

## Análisis emergético para el aprovechamiento de biomásas en el proceso de combustión

### Emergy analysis in biomass combustion processes

Reinier Jiménez Borges<sup>1,\*</sup>, Aliena de la Caridad Bermúdez Chou<sup>2</sup>, Yoisdell Castillo Alvarez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA). Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez". Carretera a Rodas km, 3 ½. Cuatro Caminos, Cienfuegos.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos.

<sup>3</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Perú.

\*Autor de correspondencia: rjborges@ucf.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](#)



**Recibido:** 31 mayo 2021 **Aceptado:** 13 junio 2021 **Publicado:** 22 de junio 2021

### Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la sostenibilidad del bagazo, residuos agrícolas cañeros y el marabú dentro del proceso de combustión en una caldera tipo retal de 45 t/h de vapor a partir de un análisis emergético. Fueron determinados los índices emergéticos de razón de renovabilidad, carga ambiental, sostenibilidad emergética e índice de sostenibilidad emergética. A partir de la determinación de estos índices se obtuvo que para el caso de la combustión de bagazo la razón de renovabilidad (%R = 58,04) y la razón de eficiencia emergética (EYR = 2,3837) indicando esto que el proceso explota moderadamente los recursos naturales locales y el sistema no es sostenible por sí mismo. Sin embargo, el valor obtenido (ESI = 3,2971) da una medida que el sistema contribuye moderadamente a la economía creando oportunidades para el desarrollo local. Para el caso de la combustión del Bagazo-RAC lo más significativo fue el alto valor de la razón de carga ambiental (ELR > 2) indicando que el impacto ambiental de esta alternativa es desfavorable y no es sostenible a largo plazo, contrario, a la combustión del marabú ya que es muy atractivo el bajo valor de la razón de carga ambiental (ELR = 0,5968), por lo que el sistema a largo plazo es sostenible por sí mismo.

**Palabras clave:** Análisis emergético, sostenibilidad emergética, bagazo, Residuos Agrícolas Cañeros, Marabú

### Abstract

The scope of this work is to evaluate the sustainability of bagasse, sugarcane agricultural residues and Marabou within the combustion process in a retal type boiler of 45 t/h of steam from an emergy analysis. The emergy indexes of renewability ratio, environmental load and emergy sustainability were determined. From the determination of these indexes, in the case of bagasse combustion, the renewability ratio (%R = 58.04) and the emergy efficiency ratio (EYR = 2.3837) were estimated, indicating that the process moderately exploits local natural resources and the system is not sustainable on its own. However, the value obtained (ESI = 3.2971) gives a measure that the system moderately contributes to the economy by creating opportunities of local development. In the case of Bagasse-RAC combustion, the most significant result was the high value of the environmental load

ratio ( $ELR > 2$ ), indicating that the environmental impact of this alternative is unfavorable and not sustainable in the long term, quite the opposite to the combustion of Marabou as the low value of the environmental load ratio is very attractive ( $ELR = 0.5968$ ), so the system is sustainable in the long term by itself.

**Keywords:** Emergy analysis, emergy sustainability, bagasse, Cane Agricultural Harvest, Marabou

## 1. Introducción

Los recursos naturales destinados a mantener el funcionamiento de los sistemas urbanos se han incrementado progresivamente desde mediados del siglo pasado. La existencia de límites físicos en la naturaleza implica que este continuo incremento no sea viable indefinidamente. Las evidencias del impacto sobre el medio ambiente asociado al funcionamiento de las ciudades hacen que sea urgente proponer medidas que reduzcan este consumo y mejoren la eficiencia del metabolismo urbano. Actualmente es un reto para el ser humano la existencia de límites en la disponibilidad de recursos materiales y energéticos, por lo que cada vez se investiga más el potencial de las fuentes de energías alternativas y renovables para reducir la dependencia de la sociedad de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático [1].

Emplear y perfeccionar la utilización de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) se puede considerar como el inicio de una tercera “Revolución Industrial”. La transformación a una economía de bajas emisiones de dióxido de carbono permite dar un giro trascendental en la lucha contra el cambio climático, mejorar la seguridad energética, y reducir las tensiones geopolíticas del presente. Las FRE utilizadas en la actualidad son diversas, entre las que se encuentran: solar, eólica, hidráulica, marina y la biomasa. En el caso de la biomasa, los orígenes son muy diversos, las más prometedoras por su magnitud a nivel mundial son las de origen forestal y las de origen en la caña de azúcar [2]. El máximo aprovechamiento de la biomasa cañera con vista a la generación y comercialización de electricidad resulta vital para la supervivencia de la industria azucarera moderna. La biomasa cañera se compone por el bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC). La utilización de esta biomasa constituye desde hace décadas y en especial en la actualidad, una FRE muy importante para la generación de electricidad y el impulso de un desarrollo sostenible [3].

