

50

Fecha de presentación: marzo, 2021

Fecha de aceptación: mayo, 2021

Fecha de publicación: julio, 2021

ANÁLISIS DE DECISIONES

MULTICRITERIO EN LA INTEGRACIÓN DE HERRAMIENTAS DE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA

MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS IN THE INTEGRATION OF ECOLOGICAL ECONOMY TOOLS

Edelvy Bravo Amarante¹

E-mail: edelvy@uniss.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3179-710X>

Ralf Kiran Schulz²

E-mail: ralf-kiran.schulz@uni-kassel.de

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2148-9055>

Oswaldo Romero Romero¹

E-mail: osvaldo@uniss.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1447-3151>

Eduardo Julio López Bastida³

E-mail: kuten@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1305-852X>

Leonor Patricia Güereca⁴

E-mail: lguerecah@ingen.unam.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5425-9072>

¹ Universidad de Sancti Spiritus “José Martí Pérez” Cuba.

² Universidad de Kassel. Alemania.

³ Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” Cuba.

⁴ Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Bravo Amarante, E., Schulz, R.K., Romero Romero, O., López Bastida, E. J., & Güereca, L. P. (2021). Análisis de decisiones multicriterio en la integración de herramientas de la economía ecológica. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(4), 468-477.

RESUMEN

Para la valoración de la sostenibilidad se han desarrollado diferentes herramientas de economía ecológica, sin embargo, no existe aún un consenso, que permita la integración de estas cuando se trata de ecosistemas complejos, tales como los sistemas socio productivos donde se gestione sus residuos agrícolas con fines energéticos. El objetivo del presente trabajo fue: valorar mediante el análisis multicriterio la integración de las herramientas de la economía ecológica. Para ello se consideró lo reportado en la literatura referente a la aplicación de las herramientas de la economía ecológica utilizando como caso de estudio la de gestión de los residuos agrícolas con fines energéticos de la producción de arroz en la “Empresa de granos Sur del Jibaro”. El análisis multicriterio de proceso analítico jerárquico (AHP) permitió integrar las herramientas de la economía ecológica, análisis de ciclo de vida, el método exergético y el método emergético.

Palabras clave: Análisis multicriterio, sostenibilidad, economía ecológica.

ABSTRACT

For the assessment of sustainability, different tools of ecological economy have been developed, however, there is still no consensus that allows their integration when it comes to complex ecosystems, such as socio-productive systems where their agricultural waste is managed with energy purposes. The objective of the present work was: to assess the integration of ecological economy tools through multicriteria analysis. To this end, what was reported in the literature regarding the application of ecological economy tools was considered, using as a case study the management of agricultural residues for energy purposes from rice production in the “Empresa de granos Sur del Jibaro”. The multi-criteria analysis of the hierarchical analytical process (AHP) allowed integrating the tools of ecology economics, life cycle analysis, the exergetic method and the emergy method.

Keywords: Multi-criteria analysis, sustainability, ecological economy.

INTRODUCCIÓN

Hasta la fecha no se ha alcanzado un consenso académico sobre la evaluación de la sostenibilidad de los procesos y/o recursos, dada su extraordinaria complejidad científica. Las políticas de desarrollo deben considerar de forma común los efectos socioeconómicos y ambientales para que tanto las contribuciones del medio ambiente como las contribuciones de la economía al bienestar humano sean valoradas de manera justa

Las herramientas de la economía ecológica representan un nuevo enfoque para el análisis de la sostenibilidad de ecosistemas complejos. La evaluación crítica de estas, demuestra las limitaciones que presentan cada una de ellas de manera aislada. Por lo que se hace necesaria la integración de las mismas.

El método Análisis de Decisiones Multicriterio, MCDM (del inglés: Multi-Criteria Decision Making), también conocido como Ayuda para toma de Decisiones Multicriterio, MCDA, es un conjunto de técnicas usadas en problemas complejos de priorización. Es una disciplina que permite combinar la matemática, gerenciamiento, informática, psicología, ciencias sociales, economía y ciencias ingenieriles. Los métodos MCDA son una familia de métodos que difieren en el tipo de problema al cual se adecúan y en el tipo de solución propuesta. En términos generales, los métodos MCDA tienen tres enfoques para alcanzar una solución: el enfoque completo, el enfoque preferencia/indiferencia y el enfoque del nivel de referencia.

