

**Artículo Original**

**ANÁLISIS EMERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS EN  
CUBA. CASO DE ESTUDIO: FÁBRICA EL CANAL**

**EMERGY ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF AGGREGATES IN CUBA.  
CASE STUDY: EL CANAL FACTORY**

Alejandro Valdés López<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8503-3025>  
Eduardo Julio López Bastida<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1305-852X>  
Fernando Efrén Ramos Miranda<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0601-6228>  
Edelvy Bravo Amarante<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3179-710X>  
Roxana Cortés Martínez<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2040-6548>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

<sup>2</sup> Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

<sup>3</sup> Departamento de Química. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

<sup>4</sup> Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez", Sancti Spiritus, Cuba

Recibido: Julio 23, 2024; Revisado: Agosto 25, 2024; Aceptado: Octubre 3, 2024

**RESUMEN**

**Introducción:**

La protección ambiental se ha convertido en un factor importante en los indicadores de resultados de las industrias modernas debido a la creciente demanda de procesos de fabricación más sostenibles. Considerando el acelerado proceso de urbanización en Cuba, la industria de materiales de la construcción es de especial interés, destacándose, en este sector, la producción de áridos, la cual, además de la presión a la que se ve sometida, ha sufrido décadas de explotación.

**Objetivo:**

Analizar los potenciales impactos ambientales de diferentes esquemas de producción de áridos en Cuba, tomando como caso de estudio la fábrica El Canal ubicada en la provincia de Cienfuegos.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Alejandro Valdés, Email: [avaldeslopez93@gmail.com](mailto:avaldeslopez93@gmail.com)



### **Materiales y Métodos:**

Se usó el análisis emergético por su capacidad de evaluar la influencia de diferentes tipos de recursos en el sistema económico.

### **Resultados y Discusión:**

El proceso de producción de la fábrica El Canal puede ser mejorado mediante diferentes cambios tecnológicos, siendo el más adecuado la introducción de plantas de hidrociclones en el proceso de clasificación, dado que mitiga impactos ambientales con una considerable menor inversión emergética.

### **Conclusiones:**

Si bien el proceso de producción de áridos tiene un impacto económico moderado, este no es sostenible a largo plazo ( $ESI=0,0011$ ) ya que incurre en marcados impactos ambientales debido al uso intensivo de recursos no renovables.

**Palabras clave:** Análisis emergético; gestión de residuos; producción de áridos.

## **ABSTRACT**

### **Introduction:**

Environmental protection has become an important factor in the performance indicators of modern industries due to the growing demand for more sustainable manufacturing processes. Considering the accelerated urbanization process in Cuba, the construction materials industry is of special interest, especially the production of aggregates, which, in addition to the pressure to which it is subjected, has suffered decades of exploitation.

### **Objective:**

To analyze the potential environmental impacts of different aggregate production schemes in Cuba, taking as a case study the El Canal factory located in Cienfuegos province.

### **Materials and Methods:**

Emergy analysis was used for its ability to evaluate the influence of different types of resources on the economic system.

### **Results and Discussion:**

The production process of the El Canal factory can be improved through different technological changes, with the most suitable being the introduction of hydrocyclone plants in the classification process, as it mitigates environmental impacts with a considerably lower emergy investment.

### **Conclusions:**

Although the aggregate production process has a moderate economic impact, it is not sustainable in the long term ( $ESI=0.0011$ ) as it incurs marked environmental impacts due to the intensive use of non-renewable resources.

**Keywords:** Emergy analysis; waste management, aggregate production.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad existe un creciente interés en reincorporar el papel de los ecosistemas a la toma de decisiones económicas, puesto que se considera que el divorcio entre el

---

crecimiento, que ha sido el foco de debate dentro de la ciencia económica, y los ecosistemas, que son el objeto de la mayoría de los esfuerzos de conservación, es una de las causas primordiales de la pérdida de biodiversidad en el marco del cambio global (Bravo, 2019). Martínez-Allier y Muradian, (2015) advierten que, aunque se ha abogado por la valoración económica de los bienes y servicios ecosistémicos con la intención de hacerlos más visibles a los decisores y el público en general, claramente este tipo de análisis hace menos énfasis en la importancia biológica y ecológica de la naturaleza. Por ello, han surgido métodos que han abandonado el paradigma del valor monetario para considerar los flujos de materiales y energía, hasta la concepción de un valor biofísico inherente al análisis emergético.

La emergía es un concepto desarrollado por Odum (1996) basado en la termodinámica, los principios teóricos de la ecología y la energética de sistemas para contabilizar los requerimientos energéticos necesarios en la producción de un bien o un servicio. A diferencia de otros métodos, su novedad radica en que el análisis emergético distingue entre diferentes formas de energía, otorgándole diferentes calidades (Dong y col., 2008). Así 1 J de energía eléctrica y 1 J de carbón, aunque iguales en magnitud no poseen igual calidad y jerarquía porque su capacidad de realizar trabajo es diferente. En este método todas las formas de energía son llevadas a una base común (la energía solar) para lo que se hace uso de un factor de equivalencia (unidad de valor emergético, UEV por sus siglas en inglés) (Liu y col., 2021). Así, al considerar en una base común todas las formas de energía para el soporte del sistema analizado se pueden medir y comparar diferentes tipos de recursos y sintetizar una serie de indicadores que sirven para cuantificar los beneficios económicos, los impactos ambientales y la sostenibilidad del sistema (Chen y col., 2017).

