

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
FACULTAD DE INGENIERÍA



TRABAJO DE DIPLOMA

en opción al título de Ingeniero Mecánico

Título: Herramientas de economía ecológica para la evaluación de la sostenibilidad de biomásas en la provincia de Cienfuegos

Autor: Domingos Mário Quende

Tutor (es): MSc Reinier Jiménez Borges

Dr.C Eduardo Julio López Bastida

Año 59 de la Revolución
Cienfuegos 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

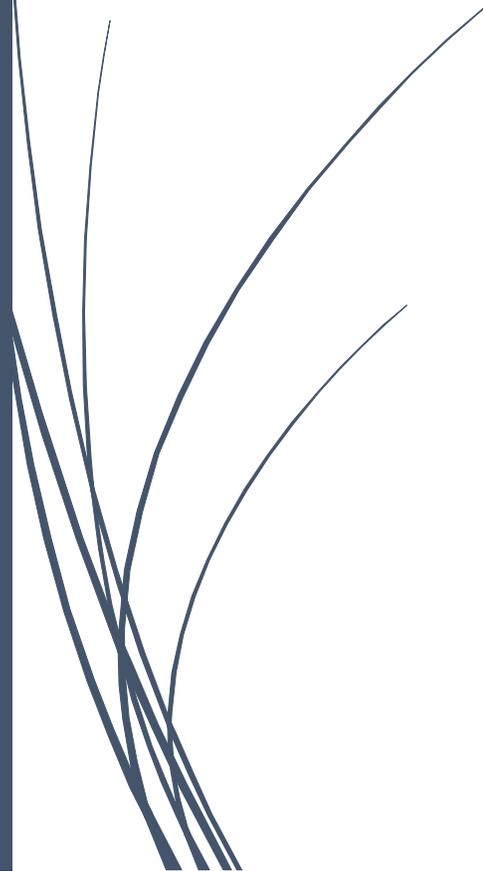
Firma del Vice Decano.

Firma del Tutor.

Nombre y Apellidos.

Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellido. Firma.

PENSAMIENTO



Pensamiento

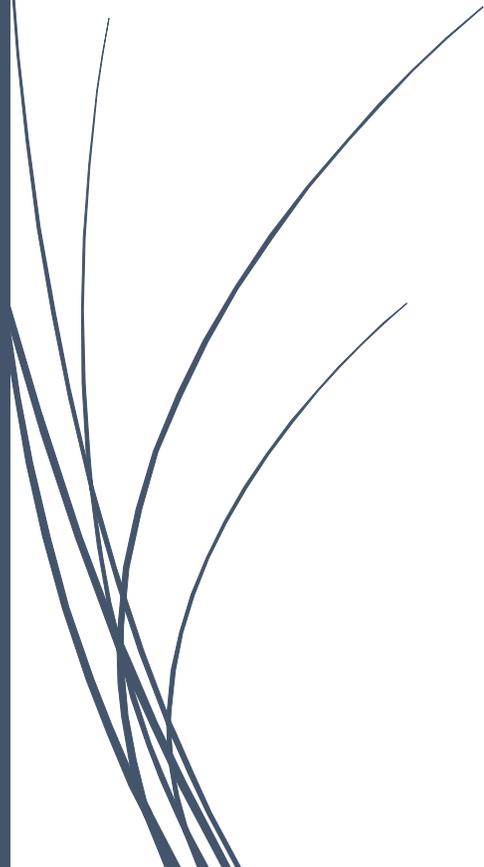
“No hay nada que nos evite el estrés del camino hacia nuestros sueños. No es una alfombra roja, sino un camino lleno de hoyos, piedras y lodo, pero sé que al final podremos lograr lo que tanto anhelamos, si soportamos lo suficiente y podemos decir:

¡Ha valido la pena!”

Edgar Martínez



AGRADECIMIENTOS



Agradecimientos

A mi madre y mi hermana, por apoyarme en mis decisiones, luchar conmigo en el transcurso de la carrera, ayuda determinante, valiosa e incondicional durante estos cinco años. En general a toda mi familia, que ha colaborado conmigo grandemente.

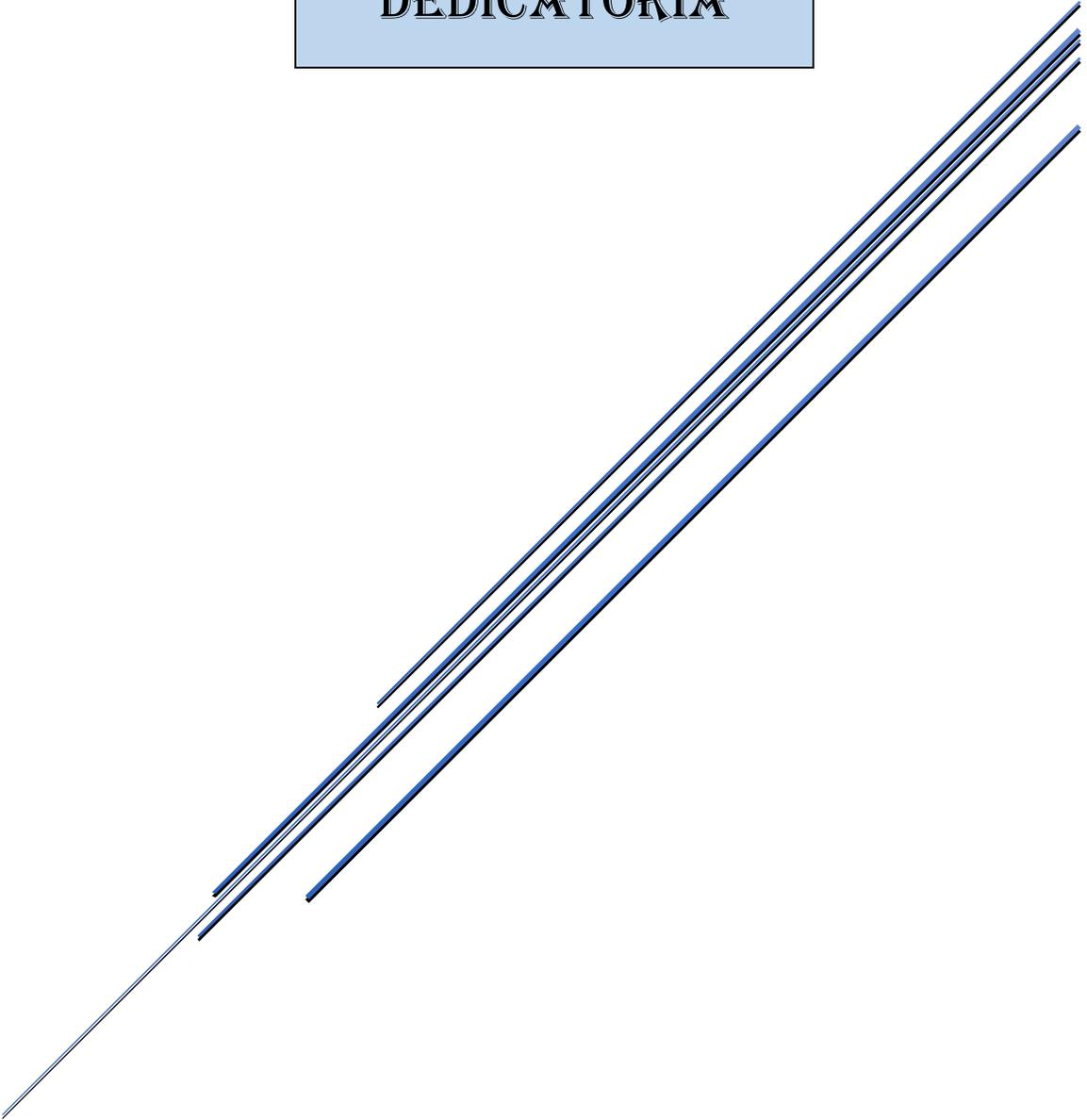
A mi grupo de estos cinco años; si no fuéramos tan unidos quizás hubiéramos sido menos los que llegaríamos al final de esta etapa tan hermosa.

A todos los profesores que han contribuido a mi formación como profesional y me han brindado sus conocimientos y sabiduría.

A mi tutor MSc Reinier Jiménez Borges que por haber confiado en mí y brindarme su apoyo incansable para que esta tarea llegara a su fin satisfactoriamente.

A todos los mencionados y a los que quizá olvidé MUCHAS GRACIAS.

DEDICATORIA



Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi familia, que fueron mi motivo de inspiración y siempre supieron encontrar una forma de ayudar en los momentos más difíciles, y a todos los que de una forma u otra hicieron lo posible para ayudarme.

Resumen

En el presente estudio se aplican algunas de las herramientas de la economía ecológica para evaluar la sustentabilidad de las principales biomásas de la provincia de Cienfuegos. Para ello fueron seleccionadas como principales biomásas el bagazo, cachaza, Residuos Agrícolas de Cosecha, Cascarilla de arroz y residuos forestales. Se determinaron las cantidades disponibles a partir del levantamiento en cada unidad productora (Empresa Azucarera Cienfuegos, UEB Procesadora de Arroz "La Paquita" en Aguada, Grupo Agroforestal "GAF" de Cienfuegos) para con ello, estimar la energía total para cada fuente de biomasa. Por otro lado, se elaboró una metodología que incluyera la determinación de indicadores de economía ecológica como la reducción de CO₂ a la atmósfera y la huella ecológica. Finalmente, con estos resultados se aplicó el método de jerarquía analítica (AHP) para poder evaluar la sustentabilidad de las alternativas propuestas, así como un análisis de sensibilidad como complemento del método.

Palabras Claves: Economía ecológica, indicadores, sustentabilidad, Método de Jerarquía Analítica, Huella ecológica.

Abstract

In the present study some of the tools of the ecological economy are applied to evaluate the sustainability of the main biomasses of the province of Cienfuegos. For this, bagasse, filter-cake, Harvest Agricultural Residues, rice husk and forest residues were selected as the main biomass. The available quantities were determined from the survey in each production unit (Cienfuegos Sugar Company, UEB Rice Processor "La Paquita" in Aguada, Agroforestry Group "GAF" in Cienfuegos) to estimate the total energy for each biomass source. On the other hand, a methodology was developed that included the determination of ecological economy indicators such as the reduction of CO₂ to the atmosphere and the ecological footprint. Finally, with these results the method of analytical hierarchy (AHP) was applied to evaluate the sustainability of the proposed alternatives, as well as a sensitivity analysis as a complement to the method.

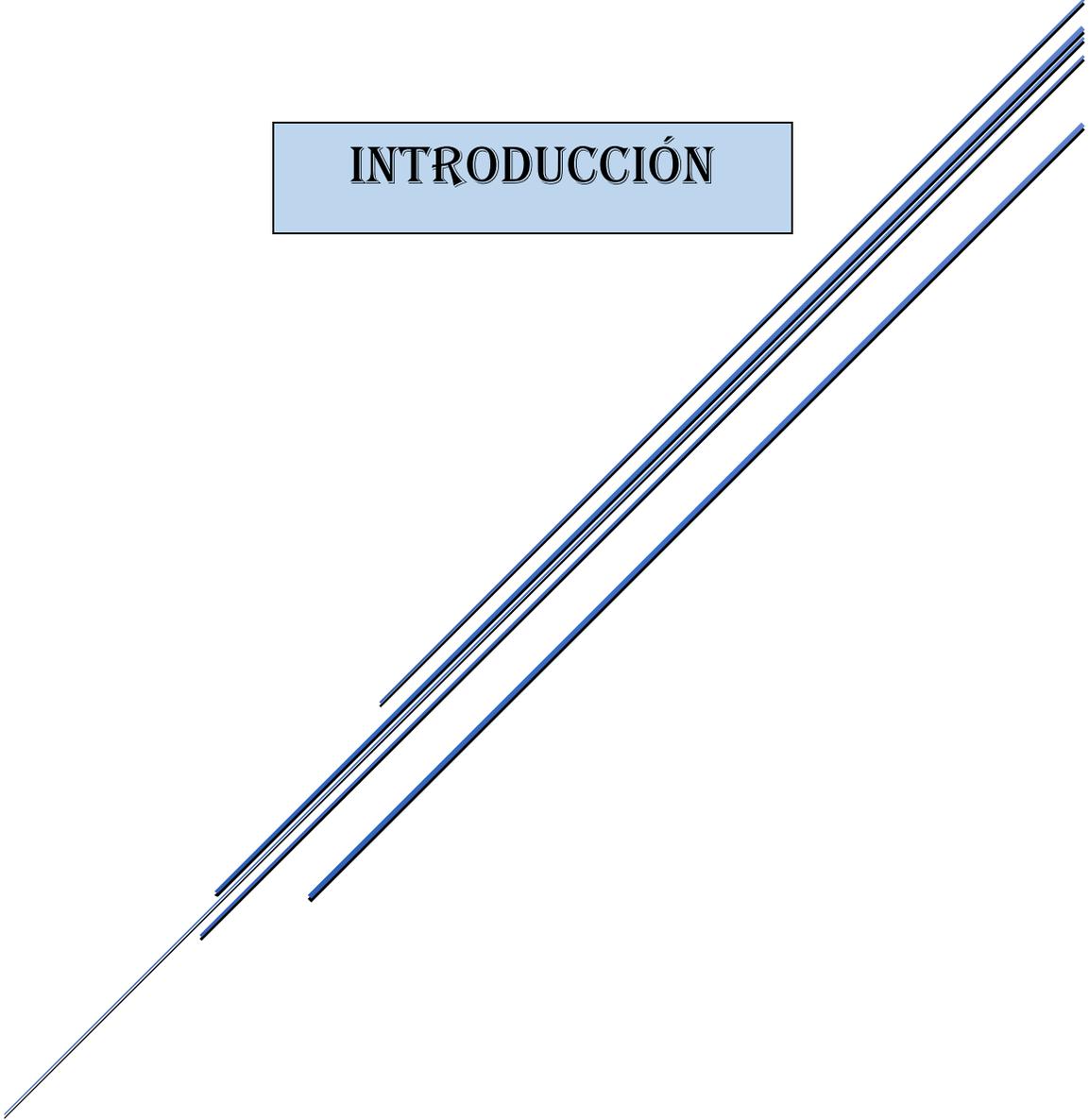
Keywords: Ecological economy, indicators, sustainability, Analytical Hierarchy Method, Ecological Footprint.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
<u>Capítulo I: Estado del aprovechamiento de las biomásas en el mundo y en Cuba.</u>	
<u>Herramientas de economía ecológica.</u>	
I.1 Introducción al capítulo	7
I.2 Perspectiva mundial y nacional de los recursos renovables.....	7
I.3 Biomasa. Clasificación y procesos de transformación.....	9
I.3.1 Clasificación de la biomasa de acuerdo su origen.....	9
I.4 Procesos de transformación de la biomasa.....	10
I.5 Tecnologías de conversión de biomasa en calor o electricidad a nivel mundial.	11
I.5.1 Conversión Termoquímica	12
I.5.2 Conversión mecánica (Construcción de pellet.)	14
I.5.3 Conversión biológica.....	15
I.6.3 Residuos de la cosecha	18
I.8 Biomasa de los residuos aserraderos	20
I.9 Usos de la biomasa	21
I.9.1 Aplicaciones térmicas	21
I.9.2 Aplicaciones eléctricas.....	21
I.10 Usos de las fuentes de biomasa en Cuba	22
I.10.1 Uso del Bagazo en Cuba	22
I.10.2 Uso de la Cachaza en Cuba	23
I.11 Economía Ecológica	23
I.12 Las principales características de la economía ecológica.	24
I.13 Indicadores de Economía Ecológica.	25
I.13.1 Huella Ecológica	25
I.13.2 Ciclo de vida	26
I.13.3 Análisis del ciclo de vida (Herramienta para un desarrollo sostenible).	26
I.13.4 Huella Ecológica Corporativa	27
Conclusiones parciales	27
Capítulo II: Levantamiento del potencial de las diferentes biomásas en la Provincia de Cienfuegos. Metodología para la evaluación con enfoque de economía ecológica	29
II.1 Introducción al capítulo	29
II.2 Estimación de las cantidades de biomásas existentes.....	29
II.3 Potencial de Biomasa Residual.....	32