El bagazo se obtiene luego de someter la caña de azúcar a diferentes procesos, obteniéndose una masa fibrosa, que contiene aproximadamente un 50% de sólidos y un 50% de agua. Los RAC se constituyen por las hojas verdes y secas de la caña y pedazos de tallo; se pueden emplear con el objetivo de sustituir al petróleo y la leña como combustibles complementarios y de arranque para los centrales azucareros y para ahorrar bagazo, para que sea suministrado como materia prima en otras industrias. También sirve para suplir la carencia energética que se produce en los centrales debido a la inestabilidad de la molida. [4]

El marabú es un excelente combustible, ya que posee un bajo contenido de humedad (22% de humedad de almacenaje, en el extremo inferior del rango para una astilla secada al aire) y se estima que tenga un rendimiento promedio de 70-90 t/h.

El análisis emergético puede ser definido como la disponibilidad de energía de un tipo que es usada en las transformaciones directas e indirectas para crear un producto o servicio. Es la suma de toda la energía de una forma, necesaria para desarrollar un flujo de energía de otra forma, en un período de tiempo dado. Esta herramienta es utilizada para comparar la obra de la naturaleza con la de los humanos sobre una base justa y equitativa [5]. Su unidad es el emjulio energético (seJ) y al usarla se pueden poner sobre una base común, la luz solar, los combustibles, la electricidad y los servicios

humanos, expresándolos en seJ de energía solar, que cada uno de ellos requieren para ser producidos [6]. El objetivo de este estudio es evaluar desde la perspectiva energética el aprovechamiento del bagazo, los RAC y el marabú dentro del proceso de combustión en un generador de vapor industrial para así poder determinar la sostenibilidad a largo plazo de dichos combustibles.

## 2. Materiales y Métodos

El bagazo es utilizado, además de la aplicación energética, como alimento animal, abono, cama para aves de corral, como cubierta protectora de la tierra recién sembrada y mezclado con estiércol como abono, entre otros. El bagazo que sale del último molino del tándem, contiene entre 55 y 60% de fibra útil [7].

Las posibilidades de incorporación y empleo de los RAC como biomasa en la industria, para la cogeneración de energía junto con el bagazo, dependen de los sistemas de cosecha empleados [8]. Los RAC representan un potencial de biomasa equivalente al 30% de toda la materia seca aprovechable en la cosecha de la caña, con un valor calórico que fluctúa entre 1 700-4 500 kcal/kg [7]. La composición elemental en base seca del bagazo y de los RAC se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Composición elemental en base seca del bagazo y los RAC [7]**

Composición elemental en base seca (%)						
Residuo	C	H	O	N	S	A
<b>Bagazo</b>	46,99	6,00	45,84	0,13	0,04	1,00
<b>RAC</b>	43,70	5,75	44,32	0,22	0,06	5,95

A la hora del proceso de combustión, tanto en el bagazo, como los RAC sin preparación previa, estos van a presentar un comportamiento que va a depender principalmente del contenido de humedad. En la Tabla 2 se presentan los intervalos de variación de la materia volátil, el carbono fijo y la ceniza de la masa de trabajo del bagazo y de los RAC en la producción de caña de azúcar.

**Tabla 2. Análisis inmediato de la masa de trabajo del bagazo y los RAC [7]**

(%)				
Residuo	Humedad	Materia volátil	Carbono fijo	Cenizas
<b>Bagazo</b>	45-50	39-55	4-8	0,55-2,2
<b>RAC</b>	8-15	60-77	10-16	4,6-6

En la Tabla 3 se resume la composición elemental (análisis último o final), con humedad promedio de la masa de trabajo del bagazo como sale del tándem y de los RAC, después de cuatro días expuestos a secado natural. También se muestra la composición elemental del marabú, según una muestra recogida en diferentes zonas. El marabú (*Dichrostachys cinerea*), se identifica como un importante combustible complementario para las bioeléctricas. Este existe en grandes cantidades, aunque tiene limitantes: es finito en el tiempo y las tierras que se liberen al cosecharlo deberán dedicarse a la producción de alimentos. Este es un combustible joven, con un bajo contenido de carbono y alto de oxígeno [8,9].

La tecnología seleccionada para evaluar el proceso de combustión de las biomásas seleccionadas en este estudio fue el generador de vapor (GV) tipo RETAL de 45 t/h. Un GV está formado por el horno, donde se quema el combustible proveniente o no de una estera alimentadora exterior, la caldera por donde circula el agua y el vapor, así como en la mayoría de los casos, por superficies para recuperar calor, tales como sobrecalentador, economizador y calentador de aire. La Tabla 4 presenta los parámetros fundamentales de trabajo de dicha tecnología.

