

07

Fecha de presentación: septiembre, 2019

Fecha de aceptación: noviembre, 2019

Fecha de publicación: enero, 2020

EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD PARA LA BIOMASA CAÑERA A PARTIR DEL METODO AHP

EVALUATION OF SUSTAINABILITY FOR THE SUGARCANE BIOMASS FROM THE AHP METHOD

Reinier Jiménez Borges¹

E-mail: rjborges@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6451-8499>

Eduardo Julio López Bastida¹

E-mail: kuten@ucf.edu.cu

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

Edelvy Bravo Amarante²

E-mail: edelvys@uniss.edu.cu

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

Andrés Lorenzo Álvarez González¹

E-mail: alvarez58216055@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3302-1540>

María Teresa Hernández Nodarse³

E-mail: amariateresahernandeznodarse036@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7449-749X>

¹ Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez" Cuba.

² Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez" Cuba.

³ Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Jiménez Borges, R., López Bastida, E. J., Bravo Amarante, E., Andrés Lorenzo, A. G., & Hernández Nodarse, M. T. (2020). Evaluación de la sostenibilidad para la biomasa cañera a partir del método ahp. *Universidad y Sociedad*, 12(1), 73-79.

RESUMEN

Esta investigación se centra en demostrar el uso del proceso de jerarquía analítica (AHP) y la técnica MCDA para abordar el problema que existe en nuestro país de la no existencia de metodologías actuales que incorporen indicadores de economía ecológica para la evaluación de la sostenibilidad en el aprovechamiento de la biomasa cañera. Los juicios emitidos sobre las comparaciones por pares para la combustión de las fuentes de biomasa estudiadas con respecto a cada criterio y sub-criterio. Los resultados obtenidos del análisis AHP muestran que los criterios de energía y exergía son considerados como los factores más importantes para la evaluación de la sostenibilidad de la biomasa, con un PVE de 0,539 y 0,297 respectivamente, seguido del análisis energético (PVE = 0,164). Basado en estos criterios de preferencias para la evaluación del potencial de aprovechamiento de la biomasa cañera, se puede constatar que la alternativa más adecuada para la conversión de biomasa en energía es la combustión de bagazo, seguido de la combustión de bagazo-Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC).

Palabras clave:

Análisis de decisión multicriterio, bagazo, proceso de jerarquía analítica, Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC).

ABSTRACT

This research focuses on demonstrating the use of the process of analytical hierarchy (AHP) and the MCDA technique to address the problem that exists in our country of the non-existence of current methodologies that incorporate ecological economy indicators for the evaluation of sustainability in the Harnessing the cane biomass. The judgments issued on the pairwise comparisons for the combustion of the biomass sources studied with respect to each criterion and sub-criterion. The results obtained from the AHP analysis show that the emergence and exergy criteria are considered as the most important factors for the evaluation of biomass sustainability, with a PVE of 0.539 and 0.297 respectively, followed by the energy analysis (PVE = 0.164). Based on these preference criteria for the evaluation of the potential of sugarcane biomass, it can be verified that the most suitable alternative for the conversion of biomass into energy is the combustion of bagasse, followed by the combustion of bagasse-AHR.

Keywords:

Multicriteria decision analysis, bagasse, analytical hierarchy process, Agricultural Harvest Residues (AHR).