II.3.1 Bagazo	32
II.3.2 Cachaza.....	34
II.3.3 Residuos de la cosecha.	36
II.4 Potencial de biomasa arroceras.....	38
II.4.1 Cantidad de arroz molinado en las últimas tres cosechas.	40
II.4.2 Producción de cascarilla de arroz, en las últimas tres cosechas.	40
II.5 Potencial de los residuos aserraderos	41
II.6 Metodología con enfoque de Economía Ecológica para evaluar la sostenibilidad de biomasa.	43
II.7 Calculo de Huella Ecológica	45
II.8 Análisis multivariado a través del método AHP	46
II.9 Base Matemática del AHP	47
II.10 Esquema Metodológico del AHP.....	48
Conclusiones parciales	50
Capítulo III: Evaluación de la sostenibilidad integral de las biomasa con enfoque de Economía Ecológica.....	52
III.1 Introducción al capítulo	52
III.2 Potencial energético de la biomasa cañera.....	52
III.3 Resultados del potencial energético para las fuentes de biomasa.	53
III.4 Determinación de la huella ecológica de las distintas fuentes de biomasa.	54
III.5 Desarrollo del modelo AHP.....	56
III.6 Aplicación del AHP	57
Conclusiones parciales	65
CONCLUSIONES GENERALES	67
RECOMENDACIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	72
ANEXOS	75

INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

Durante los últimos veinte años se han desarrollado tecnologías que hacen posible dar saltos importantes en la eficiencia, basados en combustibles renovables como el bagazo y la paja de caña. Hoy existen instalaciones capaces de elevar la eficiencia de un 10 a 15 % más; al mismo tiempo se desarrollan otras tecnologías más avanzadas, como las turbinas de gas integradas con gasificadores de biomasa, que podrían entonces elevar los valores entre un 20 y 30 %.

Esos avances tecnológicos hacen competitiva la generación de electricidad a partir de biomasa, si se compara con la obtenida a partir de combustibles fósiles. La combustión de la biomasa tiene además una ventaja ambiental, ya que no incrementa la concentración atmosférica de carbono, porque solo devuelve a la atmósfera el carbono que fijó la planta durante su crecimiento. (Giuntoli, 2016)

En Cuba la principal fuente de energía renovable es la biomasa, ya que no existen grandes ríos, ni zonas con altas velocidades del viento. Si bien el mayor potencial energético lo tiene la biomasa cañera, existen otras fuentes que tienen importancia en el orden local o que su aprovechamiento resulta conveniente desde el punto de vista medio ambiental. Cuba como país insular, constituye la primera prioridad en los lineamientos actuales de la política económica y social del país, de ahí que la energía sea un eje transversal en este propósito. Según Guerra (2016) actualmente es baja la utilización de las fuentes renovables de energía, pues con ellas solo se produce el 4,3% de la electricidad del país donde la biomasa alcanza el 3,5%. La provincia de Cienfuegos está localizada en la zona central de Cuba y ocupa 4 178 km² (417 800 ha). Esta presenta una economía variada basada fundamentalmente en la agricultura, industria y el turismo (Sagastume y col., 2016). En Cuba, la Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI) ofrece estadística generalizada de la situación de las biomásas a nivel provincial, aunque no de forma específica, por consiguiente, tampoco se conoce el potencial energético que puede aportar cada una de ella. Es imprescindible entonces contar con un levantamiento certero de la disponibilidad actual de las biomásas a partir de cada unidad productora. En este estudio las biomásas a considerar fueron las de la industria azucarera, arroceras, y los residuos agroforestales a partir de los

datos aportados por el grupo AZCUBA, la empresa de granos "La Paquita" del municipio Aguada, y el Grupo Agroforestal (GAF) de Cienfuegos. Se seleccionaron estas biomásas en particular debido a su mayor presencia en la provincia. Por otro lado, los estudios actuales se centran en determinar los aportes energéticos mientras que otros determinan indicadores medioambientales como las reducciones de CO₂ de allí que se hace evidente los insuficientes estudios sobre herramientas o indicadores de economía ecológica (Huella Ecológica, Análisis de Ciclo de Vida (ACV), etc, Análisis Multicriterios para la toma de decisiones (MDMC)) que permitan evaluar la sostenibilidad de la biomasa a partir de un marco integral de aprovechamiento. A partir de esto se propone para este estudio como problema científico:

Problema científico: Hasta el momento no se han aplicado indicadores de economía ecológica para la evaluación de la sostenibilidad de biomásas en la provincia de Cienfuegos

Hipótesis: Es posible mediante la incorporación de indicadores de economía ecológica poder evaluar el aprovechamiento sostenible de las principales biomásas en la provincia de Cienfuegos.

Objetivo general: Evaluar la sostenibilidad integral de diferentes biomásas en la provincia de Cienfuegos a partir de indicadores de economía ecológica.

Objetivos específicos:

1. Evaluar críticamente el estado del aprovechamiento de las biomásas en el mundo y en Cuba y sus principales tecnologías. Herramientas de economía ecológica.
2. Realizar el levantamiento de las principales biomásas que existen en el territorio a partir de unidades productoras.
3. Establecer los métodos o indicadores de economía ecológica para la evaluación de la sostenibilidad integral de las biomásas levantadas.

4. Evaluarlos indicadores propuestos para las diferentes biomásas en estudio.

Estructura de la Tesis

La tesis está estructurada en: Introducción, 3 capítulos, Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y Anexos

Capítulo I: Estado del aprovechamiento de las biomásas en el mundo y en Cuba. Herramientas de economía ecológica.

En este capítulo se presentan el estado de aprovechamiento de las fuentes renovables de energía en particular la biomasa a través de las perspectivas que esta tiene tanto a nivel internacional como nacional. Se define el concepto de biomasa, así como los procesos de transformación y tecnologías de conversión. Se analizan cuáles son las principales fuentes de biomásas provenientes de las industrias (arrocera, azucarera, agroforestal) y los usos que se le dan actualmente a estas en el territorio fundamentalmente. Por último, se introducen de manera general los indicadores de economía ecológica que permiten la evaluación de estas fuentes de biomásas.

Capítulo II: Levantamiento de las biomásas existentes. Métodos de economía ecológica para la evaluación de la sostenibilidad

En este capítulo se determinan las cantidades de biomásas disponibles en el territorio a partir de cada unidad productora. Las biomásas seleccionadas fueron el Bagazo, la cachaza, RAC, cascarilla de arroz y residuos agroforestales. Partiendo de esto se propone una metodología con enfoque de economía ecológica para el análisis integral de aprovechamiento de estas biomásas. La misma incorpora indicadores como la huella ecológica, reducción de CO₂ y MDMC a los tradicionales como la energía disponible entre otros.

Capítulo III: Evaluación de la sostenibilidad integral de las biomásas con enfoque de Economía Ecológica

En este capítulo se evalúa el potencial energético para cada una de las fuentes de biomásas. Se determina la energía total, la reducción de CO₂ a la atmósfera y la huella ecológica. Se aplica el método AHP en la evaluación de la sustentabilidad

para las alternativas consideradas así como su complemento mediante un análisis de sensibilidad.

Capítulo I: Estado del aprovechamiento de las biomásas en el mundo y en Cuba. Herramientas de economía ecológica.



Capítulo I: Estado del aprovechamiento de las biomásas en el mundo y en Cuba. Herramientas de economía ecológica.

I.1 Introducción al capítulo

En el presente capítulo se abordará sobre la perspectiva mundial y nacional de los recursos renovables de energía en particular la biomasa. Además, se presenta el proceso de transformación de la biomasa, así como las tecnologías de conversión para estas. Se describen las potencialidades que cuentan las industrias azucareras, arroceras y agroforestal de mayor presencia en la provincia. Asimismo, se reflejan los usos de las biomásas a nivel nacional y finalmente se describen las herramientas de economía ecológica que permiten evaluar la sostenibilidad

I.2 Perspectiva mundial y nacional de los recursos renovables.

Los últimos años han sido notables para la energía renovable, pues representan las mayores incorporaciones en la capacidad mundial vistas hasta la fecha, sin embargo, los desafíos persisten, sobre todo más allá del sector eléctrico. Se han evidenciado varios avances que influyeron en el incremento en la energía renovable, incluyendo una disminución en la utilización de los combustibles fósiles a nivel mundial y un aumento significativo de los sistemas de acumulación de energía (Sawin, 2016). Dentro de este marco las energías renovables han venido tomando fuerza desde hace varios años y en estos momentos se han establecido como fuentes importantes de energía alrededor del mundo en correspondencia con el creciente agotamiento de las fuentes convencionales. Prueba de ello es que dichas fuentes participaron en cerca de un 30% (**Figura I.1**) de la capacidad mundial de generación de electricidad, suficientes para suplir un 24,5% de la demanda eléctrica mundial a finales del año 2016.

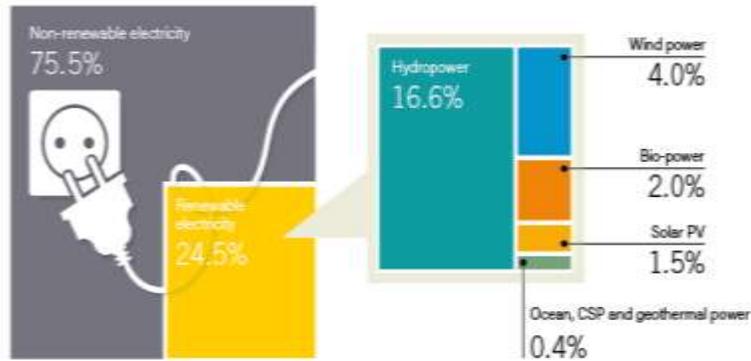


Figura I.1 Cuota de energía renovable estimada en la producción mundial de electricidad, finales-2016. **Fuente**(Douglas, 2018)

La biomasa constituye algo más del 96 % de la energía renovable total en Cuba, y continuará dominando en el futuro, debido a las grandes cantidades de residuos de las industrias de agroforestales como las del azúcar, la madera, el café, el arroz y otras fuentes como las leñas, el biogás y las plantaciones de oleaginosas no comestibles. La **figura 2** presenta la proyección para Cuba trazada y sustentada por los lineamientos de la política económico-social para el 2030 en materia de energía renovables. La biomasa en particular prevé un crecimiento del 3,5 % actualmente a un 14 % como proyección.

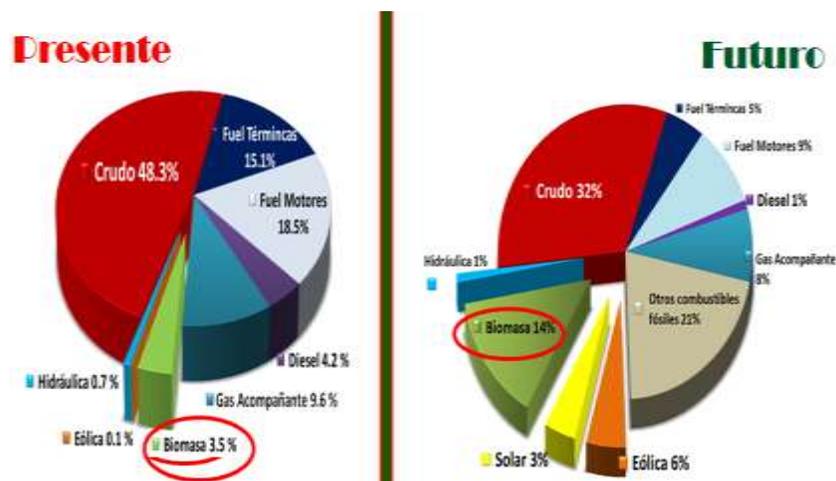


Figura I.2 Generación con fuentes renovables de energía para Cuba. **Fuente**:(Hernández, 2018).