**Tabla 3. Composición elemental de la masa de trabajo [8,9]**

Residuo	(%)						
	C	H	O	N	S	A	W
<b>Bagazo</b>	23,50	3,00	22,92	0,06	0,02	0,50	50
<b>RAC</b>	37,15	4,89	37,67	0,19	0,05	5,06	15
<b>Marabú</b>	46,34	3,33	49,28	0,56	0,49	0	0

**Tabla 4. Parámetros de trabajo de un GV tipo RETAL de 45 t/h**

Ítem	Valor
Presión (MPa)	1,9
Temperatura (°C)	320
Producción de Vapor, Dv (t/h)	45
Temperatura agua alimentar, Taa (°C)	80
Coeficiente de exceso de aire a la salida de la caldera (alfa)	2
Coeficiente de exceso de aire a la salida del horno (alfa Ht)	1,8
Temperatura de salida de los gases, Tgs (°C)	213,74

La emergía cuantifica toda la cadena de producción de un determinado producto, desde la formación de materias primas naturales hasta las manufacturadas. Por ello el análisis emergético es una metodología que presenta grandes aplicaciones para valorar los insumos consumidos durante un ciclo de vida de productos, necesitando para eso incluir las fases de distribución, de consumo y de pos-consumo de productos.

La metodología de Síntesis Emergética evalúa los recursos y servicios en los sistemas ecológicos y económicos, sobre una base energética común y cuantifica el trabajo ambiental directo e indirecto, para generar un recurso o un servicio [6]. Esta metodología desarrollada por Odum (1996) es una herramienta cuantitativa para determinar el valor ambiental de todas las entradas que se requieren para generar un determinado producto o servicio. Además, esta metodología cuantifica y clasifica todos los recursos renovables (R), no renovables (N) y derivados del mercado (F) que directa o indirectamente requiere un producto, los cuales se toman en cuenta a la hora de realizar el diagrama o modelo cualitativo de los sistemas.

Las ecuaciones 1-7 permiten calcular los totales de los recursos renovables (R), no renovables (N) y estos comprenden los recursos de la naturaleza (I), además de los materiales de la economía (M), los servicios de la economía, que a su vez comprenden los adquiridos de la economía (F).

$$R = \sum_{i=1}^n \text{Recursos renovables} \quad (1)$$

$$N = \sum_{i=1}^n \text{Recursos no renovables} \quad (2)$$

$$M = \sum_{i=1}^n \text{Materiales de la economía} \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \text{Servicios de la economía} \quad (4)$$

$$I = R + N \quad (5)$$

$$F = M + S \quad (6)$$

$$Y = I + F \quad (7)$$

La Tabla 5 contiene las principales ecuaciones (8-15) que intervienen en el balance emergético para la determinación de los flujos.

Tabla 5. Expresiones para el cálculo de los flujos emergéticos

Parámetro	Ecuación	Número
Fracción de aire no renovable	$F_{\text{aireN}} = \frac{0,231 \times \text{Bagazo quemado}}{\alpha_H \times \text{Bagazo quemado}}$	8
Flujo de aire	$V_a \left( \frac{\text{J}}{\text{año}} \right) = \left[ V_a \left( \frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) \times C_p \times T_0 \right] \times \frac{1000\text{J}}{\text{kg}}$	9
Flujo de aire renovable	$V_{aR} \left( \frac{\text{J}}{\text{año}} \right) = 0,799 \times V_a \left( \frac{\text{J}}{\text{año}} \right)$	10
Flujo de aire no renovable	$V_{aR} \left( \frac{\text{J}}{\text{año}} \right) = 0,201 \times V_a \left( \frac{\text{J}}{\text{año}} \right)$	11
Flujo de agua	$m_{\text{H}_2\text{O}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) = m_{\text{H}_2\text{O}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \times 2800 \frac{\text{h}}{\text{año}}$	12
Labor humana	$\text{Labor} \left( \frac{\text{J}}{\text{año}} \right) = \left( \frac{\frac{\text{obreros h}}{\text{año}}}{8 \frac{\text{obreros h}}{\text{año}}} \right) \times 2500 \frac{\text{kcal}}{\text{día}} \times 4186 \times \frac{\text{J}}{\text{kcal}}$	13
Flujo del costo del agua	$m_{\text{H}_2\text{O}} \left( \frac{\$}{\text{año}} \right) = m_{\text{H}_2\text{O}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \times 2800 \frac{\text{h}}{\text{año}} \times P_{\text{agua}} \left( \frac{\$}{\text{m}^3} \right) \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ kg}}$	14
Flujo de costo del combustible	$m_{\text{comb}} \left( \frac{\$}{\text{año}} \right) = m_{\text{comb}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \times 2800 \frac{\text{h}}{\text{año}} \times P_{\text{comb}} \left( \frac{\$}{\text{m}^3} \right) \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ kg}}$	15

