0,0054
Cacao	1366	3,081	4,208.646	0,0048
Bagazo de caña de azúcar	7072630	4,132	29224107160000	33987636
Total				38 041 127

Fuente: elaboración propia en base a Jiménez (2019); Fonseca et al. (2017) Trejos (2018); Curto et al. (2017); Londoño (2017); Berastegui et al. (2017) y Sánchez (2013).

De igual forma, en Nicaragua la biomasa es el energético más empleado representando el 81.5% del total de la energía primaria consumida y de este total, la leña representa un 56.9%, el bagazo y residuos vegetales 20.7 % y otras biomásas el 3.9%; por lo tanto, la leña es el principal componente biomásico empleado en Nicaragua con fines energéticos (MEM, 2021). De forma similar, el 59.2 % de los hogares nicaragüenses, comprendiendo el 63% de la población, usan leña para cocinar, convirtiéndose en el combustible más usado, seguido del gas butano y gas propano que es usado por el 38.3% de los hogares (Ruiz y Morales, 2016). Al mismo tiempo, el consumo per cápita es de 1.81 Kg/habitante /día promedio de leña (MEM, 2011).

Por otro lado, según el Ministerio de Energías y Minas de Nicaragua (MEM), el 80 % de la leña que se usa en Nicaragua es para la elaboración de alimentos y el 20 % para actividades productivas y a nivel de consumo de energía primaria el uso de leña para cocinar en Nicaragua compite con el consumo de derivados de petróleo (MEM, 2021). Por lo consiguiente, la leña se utiliza primordialmente para la cocción de alimentos, siendo el patrón de consumo de leña urbano diferente al rural. Al mismo tiempo, en el consumo de leña inciden diversas variables. En este sentido, como resultado de la aplicación de la teoría fundamentada, se obtuvo que las variables que inciden son: la variable económica debido a la predominante economía de subsistencia y a la poca disponibilidad de recursos económicos para la adquisición o el uso continuo de otros combustibles, la variable ambiental que se relaciona con el tema de que el biocombustible leña es considerado neutro en sus emisiones de carbono y la variable física caracterizada por la dificultad de acceso debido a la ubicación o la localización de la biomasa.

Por otro lado, la variable técnica se relaciona con el hecho de que el consumo de leña está en función de los dispositivos utilizados para cocinar, su diseño y de los materiales utilizados en su elaboración. Así mismo, la variable social está relacionada con el aspecto demográfico del tamaño del hogar y la edad de los miembros de la familia que inciden en el consumo de leña. Y el componente cultural dicta que la cantidad de leña usada depende del tamaño familiar.

De la misma forma, el alto consumo de leña se debe a la ineficiencia de su uso, lo cual se podría disminuir mejorando la oferta tecnológica sustituta y así, disminuir la presión sobre el bosque (Altamirano, 2019). Por lo que, la gestión del recurso energético leña se debería realizar a través de la organización territorial de uso de suelos para identificar las áreas donde es factible la extracción planificada de leña proveniente de cultivos apropiados para este fin o como resultado de los desechos de las actividades agrícolas, respetando la proporción que se debe dejar en campo con fines de devolver nutrientes de forma natural al suelo.

En resumen, la leña es un combustible muy importante en el balance energético de Nicaragua, concentrándose su participación en el sector residencial urbano y rural, pero las tecnologías utilizadas para el aprovechamiento resultan ineficientes.

Con respecto al uso del recurso forestal, en la

actualidad, la cobertura es de alrededor del 25% de la superficie del país (INAFOR, 2021). La cobertura forestal de Nicaragua ha disminuido al igual que en los demás países tropicales provocada principalmente por actividades humanas; la cobertura forestal nicaragüense en 1969 era del 76% de su territorio con algún tipo de bosque, en el año 2015 la cobertura boscosa descendió al 30% del territorio nacional (MARENA, 2018). Por otra parte, la contribución del sector forestal al producto interno bruto es moderada con tendencia decreciente, al pasar de 3.8% en 1991 a 1.2% en 2016 (Veloza, 2018). Por lo que, el aprovechamiento sostenible de la cobertura forestal en Nicaragua es aún incipiente y tiene mucho potencial de aprovechamiento a través de servicios ecosistémicos o a través de su comercialización sostenible.

Por otro lado, en el caso del análisis comparativo de metodologías de gestión ambiental y económica para el uso sostenible y empleo de la biomasa como fuente de energía renovable se inicia el examen con la metodología de análisis envolvente de datos (DEA) e índices de Malmquist. Así, la metodología DEA se emplea para evaluar el desempeño de un conjunto de unidades de producción que, a partir de un conjunto de insumos, genera productos determinando la relación de eficiencia y estimando una frontera de mejores prácticas, sobre las cuales se ubican las unidades eficientes (Guevel, 2020). De tal suerte que, la metodología DEA puede ser empleada para optimizar recursos como es la función de reducir sus costos de operación potenciando el benchmarking entre empresas productoras con el propósito de obtener los mejores resultados (Miranda et al., 2016).

Por tanto, la productividad de una unidad de producción se analiza a través de su comparación con una función frontera de producción eficiente; esta función de producción eficiente significa que la eficiencia técnica de una unidad de producción se compara con la de otras unidades a partir de la cual se estima la función frontera representativa (Coelli, 2008). Análogamente, la función frontera es una función límite que representa la maximización de una función de producción (Zúñiga, 2010).

Por otra parte, para medir la productividad de unidades de producción energética, uno de los métodos empleado para estimar las fronteras de eficiencias de las plantas eléctricas es el método DEA (Ludena, 2012; O'Donnell, 2012; Zúñiga, 2010; Bravo-Uretra, 2007). Así mismo, el método de datos envolventes (DEA) junto con los índices de Malmquist usan datos de panel

para calcular cambios en los índices de productividad total de factores (PTF) que pueden ser: cambio tecnológico; cambio de eficiencia técnica y cambio de escala de eficiencia. Para revisar el modelo matemático del análisis DEA ver las publicaciones (Blanco,2021; Blanco y Zuniga, 2013).

De tal forma que, luego de recopilar la información de entrada y salida a los sistemas de generación de energía empleando biomasa, se procede al análisis de la productividad en el aprovechamiento de estos energéticos usando la herramienta metodológica de datos envolventes (DEA) y los índices de Malmquist para realizar una comparación en la productividad entre las diferentes centrales de generación de energía eléctrica. Y para el cálculo, se hace uso del programa de simulación DEAP 2.1 que contiene los algoritmos del proceso metodológico DEA y del método Malmquist.

Por otro lado, las otras metodologías analizadas fueron la metodología de algoritmos de optimización heurística que es un procedimiento para resolver un problema complejo de optimización mediante una aproximación que incluye programación matemática lineal o no lineal. No obstante, los métodos heurísticos se limitan a proporcionar una buena solución no necesariamente óptima y estos métodos hacen uso de recursos de hardware de cómputo de forma considerable. Además, se analizó la técnica de decisión multicriterio (TDM) que es un proceso de análisis de la mejor alternativa a seleccionar para la implementación de un emprendimiento, e involucra el examen de variables que no pueden reducirse a representarse por un numerario o valor de comparación.