Según Aguilar y col., (2015) el método ha posibilitado visualizar y cuantificar de forma dinámica los flujos de los recursos naturales, servicios ambientales provenientes de la naturaleza y de los impactos de actividades antrópicas, permitiendo la comprensión de los límites en cada ecosistema y el establecimiento de metas y objetivos para garantizar su capacidad de soporte. En la literatura se destaca que el análisis emergético es usado cada vez con mayor frecuencia (Chen y col., 2017; He y col., 2020), ya sea de manera independiente como de conjunto con otros métodos como la huella ecológica, la huella de carbono y el análisis de ciclo de vida, incluso mediante modelos de análisis híbridos (Jiang y col., 2024; Jing y col., 2024; Qu y col., 2024; Zhang y col., 2024). En el contexto de la gestión de residuos el análisis emergético ha servido para evaluar el impacto ambiental de diferentes opciones de tratamiento final (Yuan y col., 2011; Zhang y col., 2018; Bravo, 2019), el reciclaje (Amponsah, 2011), las políticas de gestión (Ali y col., 2018; Cai y col., 2018), elementos relacionados a la sostenibilidad (Saldini y col., 2016; Wang y col., 2021), entre otros aspectos.

Con estos antecedentes, el objetivo principal de este trabajo es analizar los potenciales impactos ambientales de la producción de áridos en Cuba, tomando como caso de estudio la fábrica El Canal ubicada en la provincia de Cienfuegos. Para esto, se condujo un estudio comparativo de diferentes esquemas de producción, entre los que se determinó la alternativa más viable de acuerdo con las condiciones del sistema analizado.

---

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Procedimiento para la conducción del análisis emergético

Para la conducción del análisis emergético se consideró como límite espacial el sistema compuesto por el desarrollo minero y el procesamiento del mineral en la planta El Canal considerando como espacio temporal un año. Según la Ley 76 de Minas de Cuba (MINEM, 1995) se denomina desarrollo minero a las actividades de reparación de caminos, desbroce de capa vegetal, destape, acarreo, carga y transporte de material estéril y replantación de áreas minadas necesarias para la explotación del mineral útil. El proceso de lavado (beneficio) actual (A0) se divide en cuatro etapas principales: (1) recepción de la arena natural, (2) proceso de lavado y clasificación preliminar, (3) proceso de relavado y clasificación final y (4) almacenamiento y venta. Sin embargo, potenciales alternativas de mejora son el cambio de la tecnología de clasificación de tornillo sinfín a plantas de hidrociclones (A1) dado que esto aumenta la productividad del mineral hasta valores incluso superiores al 95%, a la vez que reduce el consumo de agua. Este uso de recursos hídricos puede ser incluso más significativo, si además del cambio de la tecnología de clasificación, se recupera el agua mediante el uso de filtros prensas (A2). Mayores detalles de estas tecnologías pueden consultarse en Bouso, (2000).

Como base emergética en esta investigación se usó 15,83 E+25 seJ/año dado que es la referencia más extendida para comparaciones consistentes entre diferentes estudios y aplicaciones. Para la construcción de las tablas emergéticas los datos de consumo de materiales fueron tomados de registros de la entidad y de los balances de materiales de Valdés y col., (2021). Se consideró que la planta procesó 240 462,01 t de arena natural/año, valor promedio de datos de la empresa. Para la estimación de la energía del aire necesario para la combustión del diésel y la energía de labor humana se usaron las ecuaciones 1 y 2 reportadas por Valdés y Capote, (2021).

$$\text{Aire} \left( \frac{J}{\text{año}} \right) = \left[ \text{Aire} \left( \frac{kg}{\text{año}} \right) \cdot C_p \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot T(K) \right] \cdot \frac{1000 J}{1kJ} \quad (1)$$

$$\text{Labor} \left( \frac{J}{\text{año}} \right) = \left( \text{cantidad de obreros} * \frac{(h/\text{año})}{\left(8 \frac{h}{\text{día}}\right)} \right) \cdot 2500 \frac{kcal}{\text{día}} \cdot 4186 \frac{J}{kcal} \quad (2)$$

La cantidad necesaria de aire (kg/año) se estimó en función del combustible consumido por cada alternativa, considerando una combustión completa, por lo que, mediante un análisis masa-masa, se necesitan 14,5228 kg aire/kg de combustible usado. Como temperatura del aire se asumió 300 K, por lo que la capacidad calorífica para esa temperatura es 1,007 kJ/kg·K según Bergman y Lavine, (2017). La cantidad de obreros que trabajan en el proceso son 11 y en promedio en el año se trabajan 18 099 horas.

La complejidad de la aplicación del análisis emergético a los residuos industriales radica en que en estos sistemas la fracción de emergía proveniente de recursos renovables (R) tiende a ser muy pequeña, o incluso cero, conduciendo a que los indicadores tradicionales sean irrazonablemente grandes o pequeños. Tomando lo anterior como referencia, varios autores (Brown y Buranakarn, 2003; Yang y col., 2003; Mu y col., 2011) han propuesto nuevos índices para evaluar los sistemas de gestión de residuos en sistemas industriales, cuya selección y uso depende, en gran medida, de las

características del sistema analizado. Por eso, en esta investigación se consideraron además de los indicadores tradicionales algunos específicos para los residuos industriales como se discute a continuación.