Los indicadores emergéticos son herramientas que permiten caracterizar los sistemas y determinar cuáles son más eficientes en el aprovechamiento de los recursos mediante una comparación, siempre dentro de los criterios y limitaciones del método. Son un instrumento de ayuda en la gestión y la toma de decisiones que favorezcan políticas orientadas a la sostenibilidad de los mismos, ya que consideran los recursos naturales, la labor humana y el aporte de la economía. Algunos de los indicadores emergéticos son los siguientes:

Transformidad y emergía específica (*Transformity*, TR), es la relación entre la emergía total que ingresa en el sistema (Y) y la energía de los productos que salen (Ep). A mayor valor de la transformidad menor es la eficiencia ya que indica la cantidad de energía solar equivalente que el sistema requiere para producir un determinado producto [11]. Su unidad es en seJ/J y se calcula mediante la Ecuación 16.

$$Tr = \frac{Y}{E_p} \quad (16)$$

Razón de renovabilidad (*Renewability Ratio*, % R) representa la fracción de los recursos renovables respecto a la emergía total consumida por el sistema. A largo plazo, solo procesos con un alto % R son sostenibles [10]. Su cálculo se efectúa mediante la Ecuación 17.

$$\%R = \left(\frac{R}{Y}\right) \times 100 \quad (17)$$

Razón de eficiencia energética (*Emergy Yield Ratio, EYR*), es la emergía total usada por unidad de emergía invertida. La relación sirve para entender en qué medida una inversión permite a un proceso explotar recursos locales para contribuir a la economía [10] y los sistemas con un EYR menor a uno son insostenibles. Este índice puede ser calculado mediante la ecuación 18.

$$EYR = \frac{R+N+F}{F} \quad (18)$$

Razón de carga ambiental (*Environmental Loading Ratio, ELR*), es la relación entre la suma de las entradas de los recursos de la economía y no renovables con los recursos renovables. Es un indicador de presión de un proceso de transformación sobre el medio ambiente [10] y mientras mayor sea este valor, más alto será el impacto ambiental del sistema [12]. Según Brown [11], valores inferiores a 2 indican un impacto bajo sobre el medio ambiente, mientras que valores entre 2 y 10 significan que el sistema causa un impacto moderado y un valor superior a 10 señala que el sistema causará un estrés mayor en el ambiente. La Ecuación 19 determina la razón de carga ambiental.

$$ELR = \frac{N+F}{R} \quad (19)$$

Índice de sostenibilidad energética (*Environmental Sustainability Index, ESI*), es la relación entre el EYR y ELR y es una medida de la contribución potencial de un sistema (EYR) por unidad de carga ambiental o impacto ambiental (ELR) en el área que ocupa el sistema. Un sistema se considera sustentable al tener un ELR bajo y un elevado EYR, ya que, si el ESI es menor a 1 no es sustentable a largo plazo, entre 1 y 5 es sustentable a mediano plazo, y mayor a 5 es sustentable a largo plazo [13]. Esta relación se expresa en la Ecuación 20.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (20)$$

### 3. Resultados y Discusión

Partiendo de los datos tomado de la bibliografía para considerar las diferentes transformidades, se procedió a la construcción de las tablas emergéticas de cada biomasa. La Tabla 6 muestra aquellos valores de emergía que son comunes para los casos evaluados. En el caso del RAC se consideró una mezcla 50% bagazo-50% RAC. Manteniendo como combustible base el bagazo para el tiempo de evaluación se tomó un período de un año. Por su parte, la Tabla 7 muestra los resultados principales para el caso de la combustión de bagazo.

**Tabla 6. Valores emergéticos comunes para ambas biomásas**

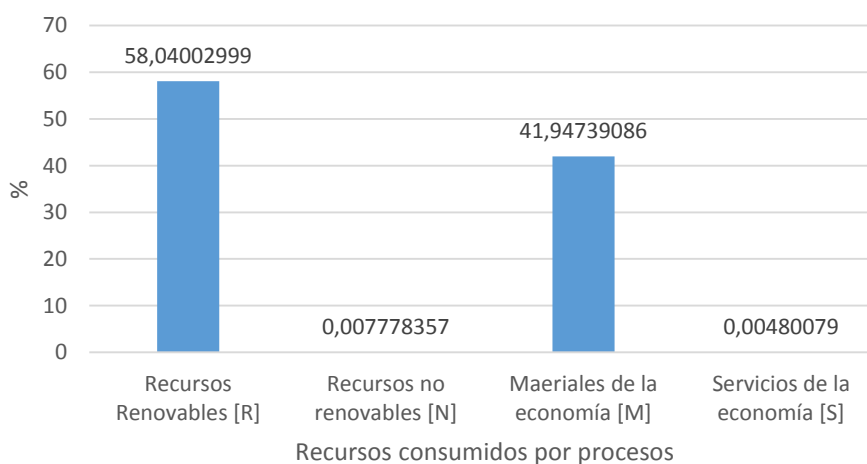
	Flujos	Unidad	Transformidad (seJ/unidad)	Emergía (seJ/año)
	<b>No renovables (N)</b>			7,88512E+16
Aire	1,06706E+13	J/año	9,8200E+02	1,04785E+16
Agua	1,2600E+11	g/año	5,4264E+05	6,83726E+16
	<b>Servicios de la Economía (S)</b>			4,86668E+16
Mantenimiento	2,8000E+02	\$/año	4,6000E+12	1,288E+15
Labor Humana	1,2056E+10	J/año	3,9300E+06	4,73788E+16