No obstante, se aclara que a pesar de que la técnica de multicriterio mejora el proceso de evaluación, también agrega complejidad al procedimiento. Sin embargo, el problema fundamental de la TDM radica en la subjetividad asignada a los criterios de decisión y su ponderación que pueden sesgarse debido a los intereses de los expertos y participantes en el proceso de selección de alternativas. Pero en esencia, las TDM son metodologías que ayudan a la toma de decisión, no a la optimización del uso de un recurso determinado

Por otra parte, dentro de las metodologías para la gestión ambiental se tiene el balance energético y ambiental, que consiste en realizar el balance de emisiones de CO₂, (Solar, 2013). Así mismo, el balance energético se puede aproximar usando valores absolutos de energía neta ganada o perdida procedente de la diferencia entre salidas y entradas de energía.

Por otra parte, existe la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV) que consiste en cuantificar todas las corrientes de entrada y salida durante la vida de un producto (Olachica et al., 2010).

En forma similar, los autores Restrepo y Bazzo (2015) describen al método de ciclo de vida como un análisis de flujo de masa y energía involucradas en las diferentes etapas de un proceso productivo. Así, el análisis de ciclo de vida (ACV) tiene en su proceso metodológico cuatro etapas: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario del ciclo de vida, evaluación del impacto del ciclo de vida y análisis de mejoras (Rodríguez, Fernández y Fernández, 2014).

Comparación de metodologías de gestión de recursos energéticos

Las metodologías fueron comparadas considerando las ventajas que ofrece cada una de ellas en materia de la solución que proporciona cada método al problema de optimización, la información que es necesaria para realizar el análisis, la facilidad de aplicación del modelo matemático que implica cada método, la sencillez de la aplicación y si la salida del análisis permite la gestión eficiente del recurso energético en estudio.

De igual manera, se consideraron las desventajas de cada metodología incluyendo la necesidad de infraestructura informática para ejecutar el algoritmo que represente a cada solución, la complejidad del modelo, la objetividad del método en cuanto al análisis de variables y si el método permite brindar una solución de optimización de las variables en estudio.

Por lo tanto, la metodología seleccionada fue el análisis envolvente de datos (DEA) e índices de Malmquist, puesto que permite optimizar el uso de un recurso energético de una unidad de producción en función de su comparación con una función frontera de producción eficiente.

De forma que, luego de haber empleado el método de análisis comparativo considerando las diferentes metodologías de gestión ambiental y económica del empleo de la biomasa como fuente de energía llegamos al momento de utilizar el método de síntesis para unir las partes del todo heurístico, efectuar una derivación inductiva de las metodologías y teorizar para establecer un proceso metodológico que permita optimizar el empleo de la biomasa con fines energéticos, lo cual se puede observar de forma gráfica en la figura 1.

Metodología de gestión ambiental y económica del recurso energético biomasa que optimiza su empleo para la generación de energía eléctrica

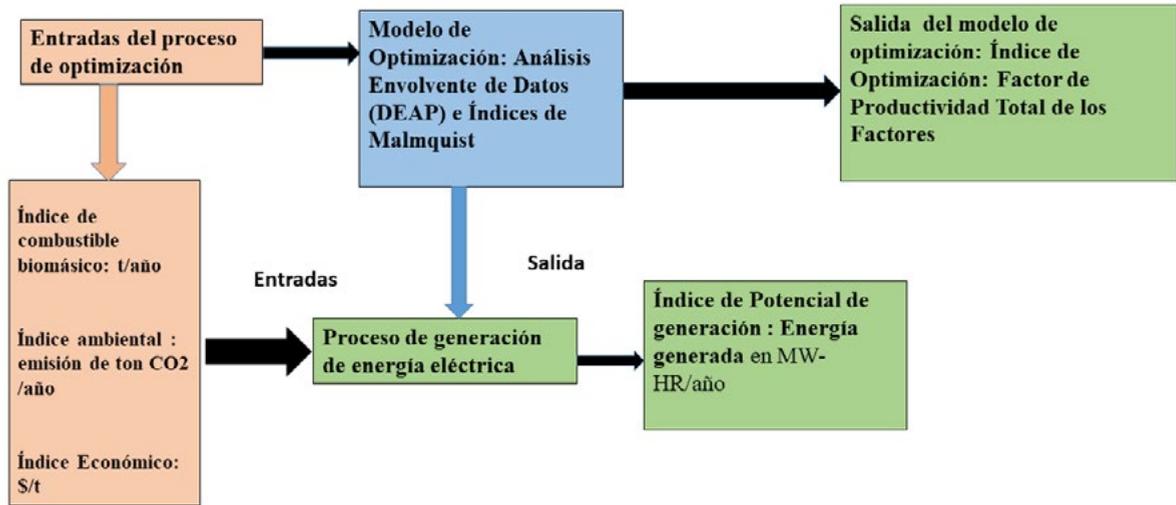


Figura 1. Metodología de gestión ambiental y económica del recurso energético biomasa que optimiza su empleo para la generación de energía eléctrica

De tal forma que, la metodología de optimización sintetizada tiene como entradas los índices de optimización siguientes:

El índice de combustible biomásico que representa la biomasa aprovechable calculada en la evaluación de potencial energético de la región de estudio. El índice ambiental que representa la emisión de CO₂ en toneladas anuales provocadas principalmente por el transporte de la biomasa residual hasta la planta de generación. El índice económico que está representado por el costo promedio aproximado de cada tonelada de residuo. Y, además, como salida del proceso de generación de energía que la metodología optimiza se tiene el índice de potencial de generación de energía que proviene de la evaluación del uso del recurso energético biomasa en Nicaragua y es el potencial energético en unidades de energía eléctrica (MW-HR) al año.

Luego, la generación de energía eléctrica a través de residuos agrícolas es optimizada mediante el modelo propuesto analizando la productividad del aprovechamiento de las entradas y salidas usando

la herramienta metodológica de datos envolventes (DEA) y los índices de Malmquist para realizar una comparación entre fronteras de eficiencia de las diferentes centrales de generación de energía eléctrica analizadas. Para el cálculo, se hace uso del programa de simulación DEAP 2.1 que contiene los algoritmos del proceso metodológico del método DEA y Malmquist; en este estudio se emplea la medida de Output-Orientado.