Según Mu y col., (2011) la forma apropiada para calcular la razón de eficiencia energética (EYR) y la razón de carga ambiental (ELR) en sistemas industriales se corresponden con las ecuaciones 3 y 4 que se formulan a partir del esquema de la Figura 1. En el caso del Índice de sostenibilidad energético (ESI) el cálculo se mantiene según la forma tradicional solo que usando la modificación propuesta para  $ELR_{ii}$ , es decir, de acuerdo a la ecuación 5.

$$EYR = \frac{R + N + F_1 + F_2}{F_1 + F_2} \quad (3)$$

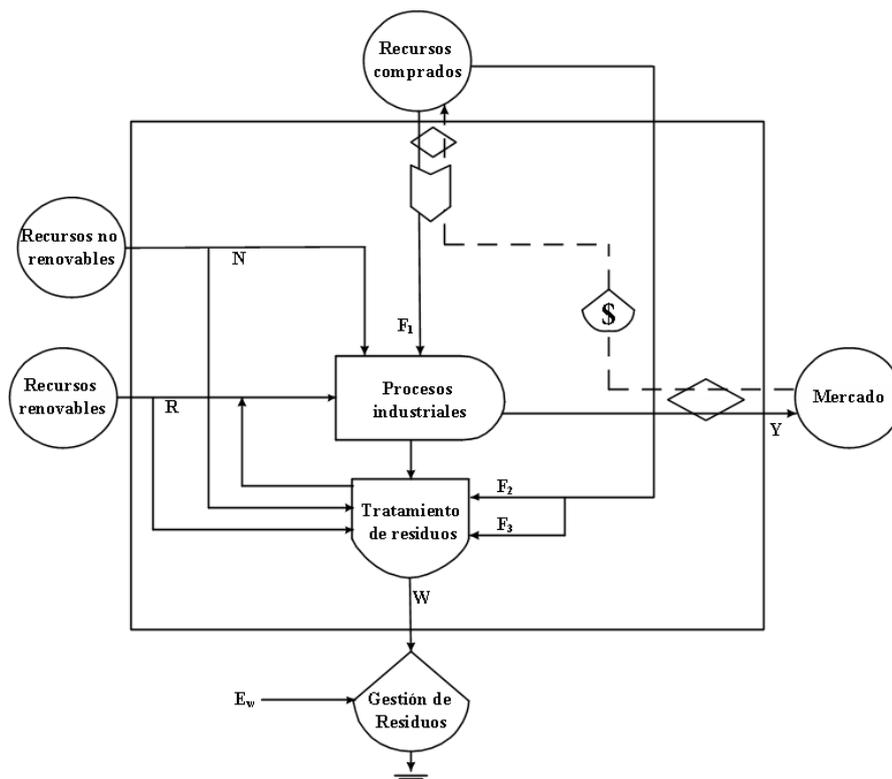
$$ELR_{ii} = \frac{N + F_1 + F_2}{R + F_1 + F_3} \quad (4)$$

$$ESI = \frac{EYR}{ELR_{ii}} \quad (5)$$

R-emergía de los recursos renovables de la naturaleza (seJ/tiempo).

N-emergía de los recursos no-renovables de la naturaleza (seJ/tiempo).

F-emergía de los recursos de la economía (seJ/tiempo).



**Figura 1.** Entradas y salidas de flujos emergéticos en un sistema industrial considerando la gestión de residuos e inversiones para la mitigación de emisiones.  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F_3$  denotan las inversiones en la producción, la gestión de residuos y posibles inversiones adicionales en el sistema de tratamiento respectivamente. Fuente: (Mu y col., 2011)

Por otra parte, Chen y Chen, (2012) introdujeron la Intensidad de Mitigación Emergética (EMI) como la razón de la mitigación de emisiones netas (EM) por unidad de entrada total de energía al sistema (Y) (ecuación 6). Wang y col., (2013) proponen además la Razón de Tratamiento (%W) que consiste en la razón entre la energía del residuo dividido entre el total de energía para el sistema de tratamiento (ecuación 7) y la Razón de Retroalimentación (FYR) como la razón de la energía de retroalimentación del sistema (ER) dividido por la retroalimentación de la energía producto de la economía (ecuación 8). Según estos autores estos indicadores representan la habilidad de auto-organización del sistema y en la literatura ya se han encontrado aplicaciones, por ejemplo el trabajo de Cheng y col., (2019).