INTRODUCCIÓN

La bioenergía posee un importante aporte al suministro de energía primaria siendo el mayor participante en la oferta mundial con respecto a otras fuentes renovables, para el 2015 la biomasa aportaba el 14,1% en el consumo final de energía, evidenciando desde el año 2010 un crecimiento del 2% anual en la generación eléctrica (Douglas, 2018). La selección de la tecnología para la conversión de la biomasa en energía es una decisión compleja e involucra muchos factores, como la calidad y la cantidad de biomasa, factores sociales, medioambientales, tecnológicos y económicos (Qazi, Abushammala & Azam, 2018). Por esto, el modelado de políticas energéticas necesita de una consideración explícita de múltiples objetivos en los que se puedan conocer adecuadamente las partes interesadas y los criterios sostenibles (Michailos, Parker & Webb, 2016); tradicionalmente la planificación energética en Cuba es desarrollada más bien sobre la base de criterios puntuales que sobre la evaluación científica meditada de múltiples criterios, por lo que eventualmente fracasan en términos de sostenibilidad y aceptación. Dentro de este marco las técnicas para la toma de decisiones multicriterios (MCDA en inglés) están ganando popularidad en el desarrollo y gestión de la energía sostenible. Dichas técnicas proporcionan soluciones a los problemas que involucran conflictos y múltiples objetivos (Pohekar & Ramachandran, 2004). Estos métodos basados en promedios ponderados, prioridades, clasificación externa, principios difusos y sus combinaciones se emplean para las decisiones de planificación energética (Cristóbal, 2010). Los métodos MCDA comúnmente aplicados a los proyectos de energía renovable son la optimización multi-objetivo, AHP, PROMETHEE, ELECTRE, TOPSIS, VIKOR, MAUT, métodos difusos y los sistemas de apoyo a la decisión (DSS). La literatura cuenta con numerosos estudios relacionados con la evaluación de la sostenibilidad de la biomasa y su utilización con fines energéticos. Puig (2018), presenta una metodología basada en costes físicos o energéticos que permite la evaluación desde el punto de vista energético, exergético y emergético de la biomasa cañera. Por su parte, Qazi, et al. (2018), en sus iniciativas por mejorar el sistema de gestión de residuos en Omán proponen una tecnología óptima para la conversión de residuos en energía, utilizando un proceso de jerarquía analítica (AHP). Michailos, et al. (2016), realizan un estudio basado en la evaluación consistente y comparativa de la exergía total, eficiencia ambiental y financiera de dos tecnologías para la conversión de biomasa en combustibles, dicha investigación concluye con un análisis de decisión multicriterio (MCDA) que permite la posibilidad de comparar sobre la misma base los procedimientos investigados. Enze & Sutherland (2018),

desarrollan un modelo de sostenibilidad integrado utilizando métodos dinámicos para sistemas bioenergéticos, con el fin de entender los cambios que conducirían en el sistema bioenergético la influencia de medidas ambientales, el desarrollo económico y los impactos sociales. Kaya & Kahraman (2010), utilizan una metodología integrada VIKOR-AHP para determinar la mejor alternativa de energía renovable para Estambul. El objetivo de este estudio es emplear el método AHP como MCDA para evaluar la sostenibilidad en el aprovechamiento de la biomasa cañera en la provincia de Cienfuegos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La comunidad científica internacional declaró la metodología AHP como una herramienta robusta y flexible de toma de decisiones multicriterio para tratar problemas complejos de decisión (Qazi, et al., 2018). La técnica AHP rompe el complicado problema de decisión de una manera lógica, en pequeños pero relacionados sub-problemas, en una estructura jerárquica de varios niveles. Este método permite a los responsables de la toma de decisiones realizar comparaciones por pares para obtener una importancia relativa de la variable en cada nivel de la jerarquía y/o evalúa las alternativas en el nivel más bajo de la jerarquía para poder tomar la mejor decisión entre todas las alternativas (Pohekar & Ramachandran, 2004). El método AHP puede involucrar discusiones grupales y modificaciones para finalmente lograr un acuerdo. Además, este método elimina juicios inconsistentes realizando una verificación de consistencia. La técnica AHP es el método más popular de MCDA y ha sido ampliamente adoptado para la evaluación y selección de tecnologías en el sector de las energías renovables. La siguiente estructura fue desarrollada por Saaty para la aplicación del AHP (Babalola, 2015; Sindhu, Nehru, & Luthra, 2016) y se han seguido en esta investigación.

- Definir objetivo.
- Evaluar el potencial de aprovechamiento sostenible de la biomasa cañera a partir de análisis energéticos, exergéticos y emergéticos a través del método AHP.
- Construir estructura de jerarquía.
- Estructurar el problema bajo la consideración de una jerarquía, que desglosa el objetivo, los criterios, los sub-criterios y las alternativas del problema en varios niveles.
- Hacer comparaciones por pares para generar matrices.

Después de la formación de la jerarquía, la comparación por pares entre los criterios con respecto a la meta, entre los sub-criterios con respecto al criterio relativo y entre las

alternativas con respecto a todos los sub-criterios fueron formulados, lo que conduce a la formación de matrices de juicio.