Estudio de caso

El caso de estudio incluye un panel de datos considerando un escenario de plantas de generación de energía eléctrica a través de la gasificación de residuos de producción agrícola y usando los índices: índice de combustible biomásico que es la estimación de la cantidad de residuo biomásico producido por las diferentes actividades agrícolas en Nicaragua (ver tabla 4). El índice económico de costos de cada tonelada de residuo puesta en la central de generación que incluye transporte y secado, considerado como de cuatro dólares por tonelada (ver tabla 6). El índice ambiental calculado como las emisiones asociadas a la gasificación del combustible biomásico computado a través de un factor de emisión declarado por el

IPCC¹ de 55,000 kg CO₂/TJ de salida de gas pobre del gasificado (ver tabla 6). Y el índice potencial de generación de energía eléctrica que resulta de la conversión de energía de los residuos biomásicos (ver tabla 7).

Tabla 4. Índice de combustible biomásico

Tipo de cultivo	Toneladas 2016	Toneladas 2017	Toneladas 2018	Toneladas 2019	Toneladas 2020
Frijol rojo	57275	64137	57366	58568	62654
Arroz	60730	74582	75677	77477	83541
Maíz	104841	136773	124024	110128	102533
Frijol negro	976	845	1112	1041	545
Sorgo rojo	274357	291564	171171	77805	79214
Sorgo blanco	288869	302211	228501	180180	169549
Sorgo millón	149181	147420	123669	180180	157731
Café	27268	32462	35978	40252	44148
Maní	43636	51117	55687	55856	55856
Caña de azúcar	7776282	8063033	7763185	7707877	7526648
Ajonjolí	1489	843	1210	1159	1200
Cacao	1561	1684	1756	2057	2225

Fuente: Sistema Nacional de Producción y Consumo, 2021.

Tabla 5. Índice económico

Tipo de cultivo	Costo de residuo US\$/Ton 2016	Costo de residuo US\$/Ton 2017	Costo de residuo US\$/Ton 2018	Costo de residuo US\$/Ton 2019	Costo de residuo US\$/Ton 2020
Frijol rojo	229099	256547	229466	234270	250615
Arroz	242919	298327	302710	309910	334164
Maíz	419364	547092	496096	440513	410132
Frijol negro	3903	3380	4448	4164	2181
Sorgo rojo	1097427	1166256	684684	311220	316855
Sorgo blanco	1155478	1208844	914004	720720	678198

1 Intergovernmental panel on climate change. 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

Tipo de cultivo	Costo de residuo US\$/Ton 2016	Costo de residuo US\$/Ton 2017	Costo de residuo US\$/Ton 2018	Costo de residuo US\$/Ton 2019	Costo de residuo US\$/Ton 2020
Sorgo millón	596723	589680	494676	720720	630925
Café	109071	129846	143913	161009	176591
Maní	174544	204466	222746	223423	223423
Caña de azúcar	31105128	32252131	31052738	30831510	30106591
Ajonjolí	5958	3374	4841	4637	4800
Cacao	6244	6734	7025	8226	8898

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Índice Ambiental

Tipo de cultivo	Kg CO2 2016	Kg CO2 2017	Kg CO2 2018	Kg CO2 2019	CO2 2020
Frijol rojo	51,22	57,36	51,31	52,38	56,03
Arroz	52,27	64,19	65,13	66,68	71,90
Maíz	101,9	133,0	120,6	107,1	99,7
Frijol negro	0,8726	0,7556	0,9945	0,9311	0,4875
Sorgo rojo	254,69	270,66	158,90	72,23	73,53
Sorgo blanco	268,16	280,54	212,12	167,26	157,39
Sorgo millón	138,49	136,85	114,80	167,26	146,42
Café	26,64	31,71	35,15	39,32	43,13
Maní	46	54	59	59	59
Caña de azúcar	129062	130241	128742	162803	154009
Ajonjolí	1,383	0,783	1,124	1,076	1,114
Cacao	1,1186	1,2065	1,2586	1,4738	1,5942

Fuente: IPCC, 2006

Tabla 7. Índice de generación

Tipo de cultivo	Energía KW-HR 2016	Energía KW-HR 2017	Energía KW-HR 2018	Energía KW-HR 2019	Energía kW-HR 2020
Frijol rojo	256,12	286,80	256,53	261,90	280,17
Arroz	261,33	320,93	325,65	333,39	359,49
Maíz	509,7	664,9	602,9	535,4	498,4
Frijol negro	4,3632	3,7782	4,9727	4,6553	2,4377
Sorgo rojo	1273,44	1353,30	794,50	361,13	367,67

Tipo de cultivo	Energía KW-HR 2016	Energía KW-HR 2017	Energía KW-HR 2018	Energía KW-HR 2019	Energía kW-HR 2020
Sorgo blanco	1340,80	1402,72	1060,59	836,31	786,97
Sorgo millón	692,43	684,25	574,01	836,31	732,11
Café	133,19	158,56	175,74	196,62	215,64
Maní	230	269	294	294	294
Caña de azúcar	645310	651205	643711	814015	770045
Ajonjolí	6,913	3,915	5,618	5,381	5,570
Cacao	5,5931	6,0323	6,2932	7,3692	7,9711

Fuente: elaboración propia

De la simulación usando el programa DEAP 2.0 y considerando doce centrales de generación que utilizan los residuos en estudio indicados, cinco años de observación, una salida (índice de generación) y tres entradas (índice de combustible biomásico, índice económico, índice ambiental), un análisis orientado a optimizar la salida en forma de energía generada y el enfoque de Malmquist DEA, se obtienen los resultados de la tabla número 8.

Tabla 8. Resultados de análisis DEA e índices de Malmquist de generación bioenergética usando residuos agrícolas en Nicaragua

Central de generación Firm	Cambio de la eficiencia técnica effch	Cambio tecnológico techch	Cambio de la eficiencia pura pech	Cambio de la eficiencia a escala sech	Cambio de la productividad total de los factores tfpch
1. Central gasificando residuo de Frijol rojo	0.921	0.998	1.230	0.748	0.918
2. Central gasificando residuo de Arroz	0.977	1.000	0.979	0.998	0.977
3. Central gasificando residuo de Maíz	1.090	1.016	1.151	0.947	1.108
4. Central gasificando residuo de Frijol Negro	0.977	1.215	1.000	0.977	1.186

Central de generación Firm	Cambio de la eficiencia técnica effch	Cambio tecnológico techch	Cambio de la eficiencia pura pech	Cambio de la eficiencia a escala sech	Cambio de la productividad total de los factores tfpch
5. Central gasificando residuo de Sorgo Rojo	0.573	0.968	0.621	0.922	0.555
6. Central gasificando residuo de Sorgo Blanco	0.632	0.999	0.641	0.986	0.631
7. Central gasificando residuo de Sorgo Millón	1.330	1.028	1.328	1.002	1.368
8. Central gasificando residuo de Café	0.834	1.033	1.000	0.834	0.861
9. Central gasificando residuo de Maní	0.594	0.996	0.679	0.875	0.592
10. Central gasificando residuo de Caña de Azúcar	1.000	1.017	1.000	1.000	1.017
11. Central gasificando residuo de Ajonjolí	0.920	0.830	0.498	1.848	0.764
12. Central gasificando residuo de Cacao	1.000	1.110	1.000	1.000	1.110
Promedio	0.878	1.014	0.890	0.986	0.890

Fuente: elaboración propia en base a salida de programa DEAP 2.0

Por lo tanto, un valor mayor que uno para el Factor de Productividad Total indicará crecimiento del período analizado y desde este punto de vista, las centrales que muestran crecimiento en su productividad son: central gasificando residuo de Maíz, central gasificando residuo de Frijol Negro, central gasificando residuo de Sorgo Millón, la central gasificando residuo de Caña de Azúcar y la central con residuos de cacao.