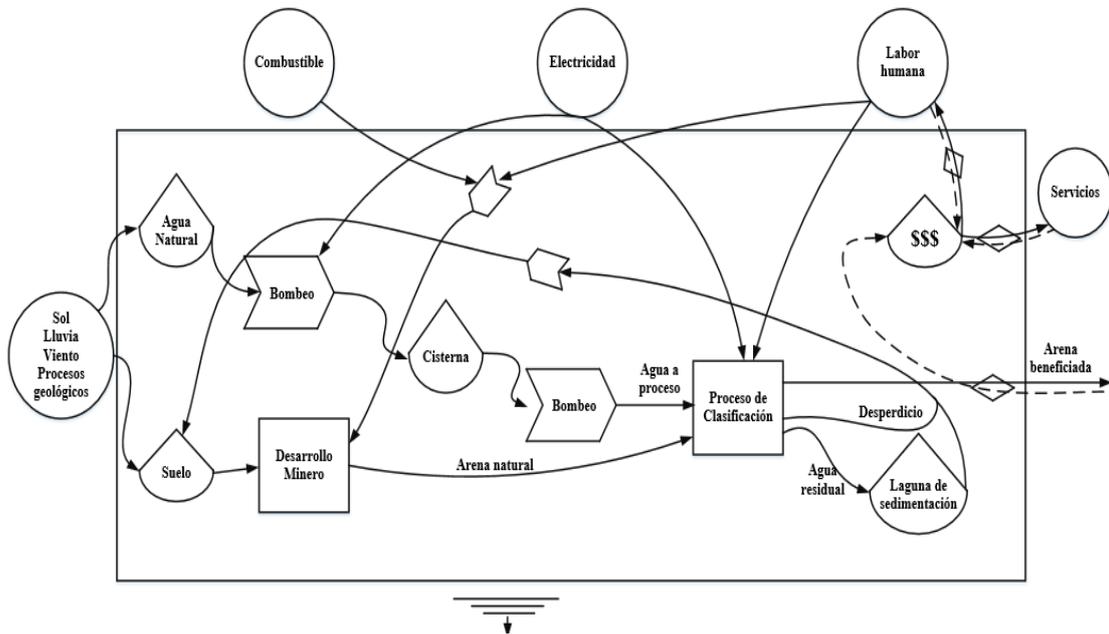
$$EMI = \frac{EM}{Y} \tag{6}$$

$$\%W = \frac{\text{Energía del residuo}}{Y} \tag{7}$$

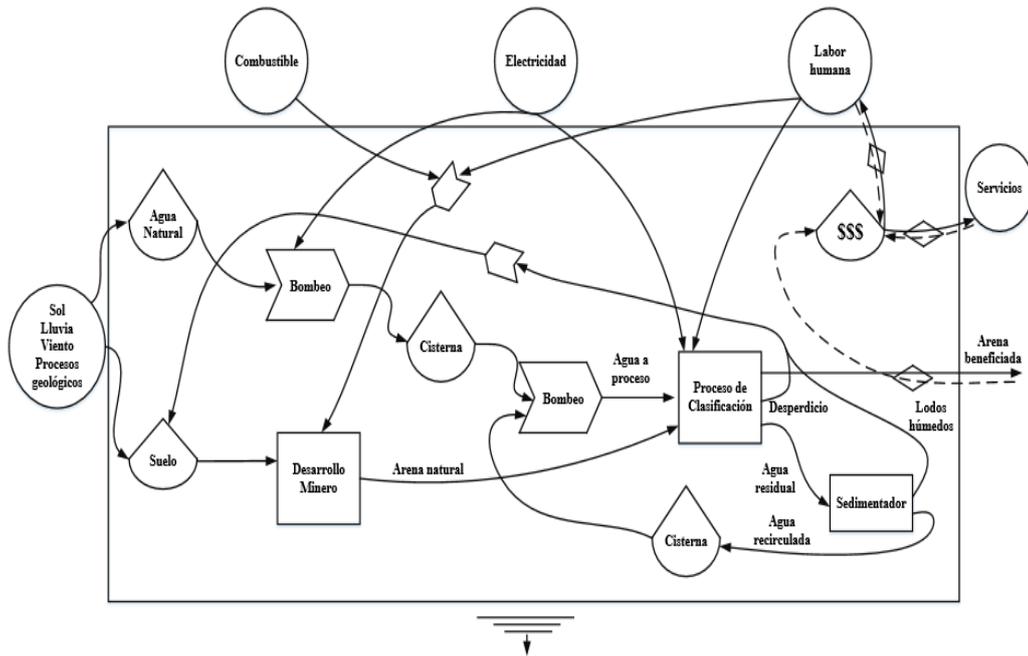
$$FYR = \frac{ER}{F} \tag{8}$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

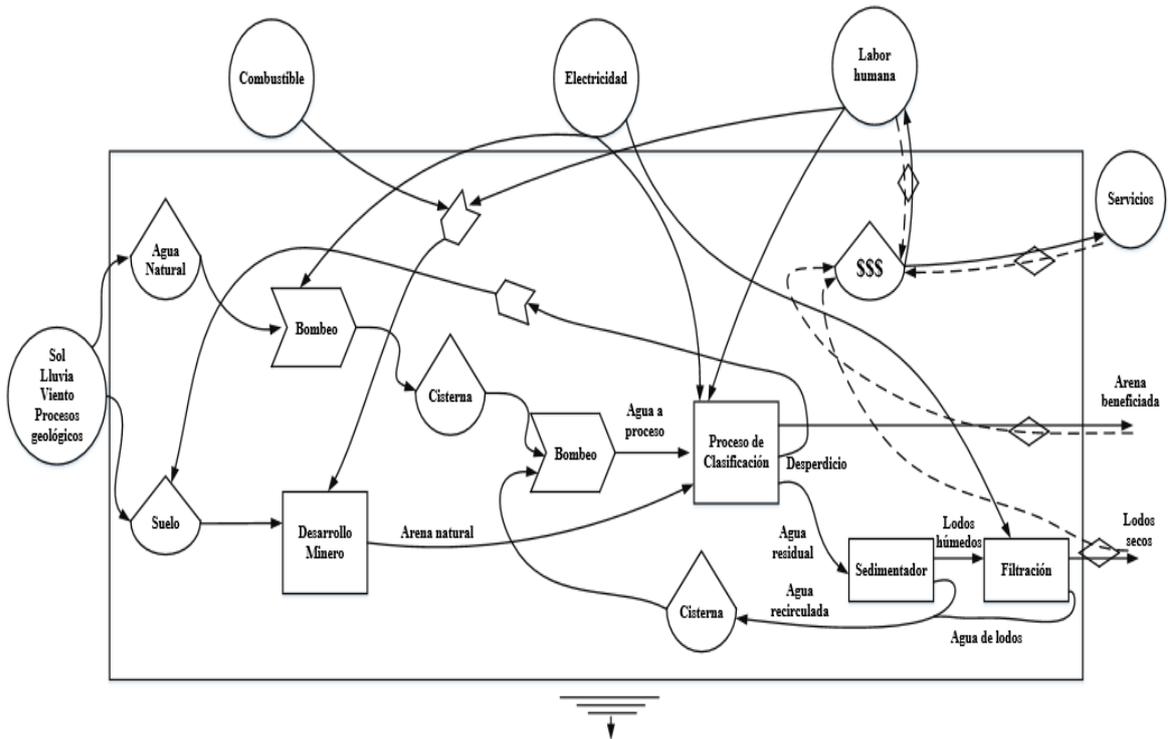
Para la representación de los diagramas energéticos se identificaron las principales operaciones involucradas y, en función de esto, se modelaron los sistemas correspondientes a cada variante. En las Figuras 2, 3 y 4 se muestran los diagramas energéticos de la tecnología actual y variantes de mejora para la recuperación de agua.