El método Proceso Analítico Jerárquico, AHP (Analytical Hierarchy Process) (Saaty, 1987) es un método con un enfoque completo. Este permite construir un modelo jerárquico que represente el problema objeto de estudio, mediante criterios y alternativas planteadas inicialmente, para luego poder deducir, cual o cuales son las mejores alternativas y tomar una decisión final óptima. Con este proceso analítico jerárquico se pretende dividir una decisión compleja en un conjunto de decisiones simples, facilitando la comprensión y solución del problema propuesto. Mediante el esquema genérico o árbol de jerarquías, se pueden realizar las comparaciones de criterios con criterios, sus criterios con subcriterios y alternativas con alternativas. En las comparaciones se toman por pares, evaluando la importancia relativa de uno sobre otro con relación al objetivo propuesto. Las sucesivas evaluaciones se representan mediante matrices que enfrentan los criterios, subcriterios y alternativas en filas y columnas (Figura 1).

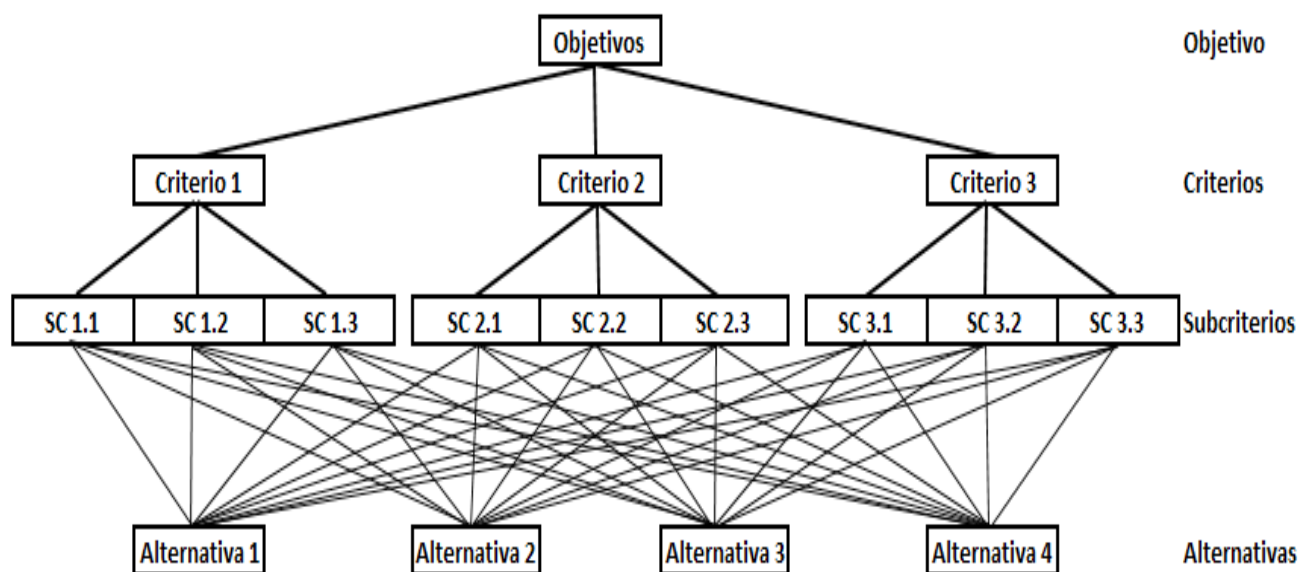


Figura. 1 Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el método Proceso analítico de jerarquía (AHP).