Además, en promedio geométrico el ritmo de crecimiento interanual de la productividad total de los factores, durante el periodo de estudio para las centrales en estudio fue de 11 % deficiente, este bajo ritmo de

crecimiento es razonable en Nicaragua que es un país donde la bioeconomía del uso de residuos agrícolas es incipiente en los procesos productivos como un enfoque epistemológico alternativo a los combustibles fósiles.

De forma que, la baja productividad total de los factores en la bioeconomía se explica fundamentalmente porque únicamente se presenta un crecimiento interanual del cambio tecnológico, que se manifiestan como desplazamientos de la frontera de eficiencia (mejor biotecnología del uso de residuos agropecuarios como biomasa) de 1.4 %, siendo deficiente en los cambios en la eficiencia técnica, o sea cambios en la distancia a la frontera, acercamiento o convergencia (uso de tecnología en la producción), en la eficiencia pura (indicando deficiencia en la capacidad y la asistencia técnica de los trabajadores en el proceso productivo de la bioeconomía) y la eficiencia de escala (rendimientos productivos en economías de escala).

De forma particular, el empleo del residuo de maíz para la generación de energía eléctrica presenta un crecimiento del 10.8 % en la productividad total de los factores que es debido a un crecimiento del 9% en la eficiencia técnica (uso de tecnología en la producción) y que puede ser interpretada como una medida relativa de la capacidad de gestión de una tecnología dada y se deriva de la mejora en la toma de decisiones, que a su vez están relacionados con una serie de variables, como el conocimiento, la experiencia y la educación. También, este recurso residual del maíz presenta un aumento de 1.6 % en el cambio tecnológico (biotecnología del uso de residuos agropecuarios como biomasa) que se debe al efecto de la productividad a partir de la adopción de nuevas prácticas de producción y se refiere también a las inversiones en investigación y tecnología, un crecimiento del 15 % en la eficiencia pura (eficiencia en la capacidad y la asistencia técnica de los trabajadores en el proceso productivo de la bioeconomía); no obstante, presenta un decrecimiento del 5.3 % en la eficiencia de escala, es decir se presenta una des economía de escala posiblemente debido a los aumentos de costos de producción.

Así mismo, el empleo de residuos de frijol negro presenta un crecimiento de la productividad total de los factores del 18.6 % que es debido únicamente al aumento del 21.5 % en el cambio tecnológico; presentando oportunidad de mejora (2.3 % decreciente) en la eficiencia técnica y de escala. En el caso del empleo de residuo de sorgo millón se muestra un crecimiento del 36.8 % en la productividad total de los factores, que se explica principalmente por un crecimiento del 33 %

en la eficiencia técnica y un 32.8 % de crecimiento de la eficiencia pura; además, de un crecimiento del 2.8 % del cambio tecnológico, y un 0.2 % de crecimiento de la eficiencia de escala.

Por otro lado, el empleo de bagazo de caña presenta una productividad total de los factores del 1.7 % debido al crecimiento del cambio tecnológico de la biotecnología del uso del residuo de la molienda de caña de azúcar en los ingenios azucareros. De la misma forma, el empleo de residuos de cacao presenta del 11 % debido exclusivamente al crecimiento de la productividad del cambio tecnológico.

En suma, del análisis de la gestión de los residuos agrícolas considerados en este estudio para su empleo en la generación de energía eléctrica de los resultados se puede resumir que sería óptimo el empleo de centrales gasificando residuo de maíz, de frijol negro, de sorgo millón, residuo de caña de azúcar y residuos de cacao.

Discusión

La eficiencia en el empleo de las energías renovables es un nuevo paradigma en el aprovechamiento de los recursos energéticos y la generación de energía eléctrica de forma óptima y amigable con el ambiente contribuyendo a la economía de unidades de producción y al desarrollo de la sociedad (Bohórquez y Garavito, 2021). Así mismo, la optimización de sistemas energéticos trae consigo beneficios económicos (Sáchica, 2020); beneficios que pueden incidir positivamente en el ambiente al emplear de forma sostenible los recursos energéticos. En este sentido, Blanco (2018) muestra la relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico y su relación con el ambiente a través de las emisiones de dióxido de carbono; lo que significa que, si se impacta positivamente en la eficiencia del uso de recursos energéticos y por tanto, en su uso racional, se obtendrá un beneficio a la economía y la sociedad.

Con respecto a la evaluación del recurso biomásico en forma de residuos agrícolas el enfoque de considerar estos datos de producción y afectarlos por índices de producción de residuos y utilizando el poder calorífico de las distintas biomásas para obtener el potencial energético de generación coincide con el autor Blanco (2021) en un estudio sobre la posibilidad de generar electricidad en sistemas de generación distribuida utilizando los residuos agrícolas a pequeña escala en la región del oeste de Nicaragua. Además, autores como

Asprilla (2016) usan una metodología similar a la expuesta en esta investigación, al realizar la evaluación del recurso biomásico con base en información de índices de potencial energético de residuos agrícolas, proporcionados por instituciones nacionales y centros de investigación, Igual a lo anterior, Natarajan et al. (2015) determinaron el potencial biomásico con el mismo enfoque en su estudio en India.

Por otra parte, del análisis del uso de la biomasa en forma de leña, desde una perspectiva de gestión y planificación a corto plazo, se tiene que la leña sigue siendo el principal energético usado para la cocción de alimentos y en algunas aplicaciones de la pequeña industria en las áreas urbanas y rurales de Nicaragua y de Centroamérica. Por lo que, el énfasis propuesto de entender las variables que inciden en el uso de la leña es compartido por Gonzales et al. (2012) quienes consideran que el conocimiento de la dinámica de uso y manejo de la leña es una oportunidad para desarrollar estrategias, planes y proyectos en beneficio de la conservación.

De la misma forma, Escobar et al. (2009) razonan que se ha actuado muy poco en alternativas para el manejo eficiente de la leña; esto coincide con lo planteado en este estudio al proponer que para mejorar la eficiencia de empleo de la leña se exploren alternativas como el uso de cocinas mejoradas y el ordenamiento de la extracción y comercialización de la leña. Igualmente, Vázquez et al. (2016) proponen como alternativa tecnológica al uso de la leña, el empleo de la estufa, y así impactar positivamente en la economía y la salud de las familias.