**Figura 2.** Diagrama energético para el proceso de lavado de arena en la planta El Canal



**Figura 3.** Diagrama emergético para la alternativa de mejora uno



**Figura 4.** Diagrama emergético para la alternativa de mejora dos

Conocidos los principales flujos que atraviesan el sistema se identificaron sus unidades de valor emergético (UEV) y se construyeron las Tablas emergéticas 1, 2 y 3.

**Tabla 1.** Tabla emergética para la tecnología actual

#	Flujo	Magnitud	Unidad	Unidad de valor emergético (seJ/unidad)	Emergía solar (seJ/año)
<b>Recursos renovables de la naturaleza (R)</b>					<b>3,57E+17</b>
1	Aire	3,64E+18	J/año	9,82E+02 (Odum, 2000)	3,57E+17
<b>Recursos no renovables de la naturaleza (N)</b>					<b>4,03E+20</b>
2	Agua	4,02E+15	g/año	5,42E+05 (Buenfil, 2001)	2,17E+17
3	Arena natural	2,40E+15	g/año	1,68E+09 (Odum, 1996)*	4,03E+20
<b>Materiales de la economía (M)</b>					<b>3,36E+20</b>
4	Electricidad	1,11E+16	J/año	7,99E+05 (Valdés y Capote, 2021)	8,91E+17
5	Combustible diesel	1,18E+15	g/año	2,83E+09 (Bastianoni y col., 2009)	3,35E+20
6	Lubricantes	3,91E+09	g/año	2,64E+09 (Bastianoni y col., 2009)	1,03E+15
<b>Servicios de la economía (S)</b>					<b>1,31E+18</b>
7	Labor humana	2,60E+15	J/año	3,93E+06 (Giannetti y col., 2016)	1,02E+18
8	Servicios comprados	6,18E+04	\$/año	4,60E+12 (Sweeney y col., 2007)	2,84E+17
<b>Emergía total</b>					<b>7,41E+20</b>
9	Arena lavada	1,99E+15	g/año	3,72E+13	

**Tabla 2.** Tabla emergética para la alternativa de mejora uno

#	Flujo	Magnitud	Unidad	Unidad de valor emergético (seJ/unidad)	Emergía solar (seJ/año)
<b>Recursos renovables de la naturaleza (R)</b>					<b>3,57E+17</b>
1	Aire	3,64E+18	J/año	9,82E+02 (Odum, 2000)	3,57E+17
<b>Recursos no renovables de la naturaleza (N)</b>					<b>4,03E+20</b>
2	Agua	2,46E+14	g/año	5,42E+05 (Buenfil, 2001)	1,33E+16
3	Arena natural	2,40E+15	g/año	1,68E+09 (Odum, 1996)	4,03E+20
<b>Materiales de la economía (M)</b>					<b>3,35E+20</b>
4	Electricidad	3,57E+15	J/año	7,99E+05 (Valdés y Capote, 2021)	2,85E+17
5	Combustible diesel	1,18E+15	g/año	2,83E+09 (Bastianoni y col., 2009)	3,35E+20
6	Lubricantes	3,91E+09	g/año	2,64E+09 (Bastianoni y col., 2009)	1,03E+15
<b>Servicios de la economía (S)</b>					<b>1,46E+18</b>
7	Labor humana	2,60E+15	J/año	3,93E+06 (Giannetti y col., 2016)	1,02E+18

8	Servicios comprados	6,18E+04	\$/año	4,60E+12 (Sweeney y col., 2007)	2,84E+17
9	Inversión económica	3,35E+08	\$/año	4,60E+12 (Sweeney y col., 2007)	1,54E+17
<b>Emergía total</b>					<b>7,40E+20</b>
#	Arena lavada	2,28E+11	g/año	3,24E+13	