El método multicriterio del proceso analítico jerárquico AHP por su enfoque complejo, reúne las condicionantes para la integración de las herramientas de la economía ecológica. El objetivo del artículo es valorar mediante el análisis multicriterio la integración de las herramientas de la economía ecológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método Análisis de Decisiones Multicriterio, MCDM (del inglés: *Multi-Criteria Decision Making*), también conocido como Ayuda para toma de Decisiones Multicriterio, MCDA, es un conjunto de técnicas usadas en problemas complejos de priorización. Es una disciplina que permite combinar la matemática, gerenciamiento, informática, psicología, ciencias sociales, economía y ciencias ingenieriles. Los métodos MCDA son una familia de métodos que difieren en el tipo de problema al cual se adecúan y en el tipo de solución propuesta. En términos generales, los métodos MCDA tienen tres enfoques para alcanzar una solución: el enfoque completo, el enfoque preferencia/indiferencia y el enfoque del nivel de referencia (Ishizaka & Labib, 2009). El desarrollo de la investigación aplicara el enfoque completo.

En la investigación se propone utilizar dentro de las herramientas de análisis multicriterio el Proceso analítico de la jerarquía (*Analytic Hierarchy Process, AHP*). El proceso analítico de jerárquico (AHP), es una teoría general de medición. Se usa para derivar escalas de razón de comparaciones pareadas discretas y continuas. Estas comparaciones pueden tomarse de mediciones reales o de una escala fundamental que refleja la fuerza relativa de las preferencias y los sentimientos Saaty (1987). El Proceso Analítico de Jerárquico (AHP), fue presentado por Saaty en 1980, es una herramienta efectiva para manejar decisiones complejas, y puede ayudar al tomador de decisiones a establecer prioridades y tomar la mejor decisión. Al reducir las decisiones complejas a una serie de comparaciones por pares, y luego sintetizar los resultados, el AHP ayuda a capturar los aspectos subjetivos y objetivos de una decisión. Además, el AHP incorpora una técnica útil para verificar la consistencia de las evaluaciones del decisor, reduciendo así el sesgo en el proceso de toma de decisiones.

Se consideró como muestra para la aplicación del método, los reportes realizados por Bravo, et al. (2018, 2019). Se selecciona como un estudio de caso, la Empresa de Granos “Sur del Jíbaro”, que posee similares características a las del 80% de la producción de arroz en Cuba. Esta empresa se ubica hacia el sur de la provincia de Sancti Spíritus, tiene un área de 83 875 hectáreas, de las cuales 15 282,7 hectáreas son utilizadas solo para el cultivo de arroz.

El alcance de la investigación según los autores es la evaluación de la sostenibilidad de la gestión de residuos agrícolas en la producción de arroz. Para ello se realiza el análisis de cuatro alternativas posibles para la gestión de la paja de arroz; se compara la alternativa actual y se proponen tres alternativas para la valorización de la paja de arroz con fines energéticos. Para ello se utiliza la metodología propuesta en esta investigación.

Se realiza un análisis prospectivo, desde una perspectiva de la sostenibilidad del ciclo de vida de la producción de arroz para la toma de decisiones, sobre cómo hacer que las formas de producción del arroz sean más sostenibles en Cuba e introducir el uso de los residuos de cosecha para obtener energía a través de la digestión anaerobia (Figura 2).