I.3 Biomasa. Clasificación y procesos de transformación.

La biomasa de manera general se puede entender como toda materia orgánica que tiene su origen en un proceso biológico. A partir de la luz solar, la formación de biomasa vegetal, conocida como fitomasa, se lleva a cabo mediante el proceso de fotosíntesis gracias al que se producen moléculas de alto contenido energético bajo la forma de energía química. La biomasa también se refiere a los procesos de reciente transformación de la materia orgánica, tanto si se producen de forma natural como artificial. El hecho de que se trate de una transformación reciente, excluye de este grupo a los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo o el gas natural, cuya formación tuvo lugar hace millones de años. (Pinedo, 2013)

I.3.1 Clasificación de la biomasa de acuerdo su origen.

La clasificación de la biomasa de acuerdo a su origen está dada en biomasa natural residual, cultivos energéticos y excedentes agrícolas (**Figura I.3**).



Figura I.3 Clasificación de la biomasa de acuerdo su origen. **Fuente:** (Arauzo et. al, 2014)

- **Biomasa natural:** la que se produce en ecosistemas naturales. La explotación intensiva de este recurso no es compatible con la protección del entorno.
- **Biomasa residual:** incluye los residuos forestales y agrícolas, los residuos producidos por industrias forestales y agrícolas, los residuos sólidos urbanos y los residuos biodegradables como efluentes ganaderos, lodos de depuradoras, aguas residuales urbanas, etc.

- **Cultivos energéticos:** realizados con el único objeto de su aprovechamiento energético, caracterizados por una gran producción de materia viva por unidad de tiempo.
- **Excedentes agrícolas:** constituidos por los productos agrícolas que no emplea el hombre.

I.4 Procesos de transformación de la biomasa

Existen diferentes procesos de conversión o transformación para las biomásas, dependiendo de las particularidades estos pueden ser:

Calor y vapor: es posible generar calor y vapor mediante la combustión de biomasa o biogás. El calor puede ser el producto principal para aplicaciones en calefacción y cocción, o puede ser un subproducto de la generación de electricidad en plantas que cogeneran electricidad y vapor.

Combustible gaseoso: el biogás producido en procesos de digestión anaeróbica o gasificación puede ser usado en motores de combustión interna para generación eléctrica, para calefacción y acondicionamiento en el sector doméstico, comercial e institucional y en vehículos modificados.

Biocombustibles: la producción de biocombustibles como el etanol y el biodiesel tiene el potencial para reemplazar cantidades significativas de combustibles fósiles en muchas aplicaciones de transporte. El uso extensivo de etanol en Brasil ha demostrado, durante más de 20 años, que los biocombustibles son técnicamente factibles a gran escala. En los Estados Unidos y Europa su producción está incrementándose y se están comercializando mezclados con derivados del petróleo. Por ejemplo, la mezcla denominada E20, constituida 20% de etanol y 80% de petróleo, resulta aplicable en la mayoría de motores de ignición. Actualmente, este tipo de combustible recibe algún tipo de subvención o ayuda estatal, pero, en el futuro, con el incremento en los cultivos energéticos y las

economías de escala, la reducción de costos puede hacer competitiva su producción.

Electricidad: la electricidad generada a partir de los recursos biomásicos puede ser comercializada como “energía verde”, pues no contribuye al efecto invernadero por estar libre de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Este tipo de energía puede ofrecer nuevas opciones al mercado, ya que su estructura de costos permitirá a los usuarios soportar mayores niveles de inversión en tecnologías eficientes, lo cual incrementará la industria bioenergética.

Co-generación (calor y electricidad): la co-generación se refiere a la producción simultánea de vapor y electricidad, que puede aplicarse a muchos procesos industriales que requieren las dos formas de energía. En América Central y en nuestro país, por ejemplo, este proceso es muy común en la industria azucarera, donde es posible aprovechar los desechos de proceso, principalmente el bagazo. Por la alta fiabilidad de bagazo disponible, tradicionalmente, la co-generación se realiza de una forma bastante eficiente. Sin embargo, en los últimos años ha existido la tendencia a mejorar el proceso para generar más electricidad y vender el excedente a la red eléctrica.(Salvador, 2010)

I.5 Tecnologías de conversión de biomasa en calor o electricidad a nivel mundial.

La biomasa puede ser convertida en formas de energía útiles mediante el uso de diferentes tecnologías. Los factores que influyen en el tipo de proceso de conversión que se va a utilizar son: el tipo y la cantidad de materia prima, la energía requerida para la transformación y los requerimientos legales y económicos (Pinedo, 2013).

Las tecnologías de conversión de biomasa se pueden concentrar en cuatro grupos principales:

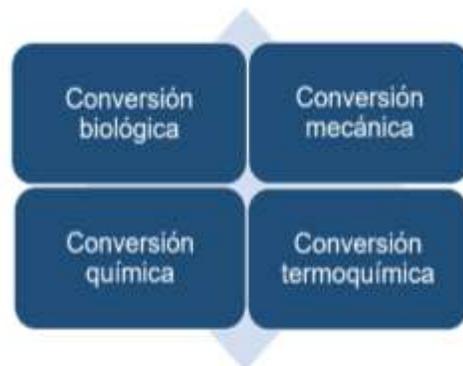


Figura I.4 Tecnologías de conversión de biomasa. **Fuente:** (Arauzo et. al, 2014)

I.5.1 Conversión Termoquímica

La conversión termoquímica está basada en la descomposición de la biomasa por medio de calor. Esta transforma a la biomasa en productos con un más alto valor o más convenientes y, dependiendo de las condiciones del proceso, se obtienen diferentes proporciones de productos sólidos, líquidos y gaseosos.

I.5.1.1 Combustión

La combustión es el proceso mediante el cual la biomasa se transforma en gases calientes, con temperaturas alrededor de 800-1000°C, al aplicar una energía térmica elevada en presencia de oxígeno. En la práctica, solo es posible combustionar biomasa con una humedad inferior al 50%. La combustión se puede realizar a pequeña escala (calefacción) o en grandes plantas de escala industrial.

La co-combustión en las centrales eléctricas de la biomasa junto al carbón es una opción atractiva debido a su alta eficiencia de conversión en energía. A pesar de ello, la combustión no se considera un proceso de conversión adecuado ya que no produce combustibles que puedan ser posteriormente utilizados (bioaceites o biogás) (Pinedo, 2013)

I.5.1.2 Pirolisis

Es la descomposición de la materia prima de biomasa por el calor, también se conoce como desvolatilización, es endotérmico y produce de 75 a 90% de materiales volátiles en la forma de hidrocarburos líquidos y gaseosos, y carbón. Los hidrocarburos volátiles y carbón son posteriormente convertidos en gas de síntesis en el segundo paso.

Algunas de las reacciones más importantes que intervienen en esta etapa son los Sigüientes:

Reacciones Exotérmicas:

- Combustión {biomasa volátil /carbón} + O₂→ CO₂
- Oxidación Parcial {biomasa volátil /carbón} + O₂→ CO
- Metanización {biomasa volátil /carbón} + H₂→ CH₄
- Agua-Gas Shift CO + H₂O → CO₂+ H₂

- Metanización $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$

Reacciones Endotérmicas:

- Reacción de carbón de vapor {biomasa volátil /carbón} + $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$
- Reacción de Boudouard {biomasa volátil /carbón} + $\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$

I.5.1.3 Gasificación

Es un término genérico cuya denominación recoge todos los procesos en los que se produce una combustión incompleta con defecto de oxígeno y en los que se producen los siguientes gases: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, metano e hidrocarburos de cadena pequeña, en proporciones diversas, según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso.

La gasificación es un proceso termoquímico en el que se transforma un combustible sólido en uno gaseoso. El proceso está conformado por varios fenómenos complejos que van desde los mecanismos de transferencia de masa y energía en un sistema reactivo heterogéneo, derivando las etapas de secado y desvolatilización del combustible, para dar paso a la oxidación de los volátiles y el carbón, con el consecuente cambio del diámetro de las partículas y las pérdidas de presión en el lecho. En el proceso de gasificación es necesario tener en cuenta el equilibrio termodinámico y químico, y todas las variables relacionadas con:

- a. Tipo de biomasa.
- b. Porcentaje de humedad
- c. Poder calorífico.

Las reacciones en la gasificación se llevan a cabo a temperaturas elevadas, 500-1400°C, y presión atmosférica elevada de hasta 33bar (480psi). El oxidante utilizado puede ser aire, oxígeno puro, vapor o una mezcla de estos gases. Las reacciones de la gasificación de la biomasa se realizan a través de un proceso de dos pasos pirolisis y gasificación. Debido a su mayor eficiencia y versatilidad, la gasificación es vista como una evolución necesaria en el desarrollo de sistemas de energía de biomasa. Esta tecnología ha sido probada principalmente en lecho fijo (Corriente ascendente y corriente descendente) y sistemas de reacción de lecho fluidizado, con menos información disponible acerca del potencial de los reactores de flujo arrastrado. Este último se beneficia de un diseño relativamente simple

estructura mecánica y robustez frente a condiciones severas de gasificación, la inversión y los costos de operación son reducidos.

La gasificación de biomasa es una forma de conversión de energía que todavía se mantiene en etapa de investigación y se ha desarrollado con algunas aplicaciones en la generación de electricidad. La investigación sobre el tema ha estado centrada en la mejoría del diseño, modelación y evaluación de diferentes tipos de gasificadores. Las aplicaciones prácticas se han llevado a cabo fundamentalmente a través de instalaciones de pequeña y mediana potencia para la generación de energía eléctrica usando motores de combustión interna.

I.5.2 Conversión mecánica (Construcción de pellet.)

Son conglomerados en forma de cilindro o esfera obtenidos a partir del proceso de prensado de biomasa como residuos forestales y madera. Para su fabricación se emplean residuos vegetales como madera, serrín, paja o papel. El proceso de prensado se realiza para facilitar el transporte del material, y su almacenamiento, al ocupar menos volumen. Debido a su forma cilíndrica se facilita su carga, pues los pellets pueden "rodar" y gracias a su pequeño tamaño y peso permiten la carga en las estufas y calderas mediante tornillos sin fin u otros sistemas. Otra de las ventajas de sus pequeñas dimensiones es que los pellets pueden distribuirse con camiones cisterna, sacos, bolsas o pallets. Aunque su precio haya subido en los últimos tiempos debido al aumento de la demanda, sigue siendo una opción más barata que el gas, gasoil o electricidad. Los pellets se consideran un combustible ecológico, ya que para su fabricación se utilizan exclusivamente desperdicios, por lo que se aumenta el aprovechamiento de los recursos naturales del planeta. Además, las técnicas de producción son totalmente naturales, pues para su prensado no se utiliza ningún componente artificial ya que es la propia lignina existente en la madera la que hace de aglomerante. Las emisiones de CO₂ a la atmósfera se consideran nulas. La verdad es que, si emiten CO₂ en el proceso de combustión, pero esa cantidad de CO₂ es la misma que se desprendería en el proceso de descomposición de la madera, por tanto, no se está aumentando las emisiones de dióxido de carbono. Aunque hoy en día su principal uso se asocia a la obtención de calor, los pellets también se utilizan para hacer camas para

animales, desde los más pequeños como ratones y hámsteres a otros más grandes como caballos. Los pellets aíslan los animales del frío del terreno y además absorben la humedad (Bucheli, et al., 2016).

I.5.3 Conversión biológica

La conversión biológica abarca dos opciones de procesos: La fermentación (utilizada para la producción de combustibles) y la digestión (utilizada para la producción de biogás, una mezcla principalmente de metano y dióxido de carbono). Este último proceso de conversión depende de la acción de microorganismos como enzimas y bacterias para la transformación energética de la biomasa. Una variedad de combustibles puede ser producida a partir de residuos de biomasa incluyendo combustibles líquidos, tales como etanol, metanol, biodiesel y combustibles gaseosos, tales como hidrógeno y metano. Los recursos para la obtención de estos biocombustibles son obtenidos de una amplia variedad de recursos forestales y agrícolas, residuos de procesos industriales, desechos de madera y residuos sólidos urbanos municipales. La materia prima con el mayor potencial para la producción de etanol son los residuos de biomasa lignocelulósica, que incluyen materias primas tales como residuos agrícolas (rastrajo de maíz, paja de los cultivos y bagazo), cultivos herbáceos (alfalfa, pasto elefante), cultivos leñosos de ciclo corto, residuos forestales, residuos de papel y otros desechos (municipales e industriales). Los procesos biológicos, como la digestión anaeróbica, también pueden producir energía limpia en forma de biogás que posteriormente puede ser convertido en potencia y calor utilizando un motor de gas. Otras aplicaciones incluyen la utilización de este producto como sustituto del gas natural o en motores auto-motivos después de un proceso de purificación.

I.5.3.1 Fermentación

Una de las opciones para producir bioetanol es por fermentación a partir de materias primas ricas en carbohidratos (azúcar, almidón, celulosa, etcétera) de las frutas y vegetales como la caña de azúcar y la remolacha, los cereales (trigo, maíz, sorgo), los tubérculos (papas, yuca) y en general, materias provenientes de ligno-celulosas o de residuos orgánicos. Según la Agencia Internacional de Energía, el potencial de esta fuente de energía es considerable.