**Tabla 7. Tabla emergética para la combustión de bagazo**

	Flujos	Unidad	Transformidad (seJ/unidad)	Emergía (seJ/año)
<b>Renovables (R)</b>				5,88366E+20
Aire	8,17155E+13	J/año	9,8200E+02	8,02447E+16
Bagazo	6,1600E+10	g/año	9,5501E+09	5,88286E+20
<b>Materiales de la economía (M)</b>				4,25231E+20
Costo de la biomasa	9,2400E+07	\$/año	4,6000E+12	4,2504E+20
Costo del agua	4,1580E+04	\$/año	4,6000E+12	1,91268E+17
<b>Emergía Total (Y)</b>				1,01373E+21

En la Tabla 7 se puede apreciar que el mayor flujo emergético proviene de los recursos renovables (5,88366E+20 seJ/año) representando el 58,04% de la emergencia total, mientras que la menor emergencia es la que aportan los servicios de la economía (4,86668E+16 seJ/año) y representan solo el 0,0048 %. En la Figura 1 se puede observar la relación porcentual de las cuatro categorías analizadas donde los recursos renovables representan el mayor aporte emergético (agua superficial o subterránea, lluvia, sedimentos, biodiversidad) y los servicios de la economía el menor; este bajo valor está dado principalmente porque el sistema es capaz de producir la mayor parte de la electricidad que necesita, a diferencia de otros procesos.

**Fig.1 Proporción de la emergencia total por categoría**

Para determinar la emergencia específica de los RAC se utilizó la segunda regla del álgebra emergética, la cual plantea que: para un proceso en estado estable, todos los flujos emergéticos de entrada son asignados a los flujos de salida; cuando hay más de una salida (co-productos) del proceso, cada una aporta el total de flujo emergético de entrada del proceso, pero las transformidades y demás unidades de valor emergéticos son diferentes para cada una de estas corrientes. Cuando una salida se divide en dos o más corrientes del mismo tipo, el flujo emergético es dividido en cada corriente basado en la fracción del total de energía o flujo de materiales de la corriente; por consiguiente, la transformidad y la emergencia específica es la misma para cada una de las separaciones y la emergencia de los flujos de retroalimentación no pueden ser contadas puesto que de sumarse algebraicamente daría una emergencia mayor que la de la fuente de la que fueron derivadas. La emergencia total en el proceso de producción de la caña de azúcar es de 1,2300E+06 seJ/año y la emergencia específica de la caña de azúcar es de

3,9200E+08 y teniendo que el RAC representa 0,12 toneladas por toneladas de caña. Luego mediante la Ecuación 21 se determina los kilogramos de RAC que se producen en el proceso y mediante la Ecuación 22 se determina su emergencia específica.

$$\text{Cantidad RAC} = \frac{\text{Emergía total}}{\text{Emergía esp}_{\text{caña}}} \times 0,12 \text{ [kg]} \quad (21)$$

Donde:

Emergía total: Emergía total del proceso, [seJ]

Emergía esp<sub>caña</sub>: Emergía específica de la caña, [seJ]

$$\text{Emergía esp}_{\text{RAC}} = \frac{\text{Emergía total}}{\text{Cantidad RAC}} \text{ [seJ/kg]} \quad (22)$$

La Tabla 8 muestra la valoración emergética para el caso de la combustión de 50% de bagazo y 50% de RAC. Se evidencia que el mayor flujo emergético corresponde a los materiales de la economía (8,09178E+20 seJ/año) representando el 69,77% de la emergencia total, mientras que la menor emergencia es la aportada mediante los servicios de la economía (4,86668E+16 seJ/año) y representa el 0,0042%. La Figura 2 expresa la relación porcentual de las cuatro categorías analizadas donde los materiales de la economía representan el mayor aporte emergético, lo cual es comprensible, ya que hay que considerar la compra de los RAC, los costos de recogida y transportación. El aporte emergético de los servicios de la economía, al igual que en análisis para la combustión de 100% bagazo, fue la menor representación porcentual.