Por otro lado, la pérdida de la cobertura forestal en Nicaragua hasta llegar actualmente al 25% pronuncia la urgencia de gestión de estrategias de manejo sostenible de los bosques y la recuperación de la cobertura. En atención a lo anterior, Torres (2015) propone, al igual que en este estudio, pagos por servicios ambientales de los bosques como instrumento para una buena gobernanza forestal, como una oportunidad para mitigar la deforestación en Nicaragua, puesto que a través del uso sostenible del bosque se pueden prestar servicios ambientales como protección y manejo de cuencas hidrográficas, secuestro de dióxido de carbono, generador de oxígeno y protección de la diversidad biológica.

Por otra parte, la propuesta de metodología de optimización de la gestión ambiental y económica sustentada en el enfoque DEA y los índices de Malmquist coincide con lo planteado en CEPAL

(2007) que refleja que este método se torna en un instrumental de análisis económico con validez para estudiar la práctica de unidades productivas a través del análisis multidimensional de entradas y salidas usando la comparación del desempeño de procesos productivos que es precisamente el enfoque metodológico propuesto aquí al considerar variables de entradas como la producción de residuos agrícolas y la de salida de generación de energía eléctrica.

De la misma forma, Rempel, Diehl y De Quadros (2017) estudiaron la eficiencia técnica del sector de distribución de energía eléctrica de Brasil usando el enfoque DEA encontrando que únicamente una de las diecisiete empresas distribuidoras mostró ser eficiente desde el enfoque de productividad; así, el enfoque de estos autores coincide con el de esta investigación al determinar las empresas que muestran mayor eficiencia en función de las variables consideradas. Por su parte, Navarro, Delfin y Díaz (2019) utilizaron la metodología DEA y el estadístico bootstrap para estudiar la eficiencia técnica global, la eficiencia técnica pura y la eficiencia de escala del sector eléctrico de México durante el periodo 2008-2015, encontrando que ninguno de los sectores analizados logra la eficiencia requerida de mayor a la unidad; aun cuando, los autores refieren que en México se ha tenido la capacidad de abastecer la demanda de energía eléctrica, no se ha hecho con la eficiencia técnica óptima. Por tanto, el enfoque de estos autores es similar al de esta investigación con la diferencia de que en este escrito se consideran los índices de Malmquist que permiten identificar con más precisión si la eficiencia técnica ha incrementado en el tiempo y si se explica por cambio tecnológico o por la eficiencia de escala.

En este mismo sentido, los autores Ma, Chunbo; Zhao, Q; Ma Y. Zhao. (2011) utilizaron el análisis envolvente de datos (DEA) y el enfoque de Malmquist para estimar las ganancias de eficiencia relativa en el sector eléctrico Chino e identificar los factores significativos que afectan a los cambios de eficiencia antes y después de la última reforma en 2002 de la industria eléctrica de China. Además, estos autores refieren que el análisis envolvente de datos (DEA) puede medir productividad y comparar varias empresas generadoras con respecto a las empresas más eficientes, pudiendo también identificar las fuentes de ineficiencia que es la misma postura de esta investigación en lo respectivo a la comparación de las unidades de generación de energía eléctrica empleando los diferentes residuos agrícolas en función de una frontera de eficiencia.

En este mismo sentido, el autor Ludena (2012) analizó el factor de productividad y crecimiento en la agricultura y sus subsectores en América Latina y el Caribe y para estimar el crecimiento de la productividad utilizó el índice de Malmquist y la metodología análisis de datos envolvente (DEA). En forma semejante, O'Donnell (2012) utilizó el análisis DEA para hacer inferencias sobre los rendimientos a escala y medidas del cambio de productividad total de los factores y la eficiencia en la agricultura de EE. UU. y los resultados mostraron que los principales motores de cambio en la productividad agrícola fueron los avances técnicos y las mejoras en la eficiencia de escala.

Por otro lado, Zúniga (2013) propone medir la productividad total de los factores de bioeconomía utilizando el método de índice de Malmquist para construir una frontera de eficiencia y de esta forma examinó el crecimiento en la productividad de la bioeconomía en siete países durante el período de 1980 a 2007. En este mismo enfoque, Blanco y Zúniga (2013) empleando la metodología de datos envolventes (DEA) y los índices de Malmquist estudiaron la productividad total de los factores de los procesos de generación de energía eléctrica en centrales que emplean biomasa proveniente del bagazo de caña en Nicaragua comparando entre sí los ingenios, encontrando que el ingenio Monte Rosa tiene un mayor índice en el ritmo de crecimiento interanual de productividad total de los factores explicado por los cambios en la eficiencia técnica más que en el cambio tecnológico; siendo este enfoque idéntico a lo aplicado en este estudio.

Del mismo modo, Blanco (2018) evaluó la productividad del uso de recursos energéticos de agentes del mercado eléctrico nicaraguense con sistemas de cogeneración que usan recursos energéticos bagazo de caña y de los derivados del petróleo para la generación de energía eléctrica, empleando el método DEA e índices de Malmquist y encontró que la productividad total de los factores del uso de bagazo para generar energía eléctrica registra un decrecimiento interanual. Por tanto, el uso del método DEA y los índices de Malmquist para medir la productividad total de los factores en centrales de generación de energía es un factor en común de las publicaciones mencionadas con respecto a este escrito.

De igual manera, Sanhueza y Rudnick (2007) al estudiar la eficiencia de empresas de distribución en Chile emplearon la metodología DEA para obtener medidas de eficiencia técnica con el fin de proponer

acciones y estrategias para la reducción de costos para las empresas en estudio. Así mismo, Barrios (2007) utilizó el método de análisis envolvente de datos (DEA) para comparar unidades de producción cañera en Villa Clara, Cuba, a través del análisis de los insumos y productos logrando un ordenamiento en función de la eficiencia relativa encontrada y además determinando qué recursos se pueden emplear para mejorar la eficiencia. Por tanto, el enfoque de los autores citados anteriormente coincide con los resultados encontrados en este estudio al utilizar los índices combustible biomásico, índice económico y el ambiental como entradas de las centrales de generación para maximizar su empleo para la generación de energía y obteniendo como resultado la medición de eficiencia de cada central en función del factor de productividad total de los factores, pudiéndose ordenar el empleo en función de los índices de productividad resultantes.

Análogamente, Morelos (2016) empleó el análisis DEA para evaluar las variaciones de eficiencia de los países productores de biocombustibles en Latinoamérica destacándose Perú y Brasil. Al mismo tiempo, Moreno et al. (2019) hicieron uso del método DEA para medir el desempeño ambiental agrícola en América Latina y el Caribe durante el año 2012 coincidiendo estos autores con este escrito al considerar la variable de emisiones agrícolas de dióxido de carbono como una variable ambiental que les permitió el análisis y encontraron que Bahamas, Brasil, Chile, Costa Rica y México alcanzaron el máximo nivel de eficiencia en todas las mediciones de eficiencia.