I.5.3.2 Digestión Anaerobia (DA)

Este proceso se realiza por la acción de bacterias anaeróbicas (bacterias cuyo metabolismo se realiza en ausencia de oxígeno), estas bacterias se desarrollan muy bien a temperaturas hasta de 30°C, es un proceso en serie donde se degrada la materia orgánica en tres etapas fundamentales:

1. Hidrólisis-Acidogénesis.
2. Homoacetogénesis-acetogénesis.
3. Metanogénesis.

En esta etapa actúan diferentes poblaciones bacterianas: En la acidogénica están las formadoras de ácidos que emplean como materia prima hidratos de carbono, en la acetogénica están las bacterias formadoras de ácido acético las cuales pueden ser inhibidas por H₂, en la etapa metanogénica están las acetofílicas y las hidrogenofílicas que emplean ácido acético y monóxido de carbono e hidrogeno respectivamente y el producto de la DA es el biogás, que es una mezcla formada por metano (CH₄), Bióxido de carbono (CO₂), y pequeñas cantidades de hidrógeno (H), sulfuro de hidrógeno (SH₂) y nitrógeno (N).

I.5.3.3 Biodiesel

El biodiesel consiste en un éster metílico o etílico de ácidos grasos. Las materias primas empleadas en su fabricación son principalmente los aceites vegetales, bien de primer uso o bien usados, y en ocasiones también se usan grasas animales. El sector del transporte es el mayor consumidor de este combustible fósil, de carácter limitado. Es por ello que el biodiesel ha alcanzado la importancia que tiene en la actualidad, debido a la gran dependencia que el sector del transporte tiene del petróleo.

Tiene características físico-químicas similares a las del gasóleo que se detallan en la norma N14214. Esta norma fija los parámetros que aseguran que los resultados de ese biodiesel en combustión son los adecuados para que funcione el vehículo. El biodiesel puede utilizarse en todos los motores diésel; ya sea puro al 100% o mezclado. Además, el biodiesel además de usarse como combustible, puede usarse como lubricante.

Las materias primas más utilizadas para la producción de biodiesel son el aceite de colza en la Unión Europea, el aceite de soja en Estados Unidos y América Latina, y el aceite de palma en el Sudeste Asiático. Existen otras materias primas con presencia relevante en algunos mercados, como por ejemplo el aceite vegetal usado (en España o Estados Unidos), el aceite de girasol (en Europa), el aceite de algodón (en Brasil), las grasas animales (en Estados Unidos o Brasil) o el aceite de coco (en Filipinas).

I.6 Potencial de la industria azucarera

La caña de azúcar tiene el mayor potencial de conversión solar de todos los cultivos, hasta un 6,7%. Los subproductos y desechos de la industria azucarera y los residuos agrícolas de la caña de azúcar son las principales fuentes de biomasa. La producción de electricidad en las fábricas de azúcar se basa en el bagazo y la combustión de paja de caña de azúcar en hornos de biomasa para producir vapor, que a su vez se utiliza para producir electricidad y calor. La paja de caña de azúcar es un desecho agrícola de la cosecha, mientras que el bagazo es un subproducto de la industria azucarera. El excedente de electricidad producido se puede vender a la red eléctrica nacional. En vista de su disponibilidad y características, la cachaza y el marabú también son adecuados para la combustión en los hornos.

I.6.1 Bagazo

El creciente desarrollo de la industria de los derivados y el tradicional compromiso energético del bagazo comienzan a adquirir una relevante significación económica. El bagazo se usa históricamente como combustible en la industria azucarera. Aunque su valor calórico es relativamente bajo al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay dudas de que constituye un valioso potencial energético, sobre todo, para nuestro país que no tiene disponibilidades significativas de combustible y a la vez es un gran productor de azúcar de caña. Tiene relevante importancia en la alimentación animal y potencialmente puede convertirse en la materia prima que garantice el desarrollo de diversas producciones, sirviendo, así como abono natural del suelo. Se ha demostrado la

posibilidad de satisfacer las demandas energéticas de un central con casi la mitad del bagazo que produce, por lo que el sobrante puede ser utilizado como materia prima.

I.6.2 Cachaza

La cachaza se puede definir como el residuo en forma de torta que se elimina en el proceso de clarificación del jugo de caña, durante la fabricación de azúcar crudo. El residuo que se obtiene por sedimentación del jugo suspendido y con posterioridad se somete a filtración se le denomina cachaza primaria y cachaza final al residuo que se descarga de los filtros para ser desechado.

La utilización más difundida es como fertilizante, a causa de la gran cantidad de nitrógeno, fósforo, calcio y materia orgánica en general, que aporta al suelo. Entre los experimentos realizados se han obtenido buenos resultados, en las plantaciones cañeras. Se utiliza en la alimentación de ganado vacuno previo secado al sol, con buenos resultados, aun cuando tiene un bajo valor alimenticio, y además en el ensilaje a partir de los residuos de la agroindustria cañera.

Otra de las aplicaciones de la cachaza es la extracción de cera con solventes orgánicos, para sustituir diferentes tipos de ceras naturales y derivadas del petróleo. También se han realizado estudios para determinar las posibilidades de obtener de la cachaza: aceites y resinas (Oficina Estadística de AZCUBA, 2019)

I.6.3 Residuos de la cosecha

En el caso de nuestra provincia, se han diseñado estaciones de separación en seco denominadas como centros de acopio y de limpieza donde la caña se reduce longitudinalmente y además se separan debido a fuertes corrientes de aire las fracciones más ligeras como son las hojas verdes y secas, el cogollo y algunos trozos de caña en adición a otras materias extrañas acompañantes derivadas del tiro mecanizado.

El alto por ciento de cogollo y caña limpia de los residuos agrícolas le confiere un potencial energético de alto valor cuando se considera como fuente de alimento animal, presentando características nutricionales muy similares a las plantas forrajeras. La paja de caña, constituida por la vaina y las hojas secas, tiene una estructura muy diferente a la del cogollo. La composición de la paja es muy

parecida a la del bagazo, a excepción de que la primera no contiene azúcares y posee una humedad natural inferior a la del bagazo. Para fines de alimentación animal, la paja con las vainas constituye la fracción menos asimilable, pero es la más interesante desde el punto de vista de utilización energética. El empleo de la paja para la producción de energía, por sus ventajas como recurso renovable, ha sido siempre preocupación de investigadores y especialistas y constituye un tema latente de investigación. Con la finalidad de incrementar el valor natural de estos residuos puede implementarse la clasificación de estos en fracciones (secas y verdes según el propósito) y brindar un subsiguiente y adecuado tratamiento químico o físico y mezclado con otros productos para incrementar su valor nutricional. Un aspecto importante a considerar, consiste en que se pueden conseguir por esta vía, en plena etapa de sequía, grandes cantidades de materia verde capaz de ser asimilada por el ganado y evitar la depauperación del mismo en este período. Una opción económicamente atractiva la constituye la utilización de la paja de la caña para la obtención de sustrato en el cultivo de hongos comestibles y al final del proceso productivo contar con un forraje beneficiado y enriquecido para el ganado. Para esta opción resultan particularmente importantes las fracciones secas, en las cuales son más moderados los procesos fermentativos que pudieran competir con el cultivo que se inocula en la masa vegetal. De hecho, se entiende con carácter imprescindible el envejecimiento del sustrato antes de ser incorporado a la producción, lo cual se logra con técnicas de almacenamiento controlado (Martínez, 2014).

I.7 Biomasa residual del arroz.

Un potencial energético que aún no se aprovecha en su totalidad se encuentra disponible en los residuos sólidos de la agricultura. Según (Piñas, 2014) la cascarilla de arroz es actualmente un residuo con gran potencial de contaminación si no se es tratada adecuadamente, pero también tiene un alto potencial para la generación energética ya que genera 3,5 MWh de energía por cada tonelada de este residuo.

La industria molinera además de obtener arroz en el proceso productivo también se generan varios residuos como son el polvo de arroz y la cabecilla, se

consideran subproductos al utilizarse como alimento animal por el valor nutritivo que poseen, mientras que la paja de arroz o restos de la planta después de la cosecha, así como la cascarilla o cáscara de arroz, las impurezas o residuos del secado, obtenidas en el procesamiento industrial de secado y limpieza del grano, no cuentan actualmente con una disposición final ambientalmente adecuada.

Aunque existen métodos disponibles para el uso de la paja, por ejemplo: como alimento animal, combustible, fibras para pulpeado, etc., la práctica más usual es quemarla a cielo abierto, provocando contaminación atmosférica y erosión en los suelos. En cuanto a la cáscara de arroz la tendencia mundial es la conversión en energía mediante procesos termoquímicos debido a su alto contenido en componentes inorgánicos. La cascarilla de arroz actualmente es considerada como un producto de desecho del proceso de pilado del arroz y que actualmente no es valorado comercialmente por los molinos de arroz. Existen algunas experiencias en donde se están aprovechando para diferentes usos tales como:

- Cama de pollos en granjas avícolas
- Compostaje
- Combustión de hornos secadores

La cascarilla de arroz puede ser aprovechada de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de combustión controlada, ya que la cascarilla de arroz posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente. Debido a la estructura cerrada, la combustión se dificulta y por el alto contenido de sílice (el 20%), es de muy baja biodegradabilidad en condiciones del ambiente natural. La temperatura máxima que se obtiene al ser quemada varía de acuerdo con su condición: 970°C (seca), 670°C (con algún grado de humedad) y hasta los 1 000°C mezclada con combustible (Piñas, 2014).

1.8 Biomasa de los residuos aserraderos

En la actualidad, los bosques y sus residuos forestales, así como los residuos del procesamiento de la madera, constituyen un recurso aprovechable con fines energéticos, aspecto que toma en cuenta, los altos precios del petróleo como combustible fósil y las grandes emisiones propiciadas por tecnologías consumidoras por este tipo de combustible. El consumo tradicional de madera

como combustible a nivel mundial asciende a 1,777 millones de metros cúbicos, equivalentes a 600 millones de toneladas de combustible fósil.

I.9 Usos de la biomasa

En cuanto a los usos de la energía producida con biomasa, éstos pueden ser para calefacción, refrigeración y producción de agua caliente en el sector doméstico (viviendas, comunidades de vecinos, barrios o municipios enteros), calor para procesos industriales y generación de electricidad. En resumen, todo el conjunto de fuentes energéticas que comprende la biomasa puede tener tanto aplicaciones térmicas como eléctricas.

I.9.1 Aplicaciones térmicas

La producción térmica sigue una escala de usos que comenzaría con las calderas o estufas individuales utilizadas tradicionalmente en los hogares. En un segundo escalón se sitúan las calderas diseñadas para un bloque o edificio de viviendas, equiparables en su funcionamiento a las calderas habituales de gasóleo o gas natural, que proveen a las viviendas de calefacción y agua caliente. En un tercer escalón aparecen las redes de calefacción centralizada (calefacción de distritos), muy extendidas en el norte y centro de Europa. La red de calor y agua caliente llega no sólo a viviendas y urbanizaciones sino también a edificios públicos, centros deportivos, complejos comerciales e incluso industrias. Estas centrales térmicas requieren instalaciones exclusivas, debido al mayor tamaño tanto de las calderas como de los silos de almacenamiento. Estas instalaciones también permiten la distribución de frío para la climatización de viviendas y otros edificios en verano. Asimismo, en algunos casos también pueden cubrirse las necesidades térmicas de ciertas industrias con calderas de biomasa. Las industrias agroforestales normalmente aprovechan sus residuos para la producción de calor y, en ocasiones, se acompaña de producción eléctrica (cogeneración con biomasa) (Cerdá, 2012).

I.9.2 Aplicaciones eléctricas

La producción de electricidad a partir de biomasa sólida precisa de sistemas complejos dado el bajo poder calórico de esta fuente energética, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido de volátiles. Para ello se necesitan centrales

específicas con grandes calderas, con volúmenes de hogar mayores que si utilizaran combustibles convencionales, que conllevan inversiones elevadas y reducen su rendimiento. Todo ello, unido a la dificultad de aprovisionamiento de la biomasa, hace que tenga menor peso la biomasa eléctrica que la biomasa para usos térmicos en el cómputo global de esta energía. No obstante, la aplicación eléctrica de la biomasa sólida contribuye a la estabilidad de la red de distribución, dada su capacidad para proporcionar al sistema eléctrico garantía de suministro a cualquier hora del día, independientemente de las diferentes condiciones meteorológicas. Se trata, por tanto, de una energía renovable con un carácter gestionable lo que la distingue de otras fuentes renovables. En general, para cualquier combustible, la generación de electricidad típicamente tiene una eficiencia de conversión directa del 35 %, lo cual significa que el contenido en energía primaria es convertido en electricidad (energía final). La producción de calor tiene una eficiencia de conversión directa del 85 %. Una planta de cogeneración genera a la vez calor y electricidad (por cada unidad de electricidad da dos unidades de calor). La cogeneración con biomasa permite acercar la generación eléctrica y térmica a los centros de producción, reduciendo pérdidas de transporte y evitando la construcción de nuevas plantas de energía convencional que suministren esa demanda eléctrica y térmica (Cerdá, 2012).

I.10 Usos de las fuentes de biomasa en Cuba

I.10.1 Uso del Bagazo en Cuba

El bagazo constituye la principal fuente de energía en la producción de azúcar. Este proceso se basa en la cocción y posterior concentración del jugo extraído a la caña durante su molida. Se consumen 500 kg de vapor y 21 kWh por tonelada de caña molida.

Existen en la industria 804 generadores de vapor que utilizan bagazo como combustible con una eficiencia entre el 50 y el 60%, la cual está determinada ante todo por la obsolescencia tecnológica de las calderas, de las cuales el 52% tiene más de 45 años de instaladas. La capacidad de producción de vapor de estas calderas está entre 18 y 40 t/h y la presión de vapor en los centrales azucareros

es baja, en el 65% es de 10 kg/cm², en el 22% de 17 kg/cm² y en el 8% restante de 27 kg/cm². (Garea, 2011)

I.10.2 Uso de la Cachaza en Cuba

A la cachaza se le ha evaluado principalmente sus propiedades como fertilizante, por su alto contenido de nitrógeno, fósforo, calcio y materia orgánica que aporta al suelo. También se le han estudiado sus efectos sobre las propiedades físicas del suelo y en la recuperación de suelos afectados por sales y se ha probado la influencia de la cachaza en la reacción del suelo, pero con muy pocas experiencias en esta área.