Tabla 3. Tabla emergética para la alternativa de mejora dos

#	Flujo	Magnitud	Unidad	Unidad de valor emergético (seJ/unidad)	Emergía solar (seJ/año)
<b>Recursos renovables de la naturaleza (R)</b>					<b>2,68E+21</b>
1	Aire	2,73E+18	J/año	9,82E+02 (Odum, 2000)	2,68E+21
<b>Recursos no renovables de la naturaleza (N)</b>					<b>4,03E+24</b>
2	Agua	2,02E+14	g/año	5,42E+05 (Buenfil, 2001)	1,09E+20
3	Arena natural	2,40E+15	g/año	1,68E+09 (Odum, 1996)	4,03E+24
<b>Materiales de la economía (M)</b>					<b>2,52E+24</b>
4	Electricidad	5,74E+15	J/año	7,99E+05 (Valdés y Capote, 2021)	4,59E+21
5	Combustible diesel	8,88E+14	g/año	2,83E+09 (Bastianoni y col., 2009)	2,51E+24
6	Lubricantes	3,91E+09	g/año	2,64E+09 (Bastianoni y col., 2009)	1,03E+19
<b>Servicios de la economía (S)</b>					<b>2,11E+22</b>
7	Labor humana	2,60E+15	J/año	3,93E+06 (Giannetti y col., 2016)	1,02E+22
8	Servicios comprados	6,18E+04	\$/año	4,60E+12 (Sweeney y col., 2007)	2,84E+21
9	Inversión económica	1,75E+09	\$/año	4,60E+12 (Sweeney y col., 2007)	8,04E+21
<b>Emergía total</b>					<b>6,57E+24</b>
#	Arena lavada	2,28E+15	g/año	2,88E+13	

Para el cálculo de la razón de carga ambiental propuesta por Mu y col., (2011) en las variantes de mejora se consideró que la inversión económica tiene como propósito la mejora el sistema ( $F_1$ ). La inversión económica se corresponde a los resultados de Valdés y col., (2021), pero como esta última solo se realiza en un momento inicial, su valor fue dividido entre los diez años considerados en la evaluación económica, similar al procedimiento hecho por Brown y Ulgiati, (2002). Respecto a la adquisición de servicios de la economía se aproximó que estos permanecían constantes. Para el cálculo de la intensidad de mitigación emergética (EMI) se estimó la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido en un año a partir de los resultados del ACV (Valdés y col., 2020) actualizados para incluir el desarrollo minero y para calcular FYR se consideró el agua recirculada en cada variante. En la Tabla 4 se muestran los indicadores calculados.

**Tabla 4.** Indicadores emergéticos calculados

<i>Indicador</i>	<i>A0</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
Energía específica (seJ/g)	3,72E+09	3,24E+09	2,88E+09
%R	0,0482%	0,0483%	0,0408%
EYR	2,1971	2,1981	2,5892
ELR	2073,23	2071,40	2452,29
ELR <sub>ii</sub> (Mu y col., 2011)	2073,23	1446,77	612,49
ESI	0,0011	0,0015	0,0011
ESI (Mu y col., 2011)	0,0011	0,0015	0,0042
EMI (kg CO <sub>2</sub> /seJ) (Chen y Chen, 2012)	-	1,4464E-16	1,4227E-16
FYR (Wang y col., 2013)	-	0,0005	2,2489

Puede comprobarse que la energía específica de las alternativas uno y dos son menores respecto a la variante actual, lo que es positivo puesto que, para entregar una misma unidad de masa del producto, se consumen menos recursos. Los EYR < 5 indican un alto consumo de materiales secundarios (en este caso la arena), pero lo más llamativo son los valores de las razones de carga ambiental. El ELR<sub>ii</sub> indica que el cambio de la tecnología de clasificación actual a clasificadores centrífugos en conjunto con la recuperación de agua mediante filtros prensa (A2) es la de mejor desempeño, pero, si este indicador calculado en su versión tradicional, no se justifica entonces el uso de filtros prensa y la alternativa de mejor desempeño es la uno (A1). Esta incongruencia está dada en la formulación matemática de los indicadores, que hace que una mayor inversión ( $F_1$ ) garantice un mejor desempeño ambiental, lo que no es verídico en todos los sistemas. Estos resultados indican que el indicador propuesto por Mu y col., (2011) no es adecuado en todos los contextos, o, al menos, debe analizarse en conjunto con otros indicadores. Por otra parte, si se analiza además el EMI puede verse que la alternativa uno (A1) logra una mayor mitigación del impacto de emisiones de CO<sub>2</sub> con una menor inversión emergética; resultado que queda verificado en el FYR pero considerando en este indicador la recirculación de material.

#### 4. CONCLUSIONES

1. La producción de áridos tiene un moderado impacto económico, pero este está fundamentado en el extractivismo de recursos no renovables por lo que es necesario seguir políticas adecuadas de explotación mineras. Para el caso de la producción de áridos actual en la fábrica El Canal se estimó una energía específica de 3,72E+09 seJ/g.
2. El cambio de la tecnología de clasificación de tornillo sinfín a las plantas de hidrociclones presenta mejoras ambientales considerables y, por consiguiente, es más sostenible para las condiciones de la planta de lavado de arena El Canal. Si bien la recuperación de agua mediante filtración es igualmente atractiva, esta última es más dependiente de la inversión económica.
3. El análisis emergético es un método adecuado para la valoración del desempeño ambiental en los sistemas de gestión de residuos una vez que permite una comprensión integral de los sistemas aportando información relevante desde una

perspectiva diferente a los análisis tradicionales. Actualmente, esto es de gran relevancia dada la necesidad de considerar las limitaciones de los ecosistemas en la toma de decisiones.

## **AGRADECIMIENTOS**

A los trabajadores de la Empresa de Materiales de la Construcción de Cienfuegos, especialmente a Olaida Torres-Calzadilla por su apoyo en la recopilación de datos.