De la misma forma, Fontalvo, Morelos y Mendoza (2019) de forma similar al trabajo de investigación presente hicieron un análisis de la eficiencia técnica de las empresas del sector carbón y sus derivados en Colombia, durante el periodo 2011-2014 a través del análisis envolvente de datos (DEA). Los autores Fontalvo et al. (2019) analizaron catorce grandes empresas del sector y valoraron las eficiencias de las empresas; obteniendo como resultado coincidente con los expuestos en este escrito, al aportar criterios a los tomadores de decisiones en la planificación de recursos energéticos para mejorar la eficiencia en el sector. Así mismo, Gaytán y Benita (2014) cuantificaron y analizar los niveles de eficiencia técnica en la minería no petrolera de México usando el análisis envolvente de datos (DEA) considerando que las variables de localización, especialización e infraestructura productiva son explicativas de la eficiencia y que se deben considerar para elevar los niveles de eficiencia en el aprovechamiento de los diferentes minerales

estudiados, lo anterior significa que el análisis DEA permite no solo determinar la eficiencia de cada unidad de producción, sino explicar cuáles son las fortalezas y oportunidades de mejora en las variables consideradas en el estudio que es similar al punto de vista de este estudio.

Conclusión

Se concluye que como respuesta al problema de investigación que originó este artículo se obtuvo una metodología que optimiza la gestión ambiental y económica del uso de biomasa con fines energéticos. Se refiere además que, luego de haber empleado el método de análisis de las diferentes metodologías de gestión ambiental y económica y de haber utilizado el método de síntesis se logró la unión heurística y derivación inductiva de las metodologías, concluyendo con la teorización de un modelo sustentado en el análisis de datos envolvente y los índices de Malmquist que permiten optimizar el empleo de la biomasa con fines energéticos.

Se concluye también que la metodología de gestión ambiental económica propuesta permite dadas una entrada de índices (índice de combustible biomásico, índice ambiental e índice económico) la optimización del empleo del recurso biomasa en el proceso de conversión energética que tiene como salida la generación de energía eléctrica y que el modelo de optimización entrega información expresada en el factor total de productividad que contiene el análisis de la productividad de las centrales de generación empleando residuos biomásicos.

También, se validó la metodología de gestión ambiental y económica para el uso sostenible de la biomasa a través de su aplicación en un estudio de caso, simulándose el empleo de residuos agrícolas como recursos energéticos para la generación de energía eléctrica en Nicaragua, encontrándose la productividad de cada central; lo que permite la optimización del uso del recurso energético al comparar la eficiencia de cada unidad entre sí para la generación de energía eléctrica.

Adicionalmente, se encontró desde la perspectiva de gestión y planificación el recurso energético biomasa y sus componentes económicos y ambientales se están empleando de forma no sostenible; utilizándose

en actividades económicas con poco valor agregado como el uso de leña en la cocción de alimentos a nivel residencial y poco aprovechamiento industrial. De la misma manera, se concluye que el manejo del recurso forestal dista de ser sostenible y, al contrario, se ha documentado la pérdida acelerada de la cubierta forestal nicaragüense.

Agradecimientos

Se agradece al Fondo Verde y a la Universidad Nacional de Ingeniería, pues a través de una beca de ambas instituciones fue posible realizar esta investigación.

Referencias bibliográficas

- Arceo, Á; Sotolongo, J; Cuza, R y Bosch, O. (2001). Impacto ambiental de las tecnologías de aprovechamiento energético de la biomasa. *Tecnología Química*, 21(2),98-104.
- Aguilar, M. (1994).Análisis del consumo doméstico de leña en la macro región del pacífico de Nicaragua,1994.[Tesis de grado,Universidad Nacional a Agraria]. <https://repositorio.una.edu.ni/906/1/tnp07a283.pdf>
- Asprilla, D. (2016). Estudio de sistemas híbridos de energía renovable (solar – gasificación de biomasa) como alternativa para satisfacer necesidades energéticas en zonas no interconectadas del departamento del Chocó. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia.
- Altamirano, A; Jirón, E y Oporta, R. (2019). Comportamiento de la extracción y consumo de la leña en la comunidad de la Montañita durante el segundo semestre 2018. [Trabajo de graduación para optar al título de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]. <https://repositorio.unan.edu.ni/11285/1/19843.pdf>
- Azqueta, D. (2007). *Introducción a la economía ambiental*. (2ª ed). Mac graw Hill. Madrid,España. ISBN 978-84-481—6058-6.
- Blanco, N. (2021). Generación de energía eléctrica en sistemas de generación distribuida de pequeña escala usando bioenergía en Nicaragua. *Revista fuentes, el reventón energético*, 19(1), 21–31.<https://doi.org/10.18273/revfue.v19n1-2021003>