La Cachaza mejora la estructura superficial del suelo; aumenta su infiltración; es fuente de fósforo (P), Potasio (K), Nitrógeno (N), y materia orgánica que al descomponerse da Anhídrido Carbónico (CO₂) y después ácido carbónico, aumentando la solubilidad del carbonato de Calcio (Ca CO₃) presente en el suelo, aportando así Calcio (Ca). (ICIDCA. 1993).

I.11 Economía Ecológica

La economía ecológica es la ciencia de la gestión sostenible o el estudio y valoración de la sostenibilidad. Es un conjunto de modelos de producción integral e incluyente que toma en consideración variables ambientales y sociales. A diferencia de la *economía marrón* que es la administración eficaz y razonable de los bienes que se basa en la persecución del crecimiento económico a través del uso óptimo de insumos y factores de producción. La economía ecológica no es una rama de la teoría económica, sino un campo de estudio transdisciplinar, lo que quiere decir que cada experto en una ciencia conoce un poco de otras disciplinas, con la finalidad de fusionar conocimientos que permita afrontar mejor los problemas ya que el enfoque económico convencional no se considera adecuado. Sin embargo, está abierta también a no científicos. (Doménech, 2007) ([Toledo, 1998](#))(Martínez, 1995)

El problema básico que estudia es la sostenibilidad de las interacciones entre los subsistemas económicos y el macro sistema natural. Dicha sostenibilidad, entendida como la capacidad de la humanidad para vivir dentro de los límites ambientales, es enfocada como *metabolismo social* (la sociedad toma materia,

energía e información de la naturaleza y le expulsa residuos, energía disipada e información aumentando la entropía). Es imposible encontrar la sostenibilidad a través de la concepción de mercado de la economía convencional.

La economía ecológica, pues, estudia las relaciones entre el sistema natural y los subsistemas sociales y económicos, incluyendo los conflictos entre el crecimiento económico y los límites físicos y biológicos de los ecosistemas; debido a que la carga ambiental de la economía aumenta con el consumo y el crecimiento demográfico. Los economistas ecológicos adoptan posturas muy críticas con respecto al crecimiento económico, los métodos e instrumentos de la economía tradicional y los desarrollos teóricos que proceden de ésta como la economía ambiental y la economía de recursos naturales. ([Van Havermeiren](#), 1998) (MacGillivray, 1996)

I.12 Las principales características de la economía ecológica.

Asume una relación inherente entre la salud de los ecosistemas y la de los seres humanos. En ocasiones se menciona como "Economía Verde", y se encuentra en amplio contraste con otras escuelas de pensamiento en el seno de la economía. Los economistas verdes suelen tomar con frecuencia posturas más radicales que las que se encuentran entre la más convencional economía ambiental con respecto al crecimiento económico.

Las principales características de la economía ecológica son:

1. Investiga aspectos que quedan ocultos por un sistema de precios, que infravalora la escasez y los perjuicios ambientales y sociales, presentes y futuros.
2. Plantea la equidad, la distribución, la ética y los procesos culturales como el centro para entender el problema de la sustentabilidad.
3. Hace énfasis en los conflictos ecológicos distributivos inter e intrageneracionales.
4. Suplanta el crecimiento económico por la sustentabilidad ecológica de la economía.
5. Tiene como objetivo la conservación de la diversidad biológica y entiende que los residuos pueden ser generados en la magnitud que el ecosistema pueda asimilarlos.

6. Propone indicadores biofísicos para superar limitaciones de los indicadores monetarios al medir la sustentabilidad ecológica.
7. Proyecta una economía con visión de largo plazo.
8. La gestión del medio ambiente debe ser construido por aquellos que lo ocupan.
9. Todos los actos que condicionan el medio ambiente deben contribuir a su totalidad.

I.13 Indicadores de Economía Ecológica.

Los Principales Indicadores de Economía Ecológica:

- Huella ecológica.
- Huella ecológica corporativa.
- Ciclo de vida.
- Matrices energéticas sustentables.
- Indicadores de flujo de materias primas y energía por unidad de servicio.
- Índice de desempeño ambiental.
- Análisis multivariado y multicriterio.

I.13.1 Huella Ecológica

La huella ecológica es un indicador del impacto ambiental generado por la demanda humana que se hace de los recursos existentes en los ecosistemas del planeta, relacionándola con la capacidad ecológica de la Tierra de regenerar sus recursos.

Representa el área de tierra o agua ecológicamente productivos (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuáticos) e idealmente también el volumen de aire, necesarios para generar recursos y además para asimilar los residuos producidos por cada población determinada de acuerdo a su modo de vida, de forma indefinida. Estas medidas se pueden efectuar realizándose a diferentes escalas: individuo (la huella ecológica de una persona), poblaciones (la huella ecológica de una ciudad, de una región, de un país...), comunidades (la huella ecológica de las sociedades agrícolas, de las sociedades industrializadas, etc). El objetivo fundamental de calcularlas consiste en evaluar el impacto sobre el planeta de un

determinado modo o forma de vida y compararlo con la biocapacidad del planeta. Se trata, pues, de un indicador clave para la sostenibilidad.

La ventaja de medir la huella ecológica para entender la apropiación humana está en aprovechar la habilidad para hacer comparaciones. Es posible comparar, por ejemplo, las emisiones producidas al transportar un bien en particular con la energía requerida para el producto sobre la misma escala (hectáreas).

I.13.2 Ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (ACV) es una metodología empleada para evaluar el impacto ambiental de un proceso, producto o servicio durante toda su existencia desde la adquisición de las materias primas, el transporte, la construcción y el uso hasta su fin de vida. El ACV, incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de extracción y procesamiento de materias primas, producción, transporte y distribución, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado y disposición final.

I.13.3 Análisis del ciclo de vida (Herramienta para un desarrollo sostenible).

La gestión ambiental para un desarrollo sostenible adquiere una importancia crucial en el escenario mundial actual para hacer frente a los grandes problemas medioambientales que afectan a todo el planeta, como son el agotamiento de recursos naturales, el calentamiento global, la contaminación o la pérdida de biodiversidad. Ante estas problemáticas, la sociedad debe adoptar un enfoque coherente y holístico que integre junto con los aspectos ambientales, los económicos y sociales. En este contexto, una metodología útil que facilita este necesario desarrollo sostenible es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida completo de un producto, lo que se denomina “de la cuna a la tumba”. Esta herramienta práctica de gestión ambiental, requiere apoyo informático para facilitar el manejo de datos y análisis de resultados.

Los primeros estudios de ACV se remontan a los años 60, desarrollándose casi simultáneamente, en Estados Unidos y Europa. Dichos análisis se centraban en el

cálculo del consumo energético necesario para la producción de sustancias químicas intermedias y finales. Posteriormente, a partir de la crisis del petróleo de los años setenta, se llevaron a cabo gran número de estudios más detallados, sobre la gestión óptima de los recursos energéticos. Dado que para estos estudios había que tener en cuenta los balances de materia del proceso, fue necesario incluir en ellos el consumo de materias primas y la generación de residuos.

I.13.4Huella Ecológica Corporativa

La huella ecológica corporativa es un indicador de sostenibilidad ambiental integrado, con el que se evalúa el impacto ambiental que una actuación concreta ejerce sobre el entorno. Consiste en la medición de la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI), emitidos directa o indirectamente por un individuo, organización, evento o producto. Muestra el impacto ambiental a través de la realización de un inventario de las emisiones asociadas a los diferentes GEI. Una vez calculado el tamaño de la huella se pueden implementar las medidas de mitigación y compensación que permiten reducir el impacto ambiental.

La huella ecológica corporativa o huella de Carbono es, por tanto, una herramienta que permite medir las emisiones de GEI producidas por una actividad. Su análisis se base en metodologías reconocidas internacionales que representan un estándar a nivel mundial para los estudios de Huella de Carbono.

Conclusiones parciales

1. El fomento para nuestro país de las fuentes renovables de energía en particular la biomasa constituye en estos momentos una tarea priorizada ya que para el 2030 la participación con biomasa debe ser de un 14 % en la matriz energética para el país.
2. El empleo de la economía ecológica como método de evaluación de la sostenibilidad ambiental a través de indicadores, se presenta como una tendencia en los estudios de evaluación para este tipo de fuente renovable. Dentro de los indicadores más utilizados se encuentran (Huella Ecológica, ACV, MDMC)

*Capítulo II: Levantamiento del potencial de las
diferentes biomásas en la Provincia de Cienfuegos.
Metodología para la evaluación con enfoque de
economía ecológica*



Capítulo II: Levantamiento del potencial de las diferentes biomasas en la Provincia de Cienfuegos. Metodología para la evaluación con enfoque de economía ecológica

II.1 Introducción al capítulo

En este capítulo se estimarán las cantidades de biomasa en el territorio a partir de las informaciones aportadas por la empresa azucarera perteneciente al grupo AZCUBA, la UEB Granos "La Paquita" en Aguada y el GAF de Cienfuegos. Las biomasas seleccionadas fueron Bagazo, Cachaza, RAC, Cáscara de Arroz y Residuos Agroforestales. Se propone finalmente una metodología para la estimación del potencial energético de cada una de estas, así como los indicadores para la medición de la sustentabilidad.

II.2 Estimación de las cantidades de biomasas existentes

La estimación de la biomasa potencial desde el punto de vista estratégico, puede ser una herramienta eficaz con el fin de conocer la cantidad de residuos y poder realizar una planificación más acertada. Contando con las cifras de producción de la caña y los residuos generados, así como el área total de caña sembrada y los rendimientos se puede conocer el potencial con que se cuenta. Los datos del comportamiento de las distintas unidades productoras de caña de azúcar pertenecientes a la Empresa Azucarera de Cienfuegos en las últimas tres zafras pueden ser consultados en la Tabla II.1

Descripción de la empresa productora.



AZCUBA. Es el grupo estatal que sustituye al Ministerio del Azúcar (MINAZ), este organismo responde entre sus principales funciones por la producción de azúcar, derivados y electricidad, según resoluciones y decretos emitidos por la Gaceta Oficial. Esta es considerada oficialmente de gran importancia para el desarrollo económico del país.

Misión

Producir azúcar y derivados de la caña de azúcar, energía eléctrica y alimento animal con calidad y costos competitivos, aplicando la ciencia y la técnica y protegiendo el medio ambiente.

Visión

Somos una empresa de producción azucarera que se diferencia por la alta calidad del azúcar y su eficiencia energética, caracterizada por la alta profesionalidad y competitividad en el trabajo, contribuyendo a elevar el nivel de bienestar y satisfacción de nuestros trabajadores y la protección del medio ambiente.

Responsabilidades fundamentales

- Orientar, dirigir y controlar la producción cañera y agropecuaria de las entidades estatales que la integran y proyectar su desarrollo.
- Dar prioridad al balance de áreas y el acercamiento a los centrales, la producción de semillas, composición de cepas y su manejo científico, el incremento del riego y suministros oportunos.
- Rescatar la disciplina tecnológica y la calidad de los productos, en primer lugar, de los exportables.
- Orientar, dirigir y controlar las actividades de mecanización en el cultivo y la cosecha de la materia prima.
- Las producciones agropecuarias y en la maquinaria industrial y el desarrollo de nuevas tecnologías en equipos e implementos, encaminadas a optimizar el rendimiento en las labores.

Tabla II.1: Producción de caña de azúcar en toneladas (t) en las últimas tres zafras.

Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2019)

Zafras	Producción (t)	Producción de caña en Cienfuegos más otras provincias (t)
2015-2016	1523845	1649816

2016-2017	1597797	1710490
2017-2018	1047565	1102232
Total	4169207	4462538

Como se observa en la tabla anterior la tendencia ha sido al incremento en la producción de caña entre los años 2015 y 2016. Este incremento fue de un 4,63 %. En la zafra 2017-2018 la producción de caña disminuyó 550 232 t menos que la zafra anterior.

En la Tabla II.2 se muestran la tenencia y uso de la tierra para el cultivo de la caña, para poder determinar los rendimientos de caña por área de tierra sembrada, así como las áreas destinadas al cultivo. Se cuenta con 67 777,31 ha de tierras destinadas a la siembra de caña de azúcar de ellas solo 50 962,41 ha cultivadas como puede observarse en la Tabla 2.2.

Tabla II.2: Tenencia y uso de la tierra para el cultivo en hectáreas (ha) de la caña de azúcar. Fuente: (CNCT, 2019).

Indicadores	Total (ha)
Caña de azúcar	67777,31
Superficie cultivada	50962,41
Bancos de Semillas	521,0
En rotación	
Guardarrayas	6777,7
Vacías	16814,90
Ociosas	
De ellas: Con Marabú	3160,55

Con los valores de producción de caña molida y el área destinada para el cultivo se obtuvieron los rendimientos promedios de caña por hectárea, que se muestran

en la tabla II.3 buscando alternativas para obtener un mayor rendimiento en las cosechas y lograr como meta mínima 35 t de caña/ha en cada unidad productora.

Tabla II.3: Rendimiento de la caña de azúcar en los años de estudio. Fuente: Elaboración Propia

Zafras	Producción de caña(t)	Área Cultivada(ha)	Rendimiento(t/ha)
2015-2016	1523845	34221,0	44,5
2016-2017	1597797	37129,7	43,0
2017-2018	1047565	26744,7	39,2
Total	4169207	98095,4	126,7

II.3 Potencial de Biomasa Residual

II.3.1 Bagazo

En la provincia de Cienfuegos se contó con 1 421 267 toneladas de bagazo de ello solo se utilizaron 1 350 551 toneladas, teniendo como promedio 473755 toneladas de bagazo producido por año (Tabla II.4).