## **REFERENCIAS**

- Aguilar, N., Rosas, J. A., & Espinosa, R., Evaluación Emergy y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, México., *Cultivos Tropicales*, Vol. 36, No. 4, 2015, pp. 144–157. <http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362015000400020y script=sci abstract>
- Ali, M., Marvuglia, A., Geng, Y., Chaudhry, N., & Khokhar, S., Emergy based carbon footprinting of household solid waste management scenarios in Pakistan., *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 131, 2018, pp. 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.011>
- Amponsah, N.Y., Contribution à la théorie de l'émergie: Application au recyclage Thèse de doctorat, École doctorale Sciences pour l'ingénieur, Géosciences, Architecture (Nantes), 2011, France. <https://theses.fr/2011EMNA0002>
- Bastianoni, S., Campbell, E.D., Ridolfi, R., & Pulselli, M.F., The solar transformity of petroleum fuels., *Ecological Modelling*, Vol. 220, No. 1, 2009, pp. 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.09.003>
- Bergman, T.L., & Lavine, A.S., *Fundamentals of heat and mass transfer.*, 8<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, 2017, pp. 899–927. <https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Heat+and+Mass+Transfer%2C+8th+Edition-p-9781119353881>
- Bouso, J.L., El consumo de agua en el lavado de áridos., *Canteras y explotaciones*, 2000, 54–62. <https://es.scribd.com/document/392727667/Arena2-El-Consumo-de-Agua-en-El-Lavado-de-Aridos>
- Bravo, E., Metodología para valorar la sostenibilidad de la gestión de residuos agrícolas con fines energéticos., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas en la Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2019.
- Brown, M.T., & Buranakarn, V., Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options., *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 38, No. 1, 2003, pp. 1–22. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00093-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00093-9)
- Brown, M.T., & Ulgiati, S., Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems., *Journal of Cleaner Production*, Vol. 10, No. 4, 2002, pp. 321–334. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00043-9)
- Buenfil, A., Emergy evaluation of water., Disertación presentada en opción al grado de Doctor en Filosofía en la Universidad de Florida, Estados Unidos, 2001. <https://faculty.eng.ufl.edu/cfw/wp-content/uploads/sites/312/2020/07/BuenfilA2001Dissertation.pdf>
- Cai, W., Liu, C., Zhang, C., Ma, M., Rao, W., Li, W., He, K., & Gao, M., Developing
-

- the ecological compensation criterion of industrial solid waste based on emergy for sustainable development., *Energy*, Vol. 157, 2018, pp. 940-948. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.207>
- Chen, S., & Chen, B., Sustainability and future alternatives of biogas-linked agrosystem (BLAS) in China: An emergy synthesis., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 6, 2012, pp. 3948–3959. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.040>
- Chen, W., Liu, W., Geng, Y., Brown, M.T., Gao, C., & Wu, R., Recent progress on emergy research: A bibliometric analysis., *Renewable Sustainable Energy Reviews*, Vol. 73, 2017, pp. 1051-1060. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.041>
- Cheng, J., Zhang, C., Sun, J., & Qiu, L., Sustainability accounting for the construction and operation of a plant-scale solar-biogas heating system based on emergy analysis., *International Journal of Energy Research*, Vol. 43, No. 8, 2019, pp. 3806–3822. <https://doi.org/10.1002/er.4543>
- Dong, X., Ulgiati, S., Yan, M., Zhang, X., & Gaio, W., Energy and emergy evaluation of bioethanol production from wheat in Henan Province, China. *Energy Policy*, Vol. 36, No. 10, 2008, pp. 3882-3892. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.027>
- Giannetti, F.B., Prevez, L., Agostinho, F., & Almeida, C., Greening A Cuban local mango supply chain: sustainability options and management strategies., *Journal of Environmental Accounting and Management*, Vol. 4, No. 3, 2016, pp. 251-266. <https://doi.org/10.5890/JEAM.2016.09.002>
- He, S., Zhu, D., Chen, Y., Liu, X., Chen, Y., & Wang, X., Application and problems of emergy evaluation: A systemic review based on bibliometric and content analysis methods., *Ecological Indicators*, Vol. 114, 2020, 106304. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106304>
- Jiang, G., Zuo, L., Asutosh, A.T., & Zhang, J., Environmental sustainability study of urban waterfront landscapes based on the LCA–Emergy–Carbon footprint and artificial neural network method., *Buildings*, Vol. 14, No. 2, 2024, pp. 1-25. <https://doi.org/10.3390/buildings14020386>
- Jing, P., Sheng, J., Wang, Y., Hu, T., Guo, L., Zhu, R., Dong, K., Mahmoud, A., Liu, Y., & Li, X., Assessing the ecological security of the Three Gorges reservoir complex ecosystem based on the improved three-dimensional emergy ecological footprint model., *Science of the Total Environment*, Vol. 933, 2024, 173086. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173086>
- Liu, Z., Wang, S., Xue, B., Li, R., Geng, Y., Yang, T., Li, Y., Dong, H., Luo, Z., & Tao, W., Emergy-based indicators of the environmental impacts and driving forces of non-point source pollution from crop production in China., *Ecological Indicators*, Vol. 121, 2021, 107023. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107023>
- Martínez-Allier, J., & Muradian, R., Taking stock: The keystones of ecological economics., Chapter 1, In *Handbook of ecological economics*. Edward Elgar Publishing, 2015, pp. 1–25. [https://www.elgaronline.com/edcollchap/edcoll/9781783471409/9781783471409\\_00005.xml](https://www.elgaronline.com/edcollchap/edcoll/9781783471409/9781783471409_00005.xml)
- MINEM., Ley No 76-Ley de Minas., *Gaceta Oficial de la República de Cuba*, enero 23, 1995, pp. 1-20. [https://www.minem.gob.cu/sites/default/files/documentos/d\\_222-](https://www.minem.gob.cu/sites/default/files/documentos/d_222-)
-