- Blanco, N.(2018). Productividad del uso de recursos energéticos en los agentes del mercado eléctrico nicaragüense con sistemas de cogeneración. *Tecnología en Marcha*.31(1), 47-57.doi: 10.18845/tm.v31i1.3496
- Blanco, N y Zuniga, C. (2013). Productivity Analysis in Power Generation Plants Connected to the National Grid: A New Case of bioeconomy in Nicaragua. *Journal of Agricultural Studies*, 1(1). ISSN 2166-0379
- Bohórquez-Araque, A., & Garavito-Reyes, H. (2020). Feasibility analysis of the implementation of geothermal energy in waters associated for the production of hydrocarbons. *Revista Fuentes, El reventón energético*, 19(1), 33–43. <https://doi.org/10.18273/revfue.v19n1-2021004>.
- Blanco, N y Zuniga, C.(2013). Productivity Analysis in Power Generation Plants Connected to the National Grid: A New Case of bioeconomy in Nicaragua. *Journal of Agricultural Studies*, 1(1). ISSN 2166-0379.
- Blanco-Orozco, N.(2018). Productividad del uso de recursos energéticos en los agentes del mercado eléctrico nicaragüense con sistemas de cogeneración. *Tecnología en Marcha*.31(1), 47-57.doi: 10.18845/tm.v31i1.3496
- Berastegui Barranco, Cristian, Ortega Rodríguez, Juan Pablo, Mendoza Fandiño, Jorge Mario, González Doria, Yahir Enrique, & Gómez Vásquez, Rafael David. (2017). Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz, bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba. *Ingeniare, Revista chilena de ingeniería*, 25(4), 643-653. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000400643>
- Bravo-Uretra, Boris; Solís Daniel, Moreira Víctor; Maripani José; Thian Abdouahmane; Rivas Teodoro, (2007). Technical efficiency in farming: a meta regression analysis. *Journal of Productivity Analysis*, 27(1), 57-72.
- Barrios,G. (2007). La medición de la eficiencia técnica en la producción de caña de azúcar mediante el Análisis Envolvente de Datos. *Centro Azúcar*, 34(4), 1-6.
- Coelli, T. (2008). A guide to DEAP versión 2.1: a data Envelopment Analysis computer program. *CEPA Working Paper 96*. <http://www.uq.edu.au/economics/cepa/deap.php>
- Comisión Económica para América Latina, CEPAL. (2007). *El método DEA y su aplicación al estudio del sector energético y las emisiones de CO₂ Latina y el Caribe*. Publicación de las Naciones Unidas. ISSN impreso 1680-8770.
- Curto-Risso, P., Pena, G., Mantero, C.(2017). Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales [en línea]. Montevideo : Udelar. FI. IIMPI.
- Escobar, M; Niños, J y Yépez, C. (2009). Diagnóstico participativo del uso, demanda y abastecimiento de leña en una comunidad zoque del centro de Chiapas, México. *Ra Ximhai: revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*,5(2), 202-224
- Fontalvo, T; Morelos, J; Mendoza, A. (2019). Evaluación de la eficiencia de las empresas del sector carbón en Colombia. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 27(1), 43-55.
- Farrel, M. (1957). The Measurement of productivity. *Journal of the Royal Society*, 3, 253-290. Recuperado de: <http://www.lib.ctgu.edu.cn:8080/wxcd/qw/285.pdf>
- Fonseca, Sergio D.; Rodríguez, Hugo A.; Camargo, Gabriel.(2017). Caracterización de residuos de maíz del municipio de Ventaquemada. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 8, núm. 2, abril-junio, 2017, pp. 29-36 Executive Business School La Serena, Chile
- Guevel, P. (2020), Categorización de activos financieros utilizando el método no paramétrico DEA. *Cuadernos de Administración (01203592)*. 2020, Vol. 33, p1-11. 11p. DOI: 10.11144/Javeriana.cao33.cfaup.
- Gaytán, E y Benita, F. (2014). La industria minera en México: patrones de desempeño y determinantes de eficiencia. *Lecturas de Economía*,80,103-131. DOI: 10.17533/udea.le.n80a4

- Gonzales, A; Estrada, E y Rivas, G. (2012). Uso de leña y conservación del bosque en el volcán Huitepec, Chiapas, México. *Liminar: estudios sociales y humanísticos*, 10(1), 138-158.
- Instituto Nacional Forestal, INAFOR. (2021). *Extensión de cobertura de bosque*. Recuperado de: <https://www.inafor.gob.ni/index.php/inventario-forestal/#rr1>
- Instituto Nacional de Información de desarrollo, INIDE. (2019). Anuario estadístico 2019. Recuperado de: https://www.inide.gob.ni/docs/Anuarios/Anuario19/Anuario_2019.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Recuperado de: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol2.html>
- Jiménez, Paula Vanesa; Da Silva, Dimas Agostinho; Umlandt, Carlos Maximiliano; Gatani, Mariana Pilar; Medina, Juan Carlos. (2019). Caracterización de cáscara de maní procedente de Córdoba, Argentina; Consejo Federal de Decanos de Ingeniería. *Revista Argentina de Ingeniería*; 13; 7; 5-2019; 71-78
- Labra-Marín, D.; Rayas-Amor, A. A.; Herrera-Hernández, E. C.; Martínez-García, C. G.; García-Martínez, A.; Núñez-López, M. (2018). La optimización como herramienta para la toma de decisiones en sistemas agropecuarios en pequeña escala. *Agroproductividad*, 11(11), 65-70. DOI: 10.32854/agrop.v11i11.1285.
- Londoño, H. (2017). Aprovechamiento de pulpa de café para la producción de biogás en un reactor flujo pistón. [Tesis de maestría. Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de ingeniería. Colombia.]. <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/3297/APROVECHAMIENTO%20DE%20PULPA%20DE%20CAF%20C3%89%20PARA%20LA%20PRODUCCI%20C3%93N.pdf?sequence=1>
- Ludena C. (2012). *Agricultural Productivity Growth, Efficiency Change and Technical Progress in Latin America and the Caribbean*. Paper presentado para una presentación en la conferencia Internacional de la asociación de economistas agrícolas (International Association of Agricultural Economists Triennial Conference, IAAE). Foz do Iguaçu, Brasil.
- Moreno-Moreno, J; Sanz-Díaz, T; Velasco-Morente, F; Ludena, C. (2019). Evaluación del desempeño medioambiental del sector agrícola de América Latina y el Caribe bajo el supuesto de eficiencia natural y gerencial, utilizando DEA. *Revista de Economía Mundial*, 53, 157-178.
- Miranda, A; De Alemeida V; Costa M y Lanzer, E. (2016). Evaluación crítica del modelo de evaluación de costos eficiente utilizado en la regulación de los operadores brasileños de servicios de distribución de energía. *Revista Gestão & Tecnologia*. Vol. 16 Issue 3, p5-30. 26p. DOI: 10.20397/2177-6652/2016.v16i3.1091
- Ma, Chunbo, X.L. Zhao, Q. Ma and Y. Zhao. (2011). China's Electricity Market Reform and Power Plants Efficiency, *Working Paper*, 1125. School of Agricultural and Resource Economics, University of Western Australia, Crawley, Australia. Recuperado de: <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/117811/2/WP110025.pdf>
- Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales, MARENA. (2018). Atlas de cobertura forestal y deforestación en Nicaragua 1969-2015. Recuperado de: <http://www.marena.gob.ni/Enderedd/wp-content/uploads/MemoriasOrganizados/Investigaciones/Atlas.pdf>
- Morelos, José. (2016). Análisis de la variación de la eficiencia en la producción de biocombustibles en América Latina. *Estudios Gerenciales*, 32(139), 120-126.
- Moreno-Moreno, J; Sanz-Díaz, T; Velasco-Morente, F; Ludena, C. (2019). Evaluación del desempeño medioambiental del sector agrícola de América Latina y el Caribe bajo el supuesto de eficiencia natural y gerencial, utilizando DEA. *Revista de Economía Mundial*, 53, 157-178.
- Ministerio de Energía y Minas de Nicaragua, MEM. (2021). *Balance Energético Nacional 2020*. Recuperado de: <https://www.mem.gob.ni/wp-content/uploads/2022/05/Balance-Energetico-Nacional-2020-Vf-enviada-a-DS.pdf>