Tabla II.4: Bagazo producido y utilizado como combustible en toneladas en las tres últimas zafras. Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2019)

Zafras	Bagazo producido (t)	Bagazo Combustible (t)	Bagazo sobrante (t)
2015-2016	529682	503197	26485
2016-2017	541361	515904	25457
2017-2018	350224	331450	18774
Total	1421267	1350551	70716

Por otra parte, la tabla anterior muestra las 70 716 toneladas sobrantes que pueden ser empleados como materia prima en la industria de derivados y su carácter renovable, han estimulado en las últimas décadas un proceso acelerado de desarrollo en la utilización del bagazo en las producciones de pulpa papel y productos aglomerados.

El bagazo puede ser aprovechado de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de la combustión, ya que este posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente. El poder calorífico del bagazo es de 17,3 MJ/kg, con un 50% de humedad como se muestra en la Tabla II.5

Tabla II.5: La composición química y los valores calóricos del bagazo en Cuba (base

Biomasa	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PCIb.s (MJ/kg)	PCSb.s (MJ/kg)
Bagazo	50	47,2	7,0	43,1	2,7	15,8	17,3

seca). Fuente: (Gutiérrez et. al, 2016).

El creciente desarrollo de la industria de los derivados y el tradicional compromiso energético del bagazo comienzan a adquirir una relevante significación económica. El bagazo se usó históricamente como combustible en la industria azucarera. Aunque su valor calórico es relativamente bajo al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay dudas de que constituye un valioso potencial energético, sobre todo, para aquellos países que no tienen disponibilidades significativas de combustible y a la vez son grandes productores de azúcar de caña. Por otra parte, la existencia cada vez menor de materiales fibrosos para ser empleados como materia prima en la industria de derivados y su carácter renovable, han estimulado en las últimas décadas un proceso acelerado de desarrollo en la utilización del bagazo en las producciones de pulpa papel y productos aglomerados. Tiene relevante importancia en la alimentación animal y potencialmente puede convertirse en la materia prima que garantice el desarrollo

de diversas producciones como furfural, carbón activado y productos moldeados, entre otros. Se ha demostrado la posibilidad de satisfacer las demandas energéticas de un central con casi la mitad del bagazo que produce, por lo que el sobrante puede ser utilizado como materia prima. En esta alternativa se recomienda desmedular la mayor cantidad posible en el central azucarero y retornar el bagacillo a las calderas, para entregar la fracción fibrosa a la industria de los derivados.

En la producción de derivados, el bagazo se ha considerado tradicionalmente como sustituto del fuel-oil, pues para obtenerlo es necesario quemar dicho combustible en el central azucarero. La cantidad de bagazo que se libera por cada tonelada de fuel-oil está en dependencia de las características del material fibroso y la eficiencia de las calderas. En Cuba el índice establecido es de 5,2 t de bagazo integral con 50 % de humedad por cada tonelada de fuel-oil.

II.3.2 Cachaza.

En la Tabla II.6 se muestra las 186 618 toneladas del residuo que ha generado la Empresa en las últimas tres zafras.

Tabla II.6: Comportamiento de la cachaza en las tres últimas zafras. Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2019)

Zafras	Cachaza (t)
2015-2016	61470
2016-2017	73024
2017-2018	52124
Total	186618

La cachaza puede ser aprovechado de diferentes formas una de ellas puede ser también el aprovechamiento calórico, el poder calorífico de la cachaza es de 14,5 MJ/kg, con un 70% de humedad como se muestra en la Tabla II.7

Tabla II.7: La composición química y los valores calóricos de la cachaza en Cuba (base

Biomosas	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PClb.s (MJ/kg)	PCSb.s (MJ/kg)
Cachaza	70–80	32,5	2,2	2,2	14,5	8,8	14,5

seca). Fuente: (Gutiérrez et. al, 2016).

La cachaza se utiliza principalmente como fertilizante en los campos de caña de azúcar, lo que da lugar a una fertilización excesiva de los campos de caña, con serias implicaciones en el suelo. Por lo que no se utiliza como combustible en los hornos de las calderas de fábrica, lo que lleva consigo que la eficiencia de utilización de la energía sea nula. La utilización de los subproductos de la caña permite un desarrollo industrial dentro de un ciclo cerrado de aprovechamiento integral, que llega hasta los productos residuales; se emplean de manera que no causen daño al medio ambiente y, a la vez, tengan utilidad económica.

La utilización más difundida es como fertilizante, a causa de la gran cantidad de nitrógeno, fósforo, calcio y materia orgánica en general, que aporta al suelo. Entre los experimentos realizados se han obtenido buenos resultados, en las plantaciones cañeras. Se utiliza en la alimentación de ganado vacuno previo secado al sol, con buenos resultados, aun cuando tiene un bajo valor alimenticio, y además en el ensilaje a partir de los residuos de la agroindustria cañera. Otra de las aplicaciones de la cachaza es la extracción de cera con solventes orgánicos, para sustituir diferentes tipos de ceras naturales y derivadas del petróleo. Para estos fines se han instalado plantas en Filipinas, Taiwán, Cuba e India, entre otros

países. También se han realizado estudios para determinar las posibilidades de obtener de la cachaza aceites, resinas y productos esteroidales.

II.3.3 Residuos de la cosecha.

El empleo de la paja para la producción de energía, por sus ventajas como recurso renovable, ha sido siempre preocupación de investigadores y especialistas y constituye un tema latente de investigación. En la Tabla II.8 se presentan los datos de la cantidad de paja en los centros de limpieza.

Tabla II.8: Paja en los Centros de Limpieza en las tres últimas zafras. Fuente: (Oficina

Cosechas	Pajas en centros de limpieza(t)
2015-2016	99564
2016-2017	83070
2017-2018	51607
Total	234241

Estadística de AZCUBA, 2019).

En la tabla anterior se muestran 234 241 t de paja en los centros de limpieza. La utilización de residuos como combustible se aplica actualmente en varios países, aunque todavía de forma aislada (Tabla II.9).

Tabla II.9: Equivalencia como combustible de paja contra petróleo. Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2016).

Combustible	Petróleo	Paja (10% de humedad)
Valor Calórico (kJ/kg)	39 542	17 445
Eficiencia de hornos y carderas	85%	70%

Combustible necesario en peso para generar la misma cantidad de energía calorífica	1	2,85
--	---	------

El potencial calórico de la paja es de 17,2 MJ/kg, con un 45% de humedad como se muestra en la Tabla 2.10

Tabla II.10: La composición química y los valores calóricos de la paja de caña en Cuba (base seca). Fuente: (Gutiérrez et. al, 2019).

Biomasas	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PCI_{b.s} (MJ/kg)	PCS_{b.s} (MJ/kg)
Paja de la caña	45	43,5	6,1	41,1	9,3	15,7	17,2

La paja de la caña es incinerada en las instalaciones de limpieza sin utilización energética alguna, donde se produce una contaminación del medio ambiente con diseminación de cenizas, humos y gases tóxicos, por lo que la eficiencia energética de utilización es nula. La paja de la caña representa un potencial de biomasa equivalente a 30% de toda la materia seca aprovechable en la cosecha de la caña, con un valor calórico alrededor de 17.2 MJ/kg, en dependencia del contenido de humedad. De esto se deriva que, en términos energéticos, por cada tonelada de paja pueden ser sustituidas 2,85 toneladas de petróleo combustible. Esto ofrece oportunidades al desarrollo de tecnologías rentables que permiten disminuir los costos de producción en el sector de la industria azucarera y en otros de la economía nacional.

La composición de la paja es muy parecida a la del bagazo, a excepción de que la primera no contiene azúcares y posee una humedad natural inferior a la del bagazo. Para fines de alimentación animal, la paja con las vainas constituye la fracción menos asimilable, pero es la más atractiva desde el punto de vista de utilización energética. La utilización de residuos como combustible se aplica actualmente en varios países, aunque todavía de forma aislada. Para el

procesamiento mecánico de los residuos de la cosecha, se han empleado con determinado éxito, equipos originalmente empleados en la cosecha de forrajes tales como silos cosechadoras y empacadoras que, realizando ligeras modificaciones, pueden ubicarse con carácter estacionario en las propias instalaciones de limpieza en seco. Un aspecto importante a considerar en los países productores de caña de azúcar y con deficiencias en masa vegetal para la alimentación animal, estriba en que se pueden conseguir por esta vía, en plena etapa de sequía, grandes cantidades de materia verde capaz de ser asimilada por el ganado y evitar la depauperación del mismo en este período.

Una opción económicamente atractiva la constituye la utilización de la paja de la caña para la obtención de sustrato en el cultivo de hongos comestibles y al final del proceso productivo contar con un forraje beneficiado y enriquecido para el ganado. Para esta opción resultan particularmente importantes las fracciones secas, en las cuales son más moderados los procesos fermentativos que pudieran competir con el cultivo que se inocula en la masa vegetal. (Machín et. al, 2014)

II.4 Potencial de biomasa arrocerá.

La empresa Agroindustrial de Granos del municipio Aguada "La Paquita" se encarga de satisfacer las necesidades de la población mediante la atención, procesamiento y comercialización del arroz no especializado, la producción y comercialización de carne y leche vacuna, cultivos varios, así como la prestación de servicios al sector agropecuario en la provincia de Cienfuegos, con eficacia y eficiencia.



Visión

Son una empresa con alto reconocimiento social, por la eficacia, eficiencia y calidad en las producciones y servicios agroindustriales y constructivos, mediante

la diversificación productiva y la utilización de tecnologías orientadas a la protección de los ecosistemas; el capital humano está preparado, motivado, con sentido de pertenencia y se usan con efectividad las Tecnología de la Información y las Comunicaciones.

Produce y comercializa de forma mayorista granos en sus distintas formas y sus subproductos , así como las semillas, carne y leche de ganado mayor y cultivos varios de forma mayorista, además de comercializar de forma mayorista los insumos fundamentales para la producción agropecuaria, tanto producidos como adquiridos, además de artículos de alta demanda y servicios de preparación de tierra, cultivos, cosecha, transportación de cargas, prestar servicios de procesamiento industrial a las unidades productivas, entidades estatales y productores individuales, con los que se contraten sus producciones de granos y sus semillas en pesos cubanos, comercializar el arroz no especializado en la Provincia de Cienfuegos.

La tabla II.11 muestra la cantidad de arroz secado en la UEB Industrial de Arroz “La Paquita” en las últimas tres cosechas, a partir de datos obtenidos por los informes estadísticos de la UEB. El total de arroz secado fue de 15 511,75 t. En el 2018 se secaron 5 299,57 t para un 8% de incremento con relación al 2017.

Tabla II.11: Cantidad de arroz secado en la UEB Industrial de Arroz “La Paquita” en las últimas tres cosechas.

Cantidad de Arroz	Arroz Secado en Tonelada (t)
2016	5 336,37
2017	4 875,86
2018	5299,57
Total	15 511,75

II.4.1 Cantidad de arroz molinado en las últimas tres cosechas.

El arroz es molinado por un molino con una capacidad de molinado de 10 toneladas de arroz por hora (10t/h), con tecnología Zacaria proveniente de importación desde Brasil. El total de arroz molinado para estas tres cosechas fue de 45 198,41 t, para un 23,8 % de crecimiento con relación a las últimas dos cosechas.

Tabla II.12:Arroz molinado en las últimas tres cosechas. Fuente (Informe estadístico de la empresa)

Arroz Molinado	Producciones en Tonelada (t)
2016	14592,48
2017	13 235,41
2018	17 370,58
Total	45198,41

II.4.2 Producción de cascarilla de arroz, en las últimas tres cosechas.

Como se estudió en el capítulo I la cascarilla de arroz representa el 22% del volumen de arroz que es procesado.

La cascarilla de arroz es el único residuo obtenido en el proceso de molinería, este representa grandes volúmenes acumulados en los alrededores de la UEB, y actualmente no se le está dando ninguna utilidad.

Durante la producción de arroz consumo en las últimas tres cosechas, se generó grandes cantidades de cascarilla, la cual para la empresa representa un gran problema medioambiental debido a los grandes volúmenes de acumulación. En la tabla II.13 se presenta la información del total de cascarilla de arroz para los últimos tres años. El total de cascarilla generada fue de 10 214, 05 t para 3977,86 t en el 2018, creciéndose un 31,43 % con relación al año anterior.

Tabla II.13: Cascarilla de arroz obtenida en las últimas tres cosechas.

Cascarilla de Arroz	Producciones en Tonelada (t)
2016	3 508,36
2017	2 727,77
2018	3 977,86
Total	10214,05

La tabla II.14 presenta la composición química y los valores calóricos de la cascarilla de arroz. La misma presenta un PCI_{b.s} de 15,2 MJ/kg, atractiva para la quema

Tabla II.14: La composición química y los valores calóricos de la cascarilla de arroz en Cuba (base seca). Fuente: (Gutiérrez et. al, 2019).

Biomasa	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PCI_{b.s} (MJ/kg)	PCS_{b.s} (MJ/kg)
Cáscara de arroz	8-10	38.2	5.6	33.7	22.5	15.2	16.5

II.5 Potencial de los residuos aserraderos

La Tabla II.15 muestra el comportamiento de la madera aserrada en los 3 últimos años teniendo un total de 8848,35 m³

Tabla II.15: Madera aserrada en los tres últimos años. Fuente: (Empresa Agroforestal Cienfuegos, 2019)

	U/M	2016	2017	2018	Rend. %
Total	m ³	2625,9	3082,7	3139,55	53
Aserríos de tecnología atrasada	m ³	2625,9	3082,7	3139,55	54

2016					
Aserrios de tecnología avanzada	m ³	0	0	0	52

Tabla II.16: La composición química y los valores calóricos de residuos aserraderos (base seca). Fuente: (Gutiérrez et. al, 2019).