**Tabla 8. Valoración emergética para la combustión de bagazo y RAC**

	<b>Flujos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Transformidad (seJ/unidad)</b>	<b>Emergía (seJ/año)</b>
	<b>Renovables (R)</b>			3,5049E+20
Aire	9,5074E+13	J/año	9,8200E+02	9,3363E+16
Bagazo	3,0800E+10	g/año	9,5501E+09	2,94143E+20
RAC	1,7220E+10	g/año	3,2667E+09	5,6252E+19
	<b>Materiales de la economía (M)</b>			8,09178E+20
Costo del bagazo	4,6200E+07	\$/año	4,6000E+12	2,1252E+20
Costo de los RAC	1,2967E+08	\$/año	4,600E+12	5,96466E+20
Costo del agua	4,1580E+04	\$/año	4,600E+12	1,91268E+17
	<b>Emergía Total (Y)</b>			1,1579E+21

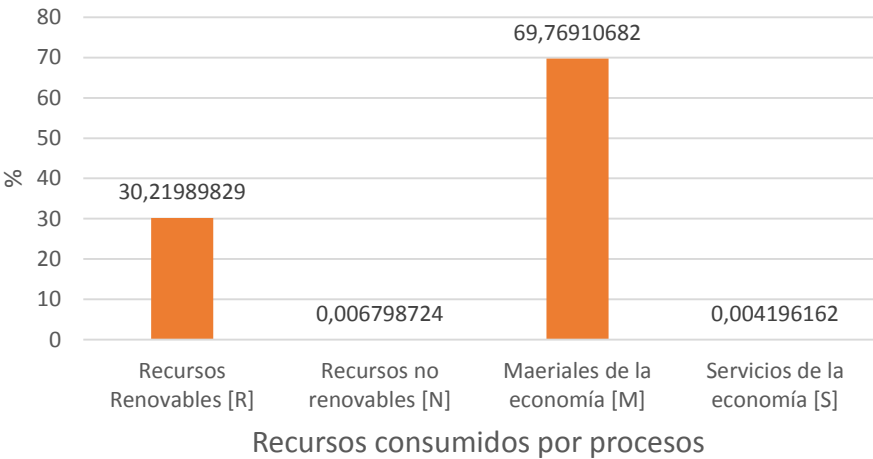
En el caso del Marabú, para realizar dicho análisis fue preciso determinar su transformidad, debido a que este valor no se encontraba en la bibliografía. El procedimiento empleado se muestra a continuación:

#### *Rendimiento en masa seca*

$$\text{Rms} = \text{Rendimiento} \left( \frac{\text{t}}{\text{ha}} \right) \times \text{Contenido de agua} \quad (23)$$

Primeramente, fue necesario conocer el rendimiento del campo, el cual, según [14] es de 37 t/ha para el contexto analizado. Este valor se multiplicó por el contenido de agua, el cual es 3,50%. De esta forma se obtuvo el rendimiento en masa seca en t/ha.





**Fig.2 Proporción de la emergía total por categoría**

*Rendimiento energético*

$$Re = Rms \times \text{Contenido energético} \times 100 \tag{24}$$

Como variables se tiene el rendimiento en masa seca y el contenido energético del marabú. Esta última variable se determinó, a partir del poder calorífico neto, el cual describe el contenido energético de los biocombustibles. En la Ecuación 25,  $H_{v(w)}$  designa el poder calorífico neto en MJ/kg de la biomasa en un nivel específico de la humedad,  $H_{v(wt)}$  el poder calorífico neto de la biomasa totalmente seca, que según [14] es 20,20 MJ/kg y  $w$  la humedad en porcentaje (10%). La constante 2,44 corresponde a la energía de evaporación del agua.

$$H_{v(w)} = \frac{[H_{v(wt)} \times (100 - w) - 2,44 \times w]}{100} \tag{25}$$

A partir del cálculo de la Ecuación 23, fue estimado el rendimiento en masa seca del área objeto de estudio y mediante la Ecuación 25 el contenido energético. La emergía total del sistema se calculó como la sumatoria de la emergía de la radiación solar y la emergía de las precipitaciones, y el valor obtenido fue 1,76E+15 seJ/año.