[97 reglamento ley 76 minas 0.pdf](#)

- Mu, H., Feng, X., & Chu, K.H., Improved emergy indices for the evaluation of industrial systems incorporating waste management., *Ecological Engineering*, Vol. 37, No. 2, 2011, pp. 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.026>
- Odum, H.T., *Environmental Accounting., Emergy and Environmental Decision Making.* John Wiley & Sons, 1996. pp. 1-370. <https://www.wiley.com/en-us/Environmental+Accounting%3A+Emergy+and+Environmental+Decision+Making-p-9780471114420>
- Odum, H.T., *Emergy of Global Processes.*, In *Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation.*, Chapter 2, Center for Environmental Policy 2000. pp. 12-13. [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7801404/mod\\_resource/content/1/Folio\\_2.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7801404/mod_resource/content/1/Folio_2.pdf)
- Qu, Z., Luo, N., Guo, J., Xu, J., Wang, P., & Meng, Q., Enhancing sustainability in the new variety-based low emergy system for maize production by nitrogen optimization., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 199, 2024, 114471. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114471>
- Saldini, F., Vuai, S.A., Langat, B.K., Gustavsson, M., Bayitse, R., Gidamis, A.B., Belmakki, M., Owis, A.S., Rashamuse, K., Sila, D.N., & Bastianoni, S., Sustainability assessment of selected biowastes as feedstocks for biofuel and biomaterial production by emergy evaluation in five African countries., *Biomass and Bioenergy*, Vol. 85, 2016, pp. 100-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.016>
- Sweeney, S., Cohen, M.J., King, D., & Brown, M.T., Creation of a Global Emergy Database for Standardized National Emergy Synthesis. In *Proceedings from the Fourth Biennial Emergy Conference*, Center for Environmental Policy, Vol. 23, 2007, pp. 1-18. [https://www.emergysociety.com/wp-content/uploads/Sweeney.2007.NEAD\\_Chapter23.4thProceedings.pdf](https://www.emergysociety.com/wp-content/uploads/Sweeney.2007.NEAD_Chapter23.4thProceedings.pdf)
- Valdés, A., y Capote, Y., Análisis emergético de la producción de electricidad en una termoeléctrica cubana., *Centro Azúcar*, Vol. 48, No. 1, 2021, pp. 71–80. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2223-48612021000100071y script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2223-48612021000100071y script=sci_arttext)
- Valdés, A., López, E.J., Torres, O., Rodríguez, E., y Aparicio, L.J., Análisis de los beneficios ambientales de la recuperación de las aguas residuales en el proceso de lavado de arenas., *Tecnología Química*, Vol. 40, No. 3, 2020, pp. 640-657. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852020000300640y script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852020000300640y script=sci_arttext)
- Valdés, A., Ramos, F.E., López, E.J., & Torres, O., Technical-economic analysis of water recovery alternatives in sand washing process., *Revista Universidad y Sociedad*. Vol. 13, No. 4, 2021, pp. 97–106. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/download/2203/2178/4314#page=97>
- Wang, X., Tan, W., Zhou, S., Xu, Y., Cui, T., Gao, H., Chen, M., Dong, X., Sun, H., & Yang, J., Converting maize production with low emergy cost and high economic return for sustainable development., *Renewable Sustainable Energy Reviews*, Vol. 136, 2021, 110443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110443>
-

- Wang, Y., Lin, C., Li, J., Duan, N., Li, X., & Fu, Y., Emergy analysis of biogas systems based on different raw materials., *The Scientific World Journal*, Vol. 2013, No. 1, 2013, 415812. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/415812>
- Yang, H., Li, Y., Shen, J., & Hu, S., Evaluating waste treatment, recycle and reuse in industrial system: An application of the emergy approach., *Ecological Modelling*, Vol. 160, No. 1-2, 2003, pp. 13–21. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00288-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00288-0)
- Yuan, F., Shen, L., & Li, Q., Emergy analysis of the recycling options for construction and demolition waste., *Waste management*, Vol. 31, No. 12, 2011, pp. 2503-2511. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.001>
- Zhang, H., Guan, X., Ding, Y., & Liu, C., Emergy analysis of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat power generation., *Journal of Cleaner Production*, Vol. 183, 2018, pp. 1207-1215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.170>
- Zhang, J., Asutosh, A.T., & Zhang, Y., Sustainability Research of Building Systems Based on Neural Network Predictive Models and Life Cycle Assessment (LCA)–Emergy–Carbon Footprint Method., *Sustainability*, Vol. 16, No. 1, 2024, pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/su16010329>

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- M.Sc. Alejandro Valdés López. Investigación, metodología, análisis formal, visualización, redacción - revisión y edición.
  - Dr.C. Eduardo Julio López Bastida. Conceptualización, supervisión, redacción - revisión y edición.
  - Dr.C. Fernando Efrén Ramos Miranda. Supervisión, redacción - primera redacción.
  - Dr.C. Edelvy Bravo Amarante. Conceptualización, metodología, redacción - primera redacción.
  - Dr.C. Roxana Cortés Martínez. Visualización, redacción - revisión y edición.
-