Biomasa	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PCI_{b.s} (MJ/kg)	PCS_{b.s} (MJ/kg)
Residuos aserraderos	15	51,4	5,7	38,7	3,8	19,2	18,5

En este trabajo fueron analizados los residuos en el proceso. Se recolectaron en la Tabla II.17 las cantidades de aserrín, los trozos de madera y costaneras que se obtuvieron, alcanzando un total de residuos en los tres años de 3855,9 m³. Según (Bucheli et. al, 2019) la densidad aparente para los residuos aserraderos es de 160 kg/m³ para las coníferas, obteniendo un total de residuos de 616944 kg. Los residuos aserraderos puede ser aprovechado de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico, ya que este posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente.

En general, el “origen vital” directo de muchos de los residuos y subproductos forestales y su elevada humedad, les puede hacer particularmente lábiles a diversos procesos de fermentación y descomposición, que dificultan su almacenamiento y pueden ser causa de su destrucción con efectos contaminantes graves. Asimismo, en muchos países han sido frecuentes los estudios sobre aprovechamiento de los referidos residuos forestales, directamente o sometidos a diversos tratamientos, así como sobre los subproductos de las industrias madereras y del papel. La utilización en los follajes de las aves, ganado y otros animales de granjas provocando susceptibilidad reducida a las enfermedades, aumento del peso, etc. (Rojas, 2013).

Tabla II.17: Cantidades totales de residuos en los últimos tres años en Cienfuegos. Fuente: (Empresa Agroforestal Cienfuegos, 2019)

	Madera Bolo	T. Residuos	Aserrín	Costanera
Total	4248,9	1104,69	424,89	679,82
Aserrios de tecnología atrasada	4248,9	1104,69	424,89	679,82
Aserrios de tecnología avanzada	0	0	0	0

2017

	Madera Bolo	T. Residuos	Aserrín	Costanera
Total	5565,7	1367,08	556,57	810,51
Aserrios de tecnología atrasada	5565,7	1367,08	556,57	810,51
Aserrios de tecnología avanzada	0	0	0	0

2018

	Madera Bolo	T. Residuos	Aserrín	Costanera
Total	5323,6	1384,13	532,36	851,77
Aserrios de tecnología atrasada	5323,6	1384,13	532,36	851,77
Aserrios de tecnología avanzada	0	0	0	0

II.6 Metodología con enfoque de Economía Ecológica para evaluar la sostenibilidad de biomásas.

La figura II.1 presenta la metodología propuesta, la misma parte de determinar las potencialidades energéticas por fuentes de biomásas a través de una valoración energética y como complemento la valoración medioambiental a través de indicadores de sostenibilidad.

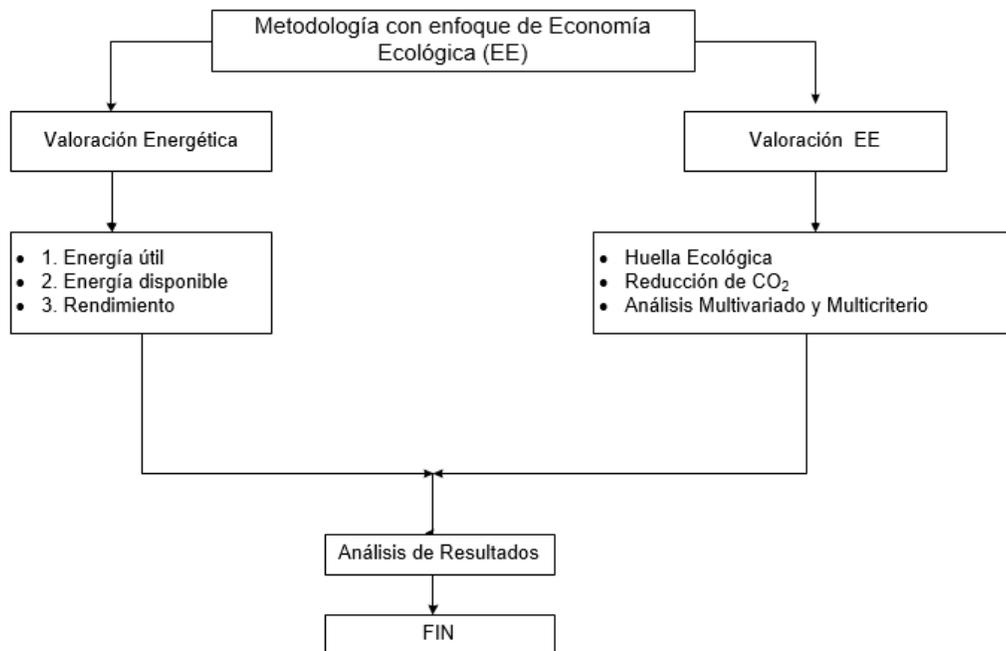


Figura II.1 Metodología con enfoque de Economía Ecológica. Fuente (Elaboración propia)
Las expresiones para el cálculo de la energía total, puede ser estimadas mediante las ecuaciones siguientes:

$$E_{\text{total}} = B_{\text{prod}} * PCS_{b,s} \text{ Ec. II.1}$$

Donde:

E_{total} → Energía total (MJ)

B_{prod} → Cantidad de biomasa producida (kg)

$PCS_{b,s}$ → Poder calórico Superior en base seca (MJ/kg)

La energía utilizada se calcula utilizando la ecuación Ec 2.2

$$E_{\text{útil}} = B_{\text{comb}} * PCS_{b,s} \text{ Ec. II.2}$$

Donde:

E_{util} → Energía utilizada (MJ)

B_{comb} → cantidad de biomasa utilizado como combustible (kg)

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{total}}} \text{ Ec. II.3}$$

II.7 Calculo de Huella Ecológica

El cálculo de la huella ecológica es complejo, y en algunos casos imposible, lo que constituye su principal limitación como indicador; en cualquier caso, existen diversos métodos de estimación a partir del análisis de los recursos que una persona consume y de los residuos que produce. La cantidad de hectáreas utilizadas para urbanizar, generar infraestructuras y centros de trabajo.

- Hectáreas necesarias para proporcionar el alimento vegetal necesario.
- Superficie necesaria para pastos que alimenten al ganado.
- Superficie marina necesaria para producir peces.
- Hectáreas de bosque necesarias para asumir el CO₂ que provoca nuestro consumo energético. En este sentido no solo incidiría el grado de eficiencia energética alcanzado sino también las fuentes empleadas para su obtención: a mayor uso de energías renovables, menor huella ecológica.

Desde un punto de vista global, se ha estimado en 1,8 ha² la biocapacidad del planeta por cada habitante, o lo que es lo mismo, si tuviéramos que repartir el terreno productivo de la tierra en partes iguales, a cada uno de los más de seis mil millones de habitantes en el planeta, les corresponderían 1,8 hectáreas para satisfacer todas sus necesidades durante un año. Con los datos de 2005, el consumo medio por habitante/año es de 2,7 hectáreas, por lo que, a nivel global, estamos consumiendo más recursos y generando más residuos de los que el planeta puede generar y admitir.

$$\text{Huella } \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}}\right) = \frac{\text{Emisiones (TonCO}_2\text{)}}{\text{C. Fijación } \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}}\right)} + \text{Superficie } \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}}\right) \text{ Ec. II.4}$$

Donde:

C. Fijación → Capacidad de fijación de CO₂ de la superficie forestal.

Con el aprovechamiento de las fuentes de biomasa desde el punto de vista energético se logra una reducción en el empleo de combustibles fósiles para determinado proceso, esto permite la reducción de las emisiones de CO₂ a la

atmosfera y por consiguiente la mitigación del cambio climático. La determinación de la cantidad de CO₂ dejado de emitir a la atmosfera puede ser determinado mediante la ecuación II.5

$$E = E_a * FE \text{ Ec. II.5}$$

Donde:

E→ Emisiones (kW/año)

E_a→ Energía ahorrada (kW/año)

FE→Factor de emisión (0,001127 tCO₂/kW)

II.8 Análisis multivariado a través del método AHP

Este método fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un Modelo Jerárquico. El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un Modelo Jerárquico que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas.(Barba-Romero, 1998) (Martínez, 1998) (FULCRUM, 2000)

Una vez construido el Modelo Jerárquico, se realizan comparaciones de a pares entre dichos elementos (criterios-subcriterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por las personas, entregando una síntesis de las mismas mediante la agregación de esos juicios parciales. El fundamento del proceso de Saaty descansa en el hecho que permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende.(Thomas Saaty, 1998)

Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica propuesta por el mismo Saaty, que va desde 1 hasta 9. Una vez obtenido el resultado final, el AHP permite llevar a cabo el análisis de sensibilidad.

Algunas de las ventajas del AHP frente a otros métodos de Decisión Multicriterio son:

- Presentar un sustento matemático.
- Permitir desglosar y analizar un problema por partes.
- Permitir medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común.
- Incluir la participación de diferentes personas o grupos de interés y generar un consenso.
- Permitir verificar el índice de consistencia y hacer las correcciones, si es del caso.
- Generar una síntesis y dar la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad; ser de fácil uso y permitir que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

II.9 Base Matemática del AHP

El AHP trata directamente con pares ordenados de prioridades de importancia, preferencia o probabilidad de pares de elementos en función de un atributo o criterio común representado en la jerarquía de decisión. Creemos que este es el método natural (pero refinado) que la gente siguió al tomar decisiones mucho antes que se desarrollaran funciones de utilidad y antes que se desarrollara formalmente el AHP” (Thomas Saaty, 1998). El AHP hace posible la toma de decisiones grupal mediante el agregado de opiniones, de tal manera que satisfaga la relación recíproca al comparar dos elementos. Luego toma el promedio geométrico de las opiniones. Cuando el grupo consiste en expertos, cada uno elabora su propia jerarquía, y el AHP combina los resultados por el promedio geométrico” (Thomas Saaty, 1998).

II.10 Esquema Metodológico del AHP

II.10.1 Estructuración del Modelo Jerárquico

Una de las partes más relevantes del AHP, consiste en la estructuración de la jerarquía del problema, etapa en la cual el grupo decisor involucrado debe lograr desglosar el problema en sus componentes relevantes.

La jerarquía básica está conformada por: meta u objetivo general, criterios y alternativas. Ver en la **Figura II.2**

Los pasos a seguir para la estructuración del modelo jerárquico son:

1. Identificación del Problema.
2. Definición del Objetivo.
3. Identificación de Criterios.
4. Identificación de Alternativas.

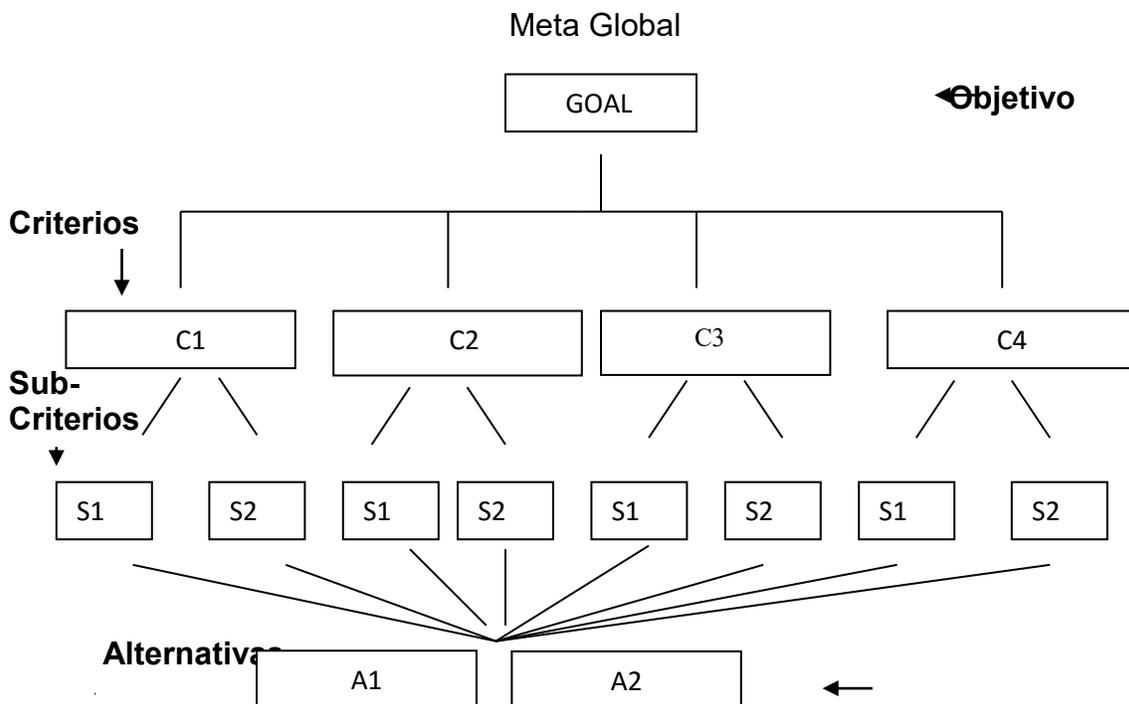


Figura II.2 Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP. Fuente (Saaty, 1998)

II.10.2 Identificación del Problema

Es la situación que se desea resolver mediante la selección de una de las alternativas de las que se dispone o la priorización (ranking) de ellas. Dichas alternativas serán comparadas unas con otras mediante la evaluación de criterios establecidos que permitan conocer los pros y los contras incorporados en cada una de ellas.

Normalmente se requiere invertir varias horas para identificar el problema real y principal, lo cual puede darse después de una serie de discusiones en las que se han listado muchos problemas y es necesario priorizarlos y decidir cuál se seleccionará para su análisis.