- Ministerio de Energía y Minas de Nicaragua, MEM. (2011). Estrategia Nacional de Leña y Carbón vegetal de Nicaragua 2011 -2021. Recuperado de: http://www.marena.gob.ni/Enderedd/wp-content/uploads/Docs/Documentos%20Tecnicos/estrategia_lena_carbon%20en%20Nicaragua.pdf
- Navarro, J ; Delfín , O; Díaz , A. (2019). La Eficiencia del Sector Eléctrico en México 2008-2015. *Análisis Económico*,34(85),71-94. DOI: 10.24275/uam/azc/desh/ae/2019v34n85/navarro.
- Natarajan, K., Latva-Käyrä, P., Zyadin, A., Chauhan, S., Singh, H., Pappinen, A. y Pelkonen. (2015). Biomass Resource Assessment and Existing Biomass Use in the Madhya Pradesh, Maharashtra, and Tamil Nadu States of India. *Challenges*,6,158-172. doi:10.3390/challe6010158.
- O'Donnell C., (2012). Econometric estimation of distance functions and associated measures of productivity and efficiency change. Paper presentado para una presentación en la conferencia Internacional de la asociación de economistas agrícolas (International Association of Agricultural Economists Triennial Conference, IAAE). Foz do Iguacu, Brasil
- Ojeda, A.; Herrera, P.; Sierra, J y Tamayo, K. (2015). Evaluación del impacto ambiental del uso de nano partículas de alúmina como aditivo de mezclas biodiesel/diésel mediante análisis de ciclo de vida. *Ingeniería y Competitividad*, 17(1), 133-142. DOI: 10.25100/iyc.v17i1.2208.
- Olachica, M; Narváez, L; Pabón, P y Kafarov, V. (2010). Análisis del ciclo de vida para la producción de biodiesel a base de aceite de higuera empleando la metodología “de la cuna a la cuna” escenario Sabana de Torres, Santander. *Revista ION*, 23(1), 89-98.
- Palacios, R. y Pacheco, J. (2016). Los métodos de decisión multicriterio discretos. Un punto de vista racional aplicado a la toma de decisiones. *Anahuac Journal*, 16 (1), 47-78.
- Pérez, R. y Martínez, M. (2020). Modelo de decisión multicriterio para seleccionar los mejores proyectos productivos en el medio rural Mexicano. *Agroproductividad*, 13(2), 01-107. DOI: 10.32854/agrop.vi.1470.
- Quiroz, M. (2014). Caracterización del proceso de optimización de algoritmos heurísticos aplicados al problema de empaquetado de objetos en contenedores. [Tesis Doctoral. Instituto tecnológico de Tijuana, Mexico].
- Rempel, C; Diehl, C; De Quadros, V; Hansen, P. (2017). Análisis de la eficiencia técnica relativa de empresas brasileñas distribuidoras de energía eléctrica: un enfoque DEA. *Revista Contemporânea de Contabilidade*, 14(33), 33-54. DOI: 10.5007/2175-8069.2017v14n33p33.
- Rodríguez, B; Fernández, M y Fernández, N. (2014). Análisis del ciclo de vida de la generación distribuida en Cienfuegos. *Revista de Ingeniería Energética*, 35(3), 274-285.
- Restrepo, Á y Bazzo, E. (2015). Biomass: Technical and Environmental Alternative in the Thermoelectric Generation Process. *Public Ingeniería y Universidad*, 19(1),67-86. DOI: 10.11144/Javeriana.iyu19-1.btea
- Ruiz, J y Morales, D. (2016). La demanda por leña combustible para la cocción de alimentos en Nicaragua”, *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*. Recuperado de: <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/br/16/lena.html>. ; <http://hdl.handle.net/20.500.11763/br-16-lena>
- Solar, A. (2013). *Metodología para la optimización del aprovechamiento energético de los recursos de biomasa, aplicación en la comunidad Valenciana*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia].
- Sanhueza, R y Rudnick, H.(2007). Metodologías fronteras para la determinación de eficiencia en costos de distribución. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 15(3), 220-226.

- Sistema Nacional de Producción y Consumo. (2021). *Plan Nacional de producción, consumo y comercio*. Recuperado de: <http://nicaraguasandino.com/plan-nacional-de-produccion-consumo-y-comercio-2021/>
- Sáchica, J. A. (2020). Metodología para la optimización del consumo energético bajo el análisis de eficiencia financiera con un alto impacto en la reducción de emisiones de GEI. Caso exitoso de aplicación en el campo más grande de Colombia. *Revista Fuentes, el reventón energético*, 18(2), 107-122. <https://doi.org/10.18273/revfue.v18n2-202000>
- Sánchez, J. (2013). Evaluación energética de cáscara de cacao Nacional y CCN-51. [Tesis de maestría. Universidad de Cuenca, Ecuador]
- Termeh, Seyed Vahid Razavi; Khosravi, Khabat; Sartaj, Majid; Keesstra, Saskia Deborah; Tsai, Frank T.-C.; Dijkstra, Roel; Pham, Binh Thai. (2019). Optimization of an adaptive neuro-fuzzy inference system for groundwater potential mapping. *Hydrogeology Journal*. 27(7), 2511-2534. DOI: 10.1007/s10040-019-02017-9
- Trejo, D. (2018). Producción de pellets de residuos de cultivo de frijol con máximo contenido energético. [Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. México].
- Torres, M. (2015). Los pagos por servicios ambientales como contribución en la gobernanza forestal nicaragüense: Una mirada desde la sentencia Yatama vs. Nicaragua. *Revista de Derecho*, 19, 56-80. ISSN 1993-4505, ISSN-e 2409-1685.
- Vázquez Calvo, Marco Antonio, & Cruz León, Artemio, & Santos Cervantes, Cristóbal, & Pérez Torres, Miguel Ángel, & Sangerman-Jarquín, Dora Ma. (2016). Estufas Lorena: uso de leña y conservación de la vegetación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16, 3159-3172.
- Vidal, A. (2013). Algoritmos Heurísticos en optimización. [Tesis de Maestría. Universidad Santiago de Compostela. España].
- Veloza, R. (2018). *Diagnóstico del Sector Forestal en Nicaragua*. Publicación del Banco Interamericano de desarrollo. Recuperado de: file:///D:/Usuario%20UNI/Downloads/Diagn%C3%B3stico_del_sector_forestal_en_Nicaragua_Movilizando_el_sector_forestal_y_atrayendo_inversiones_es_es.pdf
- Zúniga González, Carlos Alberto (2013). Total Factor Productivity and the Bio Economy Effects. Macrothink Institute. *Journal of Agricultural Studies*, 1(1). <http://www.macrothink.org/journal/index.php/jas/article/view/2383/2424> doi:10.5296/jas.v1i1.2383
- Zúniga G, Carlos A. (2010). Impacto de los Sistemas de Producción Agropecuarios en el Desarrollo Local Sostenible de Nicaragua, 1998-2005: Índice de Malmquist DEA con un Output Orientado. DOI 10.22004/ag.econ.92840.

Abreviaturas

Símbolo	Descripción
MWh	Unidad de energía mega watts por hora
PCI	Poder calorífico inferior
kcal/kg Kilo	Kilocalorías por kilogramos
SIG	Sistemas de información geográfica
MW	Mega watts
MJ/kg	Mega joule por kilogramo
USD/ KWh	Dólares americanos por cada kilo watts hora
USD	Dólar americano