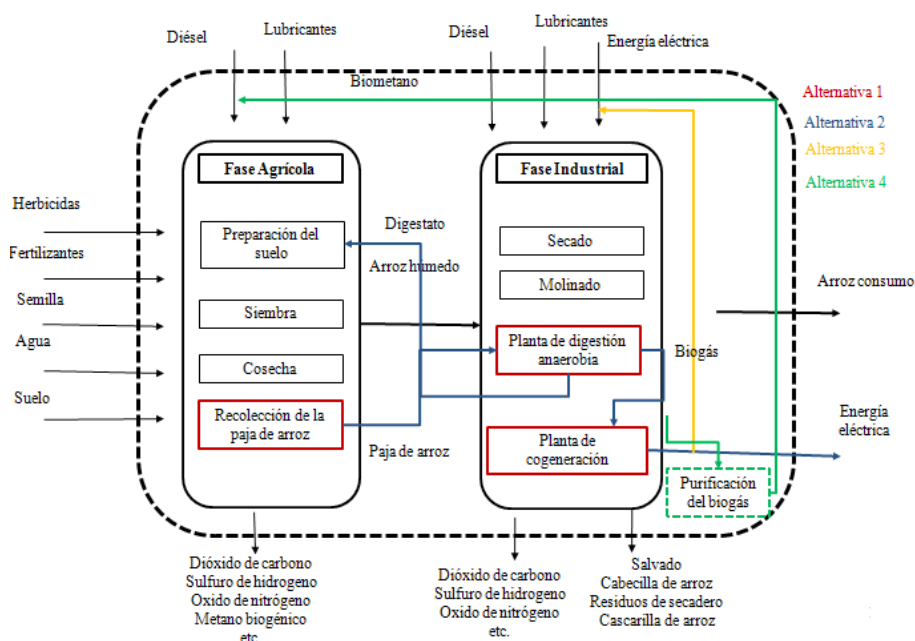


Figura. 2 Esquema que muestra los procesos que se incorporan a la etapa agrícola e industrial en el proceso de producción de arroz para la valorización de la paja de arroz con fines energéticos.

Fuente: Bravo, et al., (2019).

Las cuatro alternativas analizadas se describen a continuación:

Alternativa 1: es el escenario básico y coincide con el sistema de producción de arroz que se utiliza actualmente, donde el arroz es el producto principal y toda la paja generada en la fase de cosecha se incorpora al suelo y es considerada un subproducto.

Alternativa 2: el arroz es el producto principal y se evalúa la generación de electricidad (5 MW de capacidad instalada) a partir del biogás producido ($19,46 \text{ E} + 6 \text{ m}^3\text{año}^{-1}$) mediante la digestión anaerobia de toda la paja producida (subproducto) y donde toda la energía eléctrica generada se entrega al sistema electroenergético nacional (SEN). Para este propósito fue necesario determinar los nuevos balances de masa y energía en el proceso de fertilización del suelo, ya que estos se modifican al limitar la contribución por la descomposición natural de la paja de arroz de los componentes Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en el suelo, y también por la contribución que hace el digestato en relación con estos componentes por ser incorporado al suelo como un biofertilizante. En esta alternativa, al igual que en la alternativa 1, la energía eléctrica requerida por el sistema socioproductivo se importó del SEN.

Alternativa 3: el arroz es el producto principal y se evalúa la generación de electricidad (5 MW de capacidad instalada) a partir del biogás producido ($19,46 \text{ E} + 6 \text{ m}^3\text{año}^{-1}$) mediante la digestión anaerobia de toda la paja producida (subproducto), pero solo el 93% de la potencia generada se entrega al SEN, y el resto se utiliza para la autosuficiencia de la empresa.

Alternativa 4: el arroz es el producto principal y se evalúa el uso de una parte del biogás producido por la digestión anaerobia de toda la paja de arroz (subproducto) ($31,49 \text{ E} + 5 \text{ m}^3\text{año}^{-1}$) en los equipos de combustión interna en los procesos de cosecha y transporte del arroz, la compactación y traslado de la paja de arroz, y el traslado del digestato a los campos como biofertilizantes. Para ello el biogás es sometido a un proceso de purificación y compresión donde se obtiene el biometano y se consideró la sustitución del 60% del diésel utilizado en la Alternativa 2, según lo reportado por Cacula, et al. (2011); y Arango, et al. (2014), y se ajustaron los consumos energéticos en la etapa industrial. Al disminuir la disponibilidad de biogás, la generación de electricidad en esta alternativa se reduce a 4 MW de capacidad de generación instalada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al método, Proceso Analítico de Jerarquía (AHP) para el análisis multicriterio, se definieron los criterios a tener en cuenta para la toma de decisiones. Como el objetivo que se persigue en la investigación es integrar los resultados de los tres métodos de evaluación de la sostenibilidad aplicados, se definen como los tres criterios, los resultados de ACV, la exergía y la emergía. Para ello se asumen como subcriterios tres de los índices calculados en cada herramienta, como se muestra en el esquema representado en la Figura 2.

Con el propósito de evitar un tema muy debatido en la literatura actual, que son los errores que se pueden cometer por la jerarquización de un criterio (método) sobre otro, se le asignará un valor de 1 para la comparación entre cada uno de ellos en el proceso de ponderación, de acuerdo a la escala de ponderación pareada propuesta por Saaty (1987) (tabla 1). Esto permite que cualquiera de los criterios influye de la misma forma en el interés de la alternativa evaluada y, por consiguiente, todos van a ser igualmente importantes.