Los juicios se basan en una comparación estandarizada de la escala de nueve niveles Saaty, que figura en la Tabla 1 (Qazi, et al., 2018). Además, para determinar las prioridades de las alternativas, se ha utilizado la metodología AHP para resolver las matrices de juicio. El vector de prioridad local (PVE o w) para los juicios matriciales se obtiene normalizando los vectores en cada columna de la matriz, y luego calculando el promedio de las filas de la matriz resultante. Sin embargo, las prioridades globales para cada alternativa se determinan sintetizando las prioridades locales sobre la jerarquía.

Tabla 1. Escala de nueve puntos Saaty para la comparación por pares.

| Valoración numérica | Juicios verbales de preferencias entre alternativas i y alternativas j |
|---------------------|--|
| 1 | i es igualmente importante a j |
| 3 | i es ligeramente más importante que j |
| 5 | i es fuertemente más importante que j |
| 7 | i es rotundamente más importante que j |
| 9 | i es extremadamente más importante que j |
| 2,4,6,8 | Valores intermedios |

Fuente: Qazi, et al., (2018).

Control de consistencia

Esto garantiza que los juicios de comparación por pares sean lo suficientemente consistentes al calcular la relación de consistencia (CR). La ecuación 1 permite determinar

el principio de valor propio ($\lambda_{m\acute{a}x}$) para cada matriz en función del vector propio correctamente normalizado.

$$Aw = \lambda_{m\acute{a}x} w \quad Aw = \lambda_{m\acute{a}x} w$$

Ecuación 1

Donde A es la matriz de comparación, $\lambda_{m\acute{a}x}$ es el principio del valor propio y w es el vector propio correctamente normalizado (vector de prioridad).

A partir de la ecuación 2 se puede estimar el índice de consistencia (CI) para cada matriz con la dimensión "n".

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Ecuación 2

Finalmente se calcula el CR empleando la ecuación 3:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad CR = \frac{CI}{RI}$$

Ecuación 3

Donde RI es el índice aleatorio. El valor de RI se selecciona según la dimensión de la matriz de comparación (n). La Tabla 2 ilustra los diferentes valores de RI para matrices que tienen un orden n de 1 a 10. El límite aceptable de los valores de CR depende del tamaño de la matriz, por ejemplo, el valor de CR aceptable para la matriz de 3x3 es 0.05, la matriz de 4x4 es 0.08 y para matrices que tienen un tamaño $\geq 5 \times 5$ es 0.1 (Sindhu, et al., 2016).

Tabla 2. Valores de índice aleatorio (RI) para diferentes tamaños de matrices.

| Tamaño de la matriz (n) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------------|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| Índice aleatorio | 0 | 0 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 |

Fuente: Qazi, et al., (2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo del modelo AHP

Para aplicar la técnica AHP, se hace necesario establecer un sistema de asesoramiento de expertos para identificar/modificar la relevancia entre los criterios a estudiar y los factores que afectan su selección. Dicho proceso de consulta debe incluir diferentes sectores, incluyendo departamentos de decisión, industrias e institutos de investigación, además de formarse sobre la base de los antecedentes en el conocimiento del problema. Para el

caso de este estudio en particular, aunque no se cuenta con la diversidad de expertos deseada, si se dispone de la opinión del personal encargado de la realización de la metodología de costes físicos o energéticos desarrollada por Puig (2018), además de una gran variedad de estudios relacionados con el tema.

Según el método AHP; las alternativas modificadas, los sub-criterios y los criterios se distribuyen en una estructura jerárquica multinivel, como se muestra en la Figura 1.