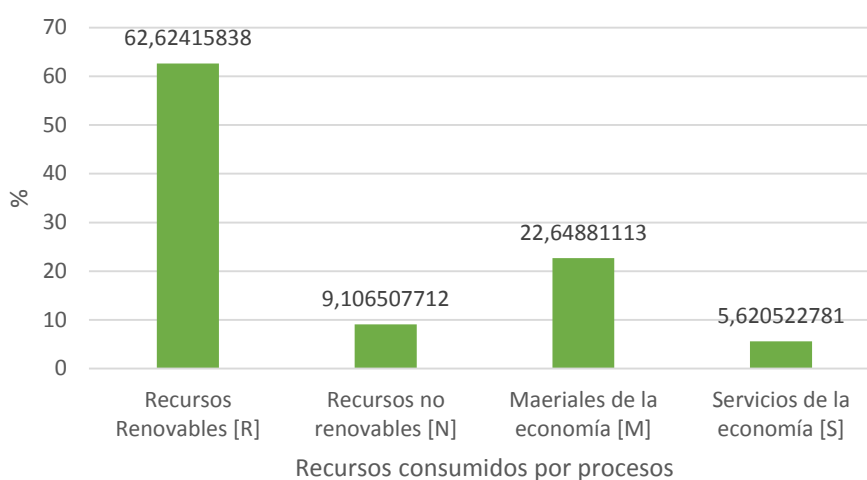
*Emergía consumida por unidad de energía o Transformidad*

$$Tr = \frac{\text{Emergía total}}{Re} \tag{26}$$

El rendimiento energético se obtuvo mediante la Ecuación 24 y a partir de los datos anteriores se procedió al cálculo de la transformidad. La Tabla 9 muestra la tabla emergética para el caso de la combustión de Marabú. En la Tabla 9 se aprecia que el mayor flujo emergético corresponde a los recursos renovables (5,4200E+17 seJ/año) representando el 62,62% de la emergía total, mientras que la menor emergía es la aportada los servicios de la economía (4,86668E+16 seJ/año) y representa el 5,62%. La Figura 3 presenta la relación porcentual de las cuatro categorías analizadas donde los recursos renovables representan el mayor aporte emergético.

**Tabla 9. Valoración emergética para la combustión de Marabú**

	Flujos	Unidad	Transformidad (seJ/unidad)	Emergía (seJ/año)
<b>Renovables (R)</b>				5,4200E+17
Aire	1,20078E+14	J/año	9,8200E+02	1,1800E+17
Marabú	56000000000	g/año	7,5773E+06	4,2400E+17
<b>Materiales de la economía (M)</b>				1,96111E+17
Costo de la biomasa	1,0528E+03	\$/año	4,6000E+12	4,84288E+15
Costo del agua	4,1580E+04	\$/año	4,6000E+12	1,91268E+17
<b>Emergía Total (Y)</b>				8,65877E+17

**Fig.3 Proporción de la emergía total por categoría**

La Tabla 10 muestra los resultados del cálculo de los índices emergéticos, obtenidos a partir de las Tablas 8, 9 y 10.

**Tabla 10. Índices emergéticos de las diferentes biomásas evaluadas**

Índice	Nomenclatura	Bagazo	Valor	
			Bagazo-RAC	Marabú
<b>Razón de Renovabilidad</b>	R	58,0400	30,2213	62,6242
<b>Razón de eficiencia energética</b>	EYR	2,3837	1,4332	3,5374
<b>Razón de carga ambiental</b>	ELR	0,7229	2,3089	0,5968
<b>Índice de sostenibilidad emergética</b>	ESI	3,2971	0,6207	5,9270

En el caso del bagazo se puede observar que la razón de renovabilidad ( $\%R = 58,04$ ) y la razón de eficiencia energética ( $EYR = 2,3837$ ) indican que el proceso explota moderadamente los recursos naturales locales. El valor mayor que dos manifiesta que, aproximadamente, por cada unidad en emergencia invertida de la economía se obtiene una unidad de emergencia de la naturaleza y que esta alternativa es sostenible. Por otra parte, el bajo valor de la razón de carga ambiental ( $ELR < 2$ ) indica que el impacto ambiental no es tan grande en comparación con otros procesos y se debe valorar el impacto existente teniendo en cuenta las áreas aledañas. A pesar de lo anterior, el índice de sostenibilidad energética (ESI) indica que a largo plazo el sistema no es sostenible por sí mismo ( $ESI < 5$ ). No obstante, el valor obtenido ( $ESI = 3,2971$ ) da una medida que el sistema contribuye moderadamente a la economía creando oportunidades para el desarrollo local.

Si se analiza el caso del Bagazo-RAC se puede advertir que la razón de renovabilidad ( $\%R = 30,2213$ ) y la razón de eficiencia energética ( $EYR = 1,4332$ ) indican que el proceso explota moderadamente los recursos naturales locales. El alto valor de la razón de carga ambiental ( $ELR > 2$ ) indica que el impacto ambiental es elevado. El bajo índice de sostenibilidad energética (ESI) indica que el sistema no es sostenible a largo plazo.