De igual manera se procede con la ponderación de los subcriterios dentro de cada criterio, y se le asigna un valor de 1 para la comparación entre ellos por considerarse que son igualmente importantes.

Tabla 1. Ponderación de significación de los criterios entre sí.

Ponderación de criterios	ACV	Exergía	Emergía
ACV	1	1	1
Exergía	1	1	1
Emergía	1	1	1

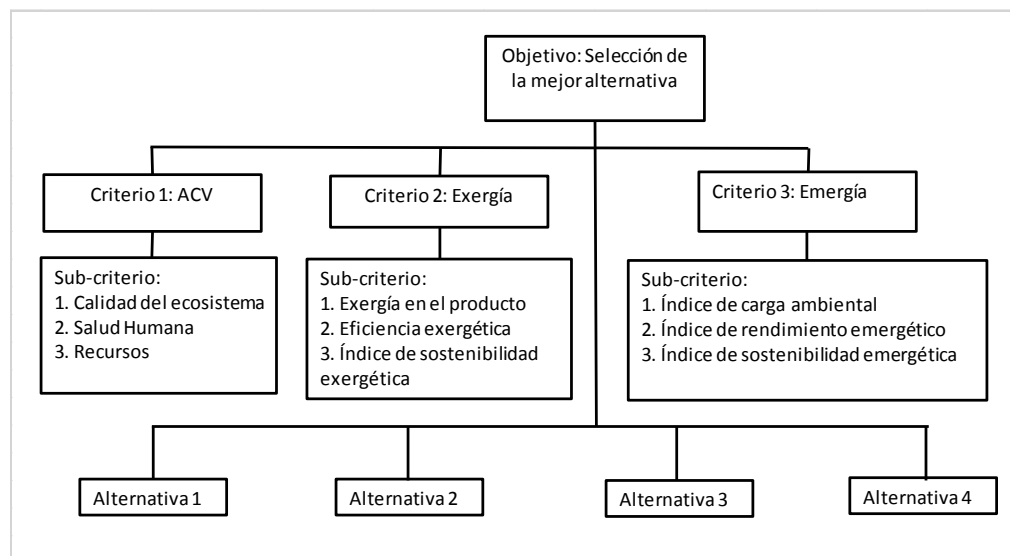


Figura 2. Esquema de los criterios y subcriterios para el AHP.

Con el objetivo de que la decisión pueda ser tomada por un decisor sin necesidad de recurrir a un método de consulta de expertos, se propone la normalización de los rangos de importancia de acuerdo a la escala de ponderación pareada propuesta por Saaty (1987) (tabla 2). Esta se sustenta en los criterios reportados por diferentes autores en la evaluación de indicadores (subcriterios) en la aplicación de cada método (criterios) en diferentes estudios de caso: ACV (Mingxin, et al., 2010; Shafie, et al., 2014; Karagulian, et al., 2015; Fuzzi, et al., 2015), exergía (Chen & Dincer, et al., 2005; Alanya, et al., 2015), emergía (Lomas Huerta, 2009; Brown, et al., 2012; Cano Londoño, 2012; Wang, et al., 2015). Las asignaciones se corresponden con la comparación porcentual entre los valores de los diferentes subcriterios considerados para la comparación de las alternativas entre sí.

Tabla 2. Asignación de los rangos de significación para cada subcriterio evaluado.