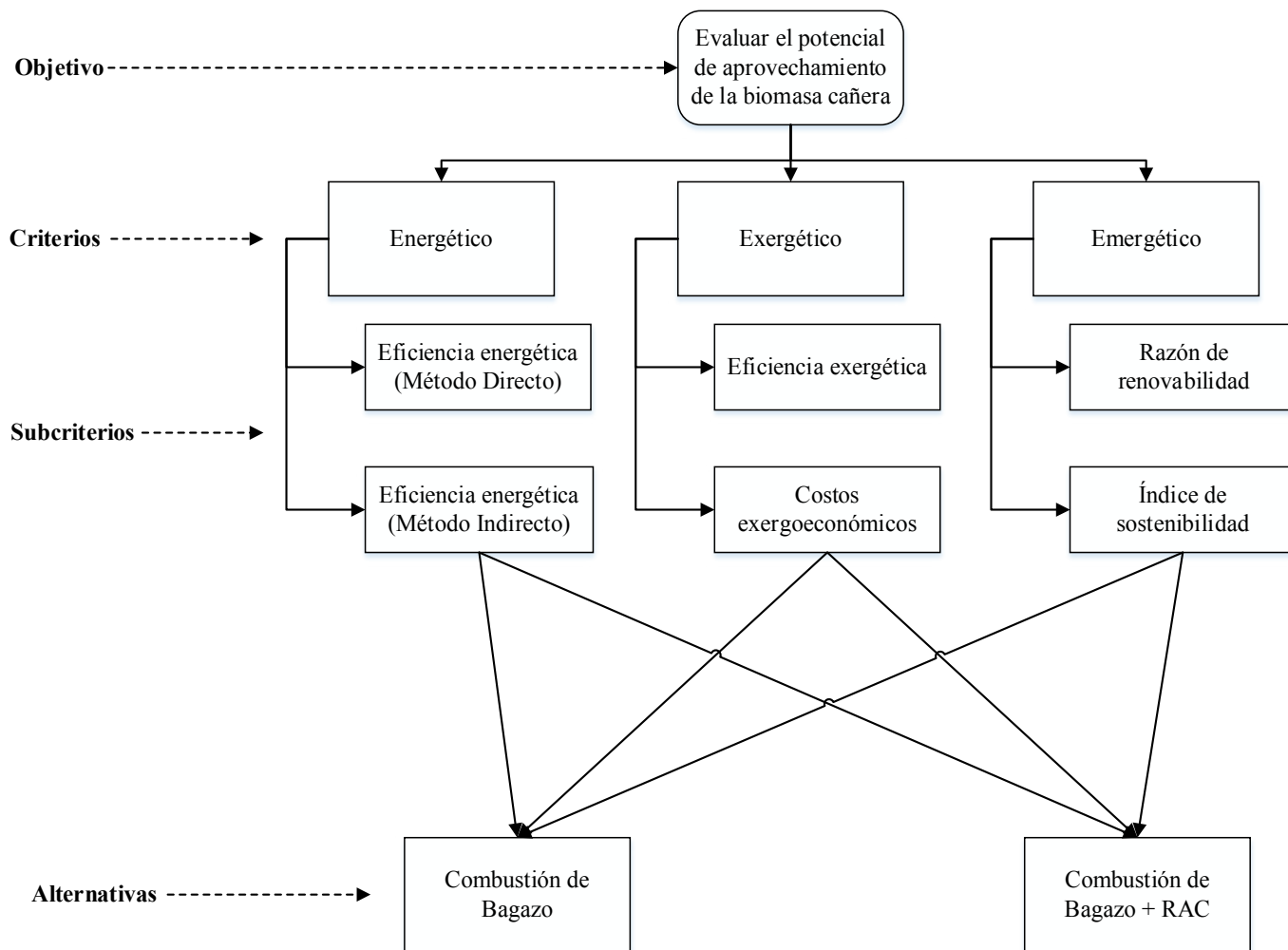


Figura 1. Estructura jerárquica.

La jerarquía se organiza de tal manera que los factores principales se dividen en sub-factores con alternativas en la parte inferior de la jerarquía (Figura 1). En el modelo, los factores son considerados como un grupo. Por lo tanto, el grupo principal comprende los criterios principales de balance energético (En), exergético (Ex) y emergético (Em); el segundo grupo está formado por nodos secundarios de los criterios principales, que incluyen la determinación de la eficiencia energética por el método directo (En1) y por el método indirecto (En2), la eficiencia exergética (Ex1), los costos exergoeconómicos (Ex2), la razón de renovabilidad (Em1), y el índice de sostenibilidad (Em2). Las alternativas incluyen la combustión de bagazo y la combustión de bagazo – RAC ¹ en un gene-

rador de vapor del tipo RETAL. Los principales criterios y sub-criterios están relacionados con las alternativas, que es su impacto en los criterios. Este modelo genera una retroalimentación o interdependencia.

Aplicación del AHP

La matriz (Tabla 3) se dispuso en base a los factores identificados del balance energético, exergético y emergético desarrollados por Puig (2018), y la calificación numérica para la comparación de cada elemento se asignó de la escala de nueve puntos de Saaty (Tabla 1).