El análisis de los indicadores energéticos en el Marabú indican que según la razón de renovabilidad ( $\%R = 62,62$ ) y la razón de eficiencia energética ( $EYR = 3,5374$ ), el proceso explota moderadamente los recursos naturales locales. El bajo valor de la razón de carga ambiental ( $ELR = 0,5968$ ) indica que el impacto ambiental no es tan grande en comparación con otros procesos y se debe valorar el impacto existente teniendo en cuenta las áreas aledañas. A pesar de lo anterior, el índice de sostenibilidad energética (ESI) indica que a largo plazo el sistema es sostenible por sí mismo ( $ESI > 5$ ).

#### 4. Conclusiones

A partir de la determinación de los indicadores energéticos para el caso de la combustión de bagazo la razón de renovabilidad ( $\%R = 58,04$ ) y la razón de eficiencia energética ( $EYR = 2,3837$ ) indican que el proceso explota moderadamente los recursos naturales locales. El ESI calculado indicó que a largo plazo el sistema no es sostenible por sí mismo. Sin embargo, el valor obtenido ( $ESI = 3,2971$ ) da una medida que el sistema contribuye moderadamente a la economía creando oportunidades para el desarrollo local. Para el caso de la combustión del Bagazo-RAC, lo más significativo fue el alto valor de la razón de carga ambiental ( $ELR > 2$ ) indicando que el impacto ambiental de esta alternativa es desfavorable y no es sostenible a largo plazo. En la combustión del Marabú es muy atractivo el bajo valor de la razón de carga ambiental ( $ELR = 0,5968$ ) y por el contrario de la combustión del bagazo-RAC; este indica que a largo plazo el sistema es sostenible por sí mismo ( $ESI > 5$ ).

#### Referencias

1. Ghaderi, H., Pishvae, M.S., Moini, A., *Biomass supply chain network design: An optimization oriented review and analysis*. Ind. Crops Prod, 2016 **94**: p. 972-1000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.027>.
2. Rubio, A., Roque, P., Pérez, F., *Estado del arte en la cogeneración de electricidad en la industria de la caña de azúcar. Primeros pasos hacia una industria sucroenergética*. Centro Azúcar, 2006. **33**(2). p. 33-41.
3. Rubio, A., Hernández, B., Rubio, M., *Programa cubano para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera para la generación de electricidad*. Revista ATAC, 2018. **79**(1). p. 1-16.

4. Rubio, A., *Generadores de Vapor. Funcionamiento y Explotación*, 2015. Ed. Feijóo. Santa Clara. ISBN: 979-959-312-128-6.
5. Izursa, J.L., *Emergía (con M), una herramienta nueva para estimar el valor de la madera en el bosque*. Ecología en Bolivia, 2011. **46**(2): p.71-76.
6. Torres, V., Leyva, A., Del Pozo, P.P., *Emergía: generalidades, apuntes, y ejemplos de utilidad, como herramienta para evaluar la sostenibilidad*. Cultivos Tropicales, 2019. **40**(2). p. 1-24.
7. Rodríguez, A.D., Rosabal, L.B., *Tecnología de las secciones de paso en rotación para la quema eficiente del meollo en las calderas de bagazo*. Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba, 2017. **7**(3): p. 78-101.
8. Aguilar, A., *Apuntes sobre la revalorización de los residuos agrícolas de la caña. Tecnologías de preparación*. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 2014. **48**(2): p. 50-55.
9. Rubio, A., Iturria, P., Palmero, D., *Propiedades del marabú, (Dichrostachys cinerea L.), cosechado con máquinas, como combustible para la generación de electricidad (Primera parte)*. Centro Azúcar, 2021. **48**(1): p. 93-104.
10. Odum, H.T., *Environmental Accounting: EMERGY and Environmental Decision Making*, 1996. New York. ISBN: 978-0-471-11442-0. DOI: <https://doi.org/10.5860/choice.34-0412>.
11. Brown, M.T., Ulgiati, S., *Emergy analysis and environmental accounting*. Encyclopedia Energy, 2004. **2**: p. 329-354. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00242-4>.
12. Aguilar, N., Alejandre, J., Espinosa, R., *Evaluación Emergy y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, México*. Cultivos Tropicales, 2015. **36**(4): p. 144-157.
13. Brown, M.T., Ulgiati, S., *Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems*. J. Cleaner Production, 2002. **10**: p. 321-334. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00043-9).
14. Alba, Y., Pérez, M., Ley, N., Arteaga, L.E., *Diseño de una planta de torrefacción de marabú con fines energéticos*. Tecnología Química, 2018. **38**(1). p. 123-137.

### Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

### Contribución de los autores

**MSc Reinier Jiménez Borges.** ORCID: 0000-0002-3430-0322

Participó en diseño de la investigación, metodología y administración de proyecto.

**Aliena de la Caridad Bermúdez Chou.** ORCID: 0000-0003-0581-0283

Participó en análisis de datos, recursos, redacción y edición.

**Yoisdel Castillo Alvarez.** ORCID: 0000-0001-8105-6206

Participó en análisis de datos, recursos, redacción y edición.