Sub-criterios	1	3	5	7	9
Calidad del ecosistema	$j = k$	$j \geq k(10\%)$	$j \geq k(10-30\%)$	$j \geq k(30-50\%)$	$j \geq k(\text{mayor } 50\%)$
Salud Humana	$j = k$	$j \geq k(10\%)$	$j \geq k(10-30\%)$	$j \geq k(30-50\%)$	$j \geq k(\text{mayor } 50\%)$
Recursos	$j = k$	$j \geq k(10\%)$	$j \geq k(10-30\%)$	$j \geq k(30-50\%)$	$j \geq k(\text{mayor } 50\%)$
Exergía en el producto	$j = k$	$j \leq k(10\%)$	$j \leq k(10-30\%)$	$j \leq k(30-50\%)$	$j \leq k(\text{mayor } 50\%)$
Eficiencia exergética	$j = k$	$j \leq k(10\%)$	$j \leq k(10-30\%)$	$j \leq k(30-50\%)$	$j \leq k(\text{mayor } 50\%)$
Índice de sostenibilidad exergética	$j = k$	$j \leq k(10\%)$	$j \leq k(10-30\%)$	$j \leq k(30-50\%)$	$j \leq k(\text{mayor } 50\%)$
Índice de carga ambiental	$j = k$	$j \geq k(10\%)$	$j \geq k(10-30\%)$	$j \geq k(30-50\%)$	$j \geq k(\text{mayor } 50\%)$
Índice de rendimiento emergético	$j = k$	$j \leq k(10\%)$	$j \leq k(10-30\%)$	$j \leq k(30-50\%)$	$j \leq k(\text{mayor } 50\%)$
Índice de sostenibilidad emergética	$j = k$	$j \leq k(10\%)$	$j \leq k(10-30\%)$	$j \leq k(30-50\%)$	$j \leq k(\text{mayor } 50\%)$

Para valores intermedios fueron asignados números pares del 2 al 10, como propone el método. Los resultados de la matriz de comparación de las alternativas entre sí en función de cada criterio y subcriterios, se muestran en el Anexo 1.

Cálculo de la matriz de comparación pareada. Para el cálculo de las matrices de comparación pareadas se utilizó el software Priority Estimation Tool (PriEsT) desarrollado por Siraj, (2011). PriEsT ofrece una amplia gama de soluciones no dominadas utilizando el método PrInT.

Como se puede apreciar en la tabla 3, la alternativa 4 es la que tiene mayor peso entre las cuatro evaluadas. Este resultado la convierte en la mejor alternativa para el manejo de los residuos agrícolas en la producción de arroz.

Tabla 3. Peso de cada alternativa según proceso analítico de jerarquía.

Alternativa 4	Alternativa 3	Alternativa 2	Alternativa 1
0,515	0,22	0,201	0,064

El software brinda como resultado el plano GAIA (*Geometrical Analysis for Interactive Assist*), este se representa en la Figura 3. Este plano es una representación bidimensional del problema de toma de decisión. Contiene todos los aspectos del problema de decisión: las alternativas, los criterios y la información de preferencias, según la normalización de cada uno de los subcriterios (umbrales y pesos). En este plano, se puede apreciar que existe una similitud entre las alternativas 2 y 3, y una marcada diferenciación entre la 1 y la 4.

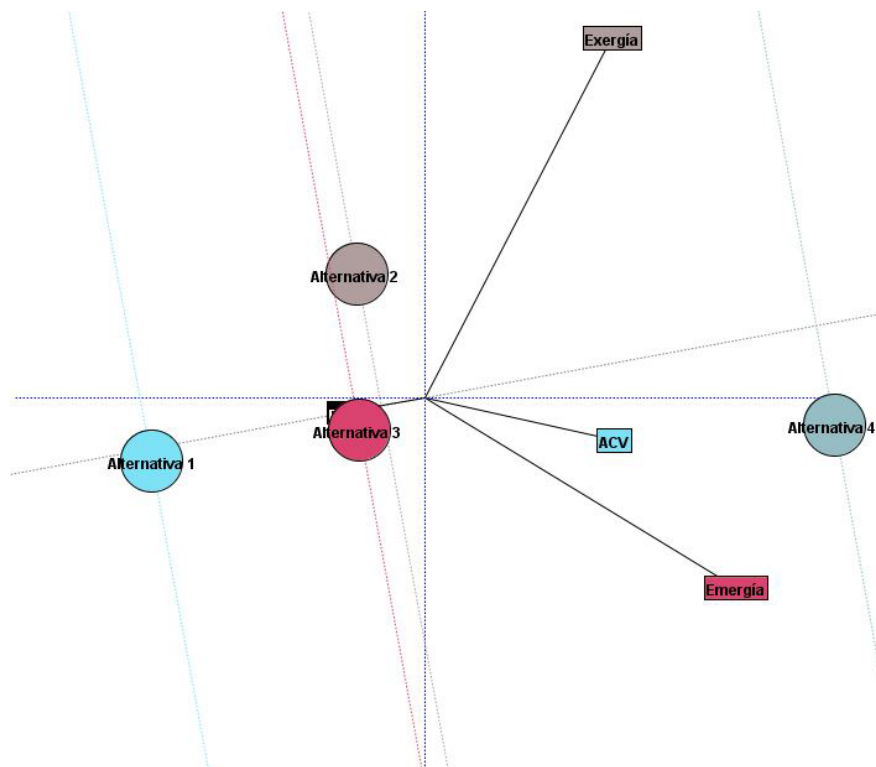


Figura 3. Expresión de los resultados del análisis multicriterio en el plano GAIA.