En la matriz 3x3, mostrada en la Tabla 3, se ingresan los valores de los criterios respectivos. El valor de 1 se asigna a partir de la escala de nueve puntos cuando el criterio se

¹ La tecnología de aprovechamiento energético para evaluar las biomásas seleccionadas la constituyen los generadores de vapor tipo RETAL,

que son los de mayor presencia en los centrales de nuestro país para la combustión de bagazo.

compara consigo mismo, lo que hace que todos los elementos diagonales de la matriz sean 1. Por el contrario, si un criterio se compara con otros criterios en la matriz, un valor diferente a 1 se asigna de la escala de Saaty. Los recíprocos de las entradas sobre la diagonal de la matriz, se consideran las entradas de los elementos debajo de la diagonal. Por lo tanto, los juicios solo para los elementos arriba de la diagonal de la matriz deben ser solicitados. La Tabla 3 indica que el juicio 2 ingresado en la segunda fila de la primera columna expresa que los criterios exergéticos se consideran ligeramente más importantes que los criterios energéticos. Mientras tanto, en la columna de vectores de prioridad, los criterios emergéticos se clasifican en la parte superior de los juicios, lo que muestra una

mayor preocupación por la sostenibilidad (razón de renovabilidad e índice de sostenibilidad) en el aprovechamiento de estas biomásas. Del mismo modo se considera relevante el análisis exergético y los criterios energéticos, ya que influyeron en las prioridades. Para generar el vector de prioridad local (PVE) o el vector propio correctamente normalizado para los juicios de matriz en la Tabla 3, se normalizan los vectores en cada columna de la matriz (dividiendo cada elemento de la columna por el total de la columna) y luego el promedio de las filas de la matriz resultante se calcula como se muestra en la Tabla 4. Por lo tanto, los vectores de prioridad local resultantes se pueden dar como: (0,164, 0,297, 0,539).

Tabla 3. Comparación matricial por pares de los criterios con respecto a la meta.

| Criterio | Energético | Exergético | Energético | Vector de prioridad (PVE) |
|------------|------------|------------|------------|---------------------------|
| Energético | 1 | 1/2 | 1/3 | 0,164 |
| Exergético | 2 | 1 | 1/2 | 0,297 |
| Energético | 3 | 2 | 1 | 0,539 |

Tabla 4. Computación del vector de prioridad local.

| Criterio | Energético | Exergético | Energético | Vector de prioridad (PVE) |
|------------|------------|------------|------------|---------------------------|
| Energético | 0,1667 | 0,1429 | 0,1818 | 0,164 |
| Exergético | 0,3333 | 0,2857 | 0,2727 | 0,297 |
| Energético | 0,5000 | 0,5714 | 0,5455 | 0,539 |

Para realizar una verificación de consistencia de los juicios, primeramente, fue determinado el principio de valor propio ($\lambda_{\text{máx}}$) despejándose a partir de la ecuación 1

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,164 \\ 0,297 \\ 0,539 \end{bmatrix} = \lambda_{\text{máx}} \begin{bmatrix} 0,164 \\ 0,297 \\ 0,539 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0,492 \\ 0,894 \\ 1,625 \end{bmatrix} = \lambda_{\text{máx}} \begin{bmatrix} 0,164 \\ 0,297 \\ 0,539 \end{bmatrix}$$

Ecuación 1

El valor de ($\lambda_{\text{máx}}$) promedio se obtiene resolviendo la matriz dada anteriormente, ($\lambda_{\text{máx}}$) promedio = 3,009. Por consiguiente, al utilizar la ecuación (2), el índice de consistencia (CI) se calcula como:

$$CI = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} = \frac{3,009 - 3}{3 - 1} = 0,0046$$

Ecuación 2

Por lo tanto, la relación de consistencia (CR) se determinó por la ecuación (3):

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,0046}{0,58} = 0,00794 \approx 0,008 < 0,05$$

Ecuación 3

El valor de RI es 0,58 y se seleccionó de la Tabla 2 para n = 3 (tamaño de matriz). Como el valor de CR (0,008) es menor que 0,05 (límite máximo permitido), los juicios en la matriz (Tabla 3) se consideran consistentes y lógicamente satisfactorios. Si el CR fuese superior a 0,05, entonces los juicios en la Tabla 3 serían inconsistentes y los tomadores de decisiones tendrían que modificar los juicios hasta que sean consistentes (Qazi, et al., 2018).

La siguiente evaluación implica la comparación para derivar los efectos del sub-factor en el factor primo. En la