También se puede apreciar la correlación que existe entre los criterios (métodos) al estar sus vectores relativamente cerca y no tener un gran ángulo entre ellos. Los criterios de emergía y exergía tienen una potencia similar por encima del criterio de ACV, dado por la longitud de sus vectores. Dentro de las alternativas, la 4 es la de mayor preferencia al tener el vector que la representa una mayor longitud con respecto a los tres criterios. En este caso solo se perdió el 0,18 % de la información en el proceso de representación bidimensional de la matriz de tres criterios, con cuatro alternativas evaluadas, por lo que el 99,82% de la información fue considerada en este análisis.

Comprobación de la consistencia: Los criterios son consistentes si $CR < 0,1$. En el estudio de caso analizado, entre los tres criterios evaluados (métodos) existe total consistencia ya que se consideró su igualdad de importancia en el momento de evaluar las alternativas entre sí por lo que $CR = 0$. Esto no sucede de igual manera con la consistencia entre los subcriterios considerados. En la tabla 4 se pueden observar los valores de CR correspondiente a cada uno de ellos. Como se puede apreciar, según lo planteado por el método AHP, los subcriterios eficiencia exergética, índice de carga ambiental, índice de rendimiento emergético y el índice de sostenibilidad emergética, no serían consistentes. Pero de acuerdo con lo supuesto en esta investigación, esta no sería una correcta interpretación. En la investigación

se consideró que los valores asignados a los subcriterios en la comparación entre alternativas, no provienen de criterios de expertos, sino de la normalización de los resultados obtenidos en la aplicación de cada método. Entonces, la correcta interpretación de estos resultados es que estos cuatro subcriterios (indicadores evaluados por cada método) alcanzan valores muy superiores para la alternativa 4 que, al normalizarlos, hacen que predominen por encima de los demás sub-criterios, por lo que la inconsistencia es aparente. Este resultado reafirma que la alternativa 4 es la más viable para el manejo de la paja de arroz como residuo agrícola.

Tabla 4. Resultados de la consistencia de los sub-criterios.

Sub-criterio	CR
Calidad del ecosistema	0,057
Salud Humana	0,057
Recursos	0
Exergía en el producto	0,099
Eficiencia exergética	0,104
Índice de sostenibilidad exergética	0,047
Índice de carga ambiental	0,182
Índice de rendimiento emergético	0,134
Índice de sostenibilidad emergética	0,226

CONCLUSIONES

El método de proceso analítico jerárquico AHP, es una herramienta de análisis multicriterio que permite integrar los indicadores las herramientas de la economía ecológica, análisis de ciclo de vida, análisis exergético y análisis emergético.

El esquema energético (alternativa) más sostenible a largo plazo al integrar las herramientas de la economía ecológica es la 4, en ella se combinan la digestión anaerobia de la paja de arroz, el autoabastecimiento de energía eléctrica y térmica proveniente de la cogeneración vía biogás y el autoabastecimiento de una parte de combustible utilizado para la transportación de las diferentes materias en el proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alanya, S., Dewulf, J., & Duran, M. (2015). Comparison of Overall Resource Consumption of Biosolids Management System Processes Using Exergetic Life Cycle Assessment, 49(16), 9996-10006.

Arango, J. E., Sierra, F. E., & Silva, V. (2014) Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás. *Tecnura*, 8(39), 152-164.

Bravo Amarante, E., Kiran Schulz, R., Romero Romero, O., Gil Unday, Z., López Bastida, E., & Güereca Hernández, L. P. (2018b). Life cycle assessment of the valorization of rice straw for energy purposes. Rice production in Cuba. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 112(2), 297-320.

Bravo, E., Schulz, R.K., Clavo, A. E., López, E., Romero, O., Martínez, Y., & Guereca, L. P. (2019). Exergy analysis of the valorization of rice straw for energy purposes with a life cycle approach. Rice production in Cuba. *International Journal of Exergy*, 30(4).

Brown, M. T., Raugei, M., & Ulgiati, S. (2012). On boundaries and "investments" in Emergy Synthesis and LCA: A case study on thermal vs. photovoltaic electricity. *Ecological Indicators*, 15(1), 227-235.

Cano Londoño, N. A. (2012). Análisis mediante el método emergético de la disposición de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Aplicación a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá). (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia.

Dincer, I., Hussain, M. M., & Al-Zaharnah, I. (2005). Energy and exergy utilization in agricultural sector of Saudi Arabia. *Energy Policy*, 33(11), 1461-1467.

Fuzzi, S., et al. (2015). Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(14), 8217-8299.

Ishizaka, A., & Labib, A. (2009). Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations, 22(4).

Karagulian, F., Belis, C. A., Francisco, C., Dora, C., Prüss-ustün, A. M., Bonjour, S., & Amann, M. (2015). Contributions to cities ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 120, 475-483.

Lomas, P. L., Álvarez, S., Martín- López, B., Rodríguez, M., y Montes, C. (2004.). La síntesis emérgetica, integrando la energía, ecología y economía. Fundación Fernando González Bernáldez.

Mingxin, W., Xunfeng, X., Zhang, Q., & Liu, J. (2010) Life cycle assessment of a rice production system in Taihu region, China, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 17(2), 157-161,

- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what and how it is used. *Math Modelling*, *9*(3), 161–176.
- Shafie, S. M., Masjuki, H. H., y Mahlia, T. M. (2014). Life cycle assessment of rice straw-based power generation in Malaysia. *Energy*, *70*, 401–410.
- Wang, X., Dadouma, A., Chen, Y., Sui, P., Gao, W., y Jia, L. (2015). Sustainability evaluation of the large-scale pig farming system in North China: An emergy analysis based on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, *102*, 144–164.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de la matriz de comparación de las alternativas entre sí en función de cada criterio y sub-criterios.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Calidad del ecosistema				
Alternativa 1	1	0,2	0,2	0,2
Alternativa 2	5	1	1	0,333
Alternativa 3	5	1	1	0,333
Alternativa 4	5	3	3	1
Salud Humana				
Alternativa 1	1	0,333	0,333	0,142
Alternativa 2	3	1	1	0,142
Alternativa 3	3	1	1	0,142
Alternativa 4	7	7	7	1
Recursos				
Alternativa 1	1	1	1	1
Alternativa 2	1	1	1	1
Alternativa 3	1	1	1	1
Alternativa 4	1	1	1	1
Exergía en el producto				
Alternativa 1	1	0,142	0,166	0,166
Alternativa 2	7	1	3	3
Alternativa 3	6	0,333	1	0,333
Alternativa 4	6	0,333	3	1
Eficiencia exergética				
Alternativa 1	1	0,111	0,111	0,1
Alternativa 2	9	1	3	0,333
Alternativa 3	9	0,333	1	0,333
Alternativa 4	10	3	3	1
Índice de sostenibilidad exergética				
Alternativa 1	1	0,111	0,111	0,1
Alternativa 2	9	1	1	0,333
Alternativa 3	9	1	1	0,333
Alternativa 4	10	3	3	1
Índice de carga ambiental				
Alternativa 1	1	0,142	0,142	0,111
Alternativa 2	7	1	0,25	0,2
Alternativa 3	7	4	1	0,2
Alternativa 4	9	5	5	1
Índice de inversión emergética				
Alternativa 1	1	0,2	0,2	0,142
Alternativa 2	5	1	0,333	0,2

Alternativa 3	5	3	1	0.2
Alternativa 4	7	5	5	1
Índice de sostenibilidad emergética				
Alternativa 1	1	0,111	0,111	0,1
Alternativa 2	9	1	0,333	0,142
Alternativa 3	9	3	1	0.142
Alternativa 4	10	7	7	1