II.10.3 Definición del Objetivo

Un objetivo es una dirección identificada para mejorar una situación existente. El objetivo está en un nivel independiente y los otros elementos de la jerarquía que serán los sub-objetivos o criterios, subcriterios y alternativas apuntan en conjunto a la consecución del mismo. Hay objetivos de largo, mediano y corto plazo y esta diferenciación influirá directamente en la construcción del modelo jerárquico.

El objetivo u objetivos serán establecidos por el grupo decisor involucrado. Vale la pena tener en cuenta que la definición de objetivos puede ser una tarea difícil porque algunas veces serán contrapuestos entre las personas. No obstante, los objetivos determinados finalmente deben representar las necesidades e intereses generales.

II.10.4 Identificación de Criterios

Son las dimensiones relevantes que afectan significativamente a los objetivos y deben expresar las preferencias de los implicados en la toma de decisión. Se deben incluir aspectos vitales cuantitativos y cualitativos a tener en cuenta en la toma de decisión. Normalmente hay aspectos cualitativos que pueden incidir fuertemente en la decisión, pero que no son incorporados debido a su complejidad para definirles algún esquema de medición que revele su grado de aporte en el proceso de toma de decisión.

II.10.5 Identificación de Alternativas

Corresponden a propuestas factibles mediante las cuales se podrá alcanzar el objetivo general. Cada una de las alternativas presenta características con pro y contras.

Conclusiones parciales

1. Fue posible a partir del levantamiento en cada unidad productora en la provincia estimar las cantidades de biomásas disponibles. En la industria azucarera se cuenta con un total de 70 716 t de bagazo sobrante, 186 618 t de cachaza y 234 241 t de paja en los centros de limpieza para las últimas tres zafras.
2. La cantidad de arroz secado por la UEB "La Paquita" en las últimas tres cosechas fue de 15 511,75 t de ello 10 214,05 t corresponde a cascarilla, esta última representando un gran problema de contaminación por el gran volumen que ocupa. Por otra parte, la cantidad de residuos generados en la industria agroforestal fue de 3 855,9 m³.
3. Se propuso una metodología que permite la evaluación con un enfoque integral en la utilización de la biomasa con fines energéticos. La misma incorpora indicadores de economía ecológica (Huella Ecológica, Reducción de CO₂ a la atmósfera y MDMC) a los ya tradicionales indicadores energéticos (Energía útil, Energía disponible), con el propósito de evaluar la sustentabilidad integral.

Capítulo III: *Evaluación de la sostenibilidad integral de
biomasas con enfoque de Economía Ecológica.*



Capítulo III: Evaluación de la sostenibilidad integral de las biomásas con enfoque de Economía Ecológica

III.1 Introducción al capítulo

En este capítulo a partir del levantamiento de cada fuente de biomasa se estima el potencial energético de cada una de ellas. Además, se obtiene la huella ecológica para cada una de estas biomásas, así como la reducción de CO₂ a la atmósfera. Finalmente se lleva a cabo la aplicación del método AHP para determinar el grado de sustentabilidad de cada alternativa propuesta complementándose con un análisis de sensibilidad.

III.2 Potencial energético de la biomasa cañera.

Para este cálculo se parte los principales residuos de la caña de azúcar con los usos totales y los utilizados actualmente en el territorio. Para calcular la energía total que se puede producir con el bagazo se utiliza la ecuación Ec. II.1

$$E_{\text{total}} = 1\,421\,267\,000\text{kg} * 17,3\text{MJ/kg}$$

$$E_{\text{total}} = 2,45 * 10^{10} \text{ MJ}$$

La energía utilizada se calcula utilizando la ecuación Ec. II.2

$$E_{\text{util}} = 1\,350\,551\,000\text{kg} * 17,3\text{MJ/kg}$$

$$E_{\text{util}} = 2,33 * 10^{10} \text{ MJ}$$

Entonces la eficiencia con que se utiliza la energía del bagazo puede ser determinada mediante la ecuación Ec. II.3

$$\eta = \frac{23364532,3}{24587919,1} * 100\%$$

$$\eta = 95,10\%$$

Por otro lado, la energía total que se puede alcanzar a partir de la cantidad de cachaza disponible es:

$$E_{\text{total}} = 1\,866\,180\,000 \text{ kg} * 14,5 \text{ MJ/kg}$$

$$E_{\text{total}} = 2,7 * 10^9 \text{ MJ}$$

Se estimaron además la energía útil para los casos de residuos de cosecha y cascarilla de arroz siendo estos resultados:

Residuos de Cosechas

$$E_{total} = 234241000 \text{ kg} * 17,2 \text{ MJ/kg}$$

$$E_{total} = 4,02 * 10^9 \text{ MJ}$$

Cascarilla de arroz

$$E_{total} = 10214050 \text{ kg} * 16,6 \text{ MJ/kg}$$

$$E_{total} = 1,69 * 10^8 \text{ MJ}$$

Finalmente, el potencial energético de los residuos aserraderos obtenidos con los usos totales y los utilizados actualmente en el territorio fue de:

$$E_{total} = Ra_{prod} * PCS_{b.s}$$

$$E_{total} = 3855900 \text{ kg} * 18,5 \text{ MJ/kg}$$

$$E_{total} = 7,13 * 10^7 \text{ M}$$

III.3 Resultados del potencial energético para las fuentes de biomasa.

En este epígrafe se presentará los resultados calculados del potencial energético para las diferentes fuentes de biomasa. Para el análisis de la energía total en cada una de las fuentes de biomasa restantes se utilizó la expresión II.1, solo el bagazo por ser utilizado como combustible fue posible estimar una energía útil y eficiencia en el proceso. La tabla III.1 resume el potencial energético para todas las biomasa en estudio

Tabla III.1:Resultados del potencial energético para las fuentes de biomasa. Fuente (Elaboración propia.)

Fuentes de Biomasa	E _{Total}	E _{útil}	Rend. %
Bagazo	2,45*10 ¹⁰ MJ	2,33*10 ¹⁰ MJ	95,10%

Cachaza	2,7*10 ⁹ MJ
Residuos de Cosecha	4,02*10 ⁹ MJ
Cascarilla de Arroz	1,69*10 ⁸ MJ
Residuos aserraderos	7,13*10 ⁷ MJ

III.4 Determinación de la huella ecológica de las distintas fuentes de biomasa.

III.4.1 Bagazo

Para determinar la huella ecológica del bagazo se debe conocer la energía ahorrada y la superficie cultivada, que son: $E_a = 24500000$ MJ; superficie= 50962,41ha

$$\text{Huella} \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{Emisiones (tCO}_2\text{)}}{\text{C. Fijación} \left(\frac{\text{tCO}_2}{\text{ha}} \right)} + \text{Superficie} \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right)$$

$$E = E_a * FE$$

$$E = 6\,805\,555,55 \text{ kWh} * 0,001127 \text{ tCO}_2/\text{kWh}$$

$$E = 7\,669,86 \text{ tCO}_2$$

Donde

E: Emisiones (kWh/año)

E_a : Energía ahorrada (kWh/año)

FE: Factor de emisión (0,001127 tCO₂/kWh)

$$\text{Huella} \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right) = \frac{7\,669,86 \text{ (t CO}_2\text{)}}{0,1505 \left(\frac{\text{tCO}_2}{\text{ha}} \right)} + 50962,41 \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right)$$

$$\text{Huella} = 101924,94 \frac{\text{ha}}{\text{año}}$$

Cachaza

Para determinar la huella ecológica de la cachaza, se procede de similar forma donde los parámetros son: $E_a = 2,7 \cdot 10^9$ MJ; superficie= 50962,41ha.

$$E = E_a \cdot FE$$

$$E = 7.51 \cdot 10^8 \text{ kWh} \cdot 0,001127 \text{ tCO}_2/\text{kWh}$$

$$E = 846\,377 \text{ tCO}_2$$

$$\text{Huella} \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right) = \frac{846\,377 (\text{tCO}_2)}{16,60 \left(\frac{\text{tCO}_2}{\frac{\text{ha}}{\text{año}}} \right)} + 50962,41 \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right)$$

$$\text{Huella} = 101948,97 \frac{\text{ha}}{\text{año}}$$

Residuos de cosecha

Para determinar la huella ecológica de los residuos de cosecha conocemos la: $E_a = 4,02 \cdot 10^9$ MJ; y la superficie cultivada de 50962,41ha.

$$E = E_a \cdot FE$$

$$E = 1119151444.44 \text{ kWh} \cdot 0,001127 \text{ tCO}_2/\text{kWh}$$

$$E = 1\,261\,283,68 \text{ tCO}_2$$

$$\text{Huella} \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right) = \frac{1\,261\,283,68 (\text{tCO}_2)}{24,74 \left(\frac{\text{tCO}_2}{\frac{\text{ha}}{\text{año}}} \right)} + 50962,41 \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right)$$

$$\text{Huella} = 101943,34 \frac{\text{ha}}{\text{año}}$$

Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz presenta una energía ahorrada de $E_a = 1,69 \cdot 10^8$ MJ; y una superficie cultivada de 48522,9 ha

$$E = E_a \cdot FE$$

$$E = 47098119,44 \text{ kWh} \cdot 0,001127 \text{ tCO}_2/\text{kWh}$$

$$E = 53\,079,58 \text{ tCO}_2$$

$$\text{Huella} \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right) = \frac{53\,079,58 (\text{tCO}_2)}{1,09 \left(\frac{\text{tCO}_2}{\frac{\text{ha}}{\text{año}}} \right)} + 48522,9 \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right)$$

$$\text{Huella} = 97\,219,76 \frac{\text{ha}}{\text{año}}$$

Residuos aserraderos

Finalmente, para determinar la huella ecológica de los residuos aserraderos se tiene que: $E_a = 7,13 \cdot 10^7$ MJ; superficie igual a 28522,9 ha

$$E = E_a \cdot FE$$

$$E = 19815041,67 \text{ kWh} \cdot 0,001127 \text{ tCO}_2/\text{kWh}$$

$$E = 22\,331,55 \text{ tCO}_2$$

$$\text{Huella} \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right) = \frac{22\,331,55 (\text{tCO}_2)}{0,782 \left(\frac{\text{tCO}_2}{\text{ha}} \right)} + 28522,9 \left(\frac{\text{ha}}{\text{año}} \right)$$

$$\text{Huella} = 57079,86 \frac{\text{ha}}{\text{año}}$$

III.5 Desarrollo del modelo AHP

Para aplicar la técnica AHP, se hace necesario establecer un sistema de asesoramiento de expertos para identificar/modificar las opciones 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.

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 III.1.

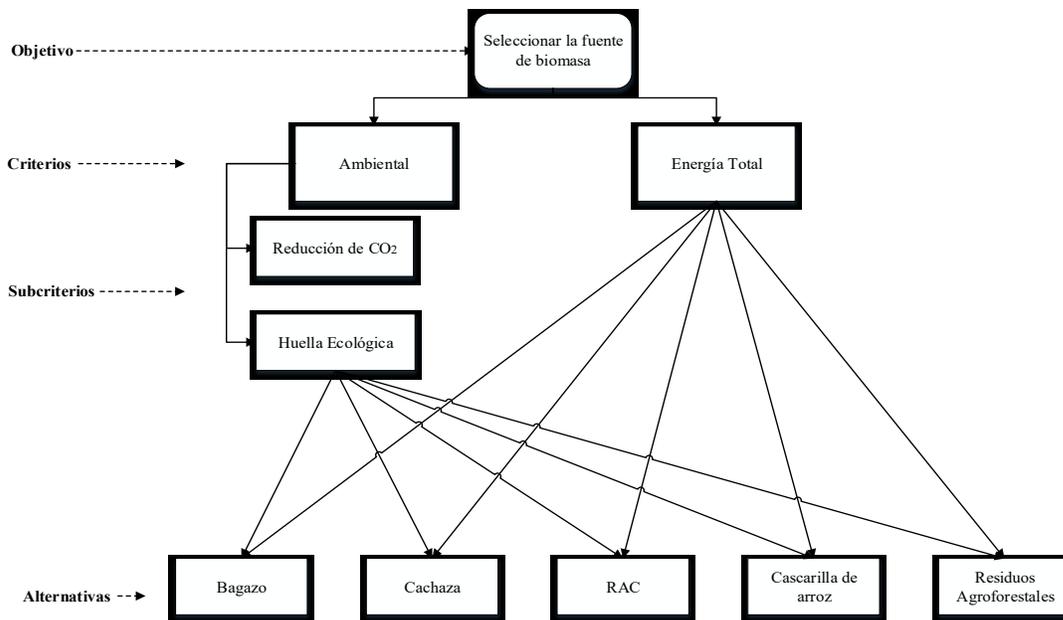


Figura III.1 Estructura jerárquica. Fuente: (Elaboración propia)

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 III.1). En el modelo, los factores son considerados como un grupo. Por lo tanto, el grupo principal comprende el criterio ambiental y energía total; el segundo grupo está formado por nodos secundario del criterio ambiental que incluyen reducción de CO₂ y huella ecológica. Las alternativas están dadas por las fuentes de biomasa existentes en el territorio, las cuales son: Bagazo, Cachaza, RAC, Cascarilla de arroz y Residuos agroforestales.

III.6 Aplicación del AHP

La matriz (Tabla III.1) se dispuso en base a los factores identificados de criterio ambiental y energía total desarrollados en el transcurso de la investigación, y la calificación numérica para la comparación de cada elemento se asignó de la escala de nueve puntos de Saaty (Tabla II.2).

En la matriz de 2×2, mostrada en la Tabla III.1, 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 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 III.1 indica que el juicio 3 ingresado en la primera fila de la segunda columna expresa que el criterio ambiental se considera ligeramente más importante que el criterio de energía total.

Tabla III.1 Comparación matricial por pares de los criterios con respecto a la meta. Fuente: (Elaboración propia)

Criterio	Ambiental	Energía total	Vector de prioridad (PVE)
Ambiental	1	3	0,75
Energía total	0,333333333	1	0,25

De la tabla anterior se observa como a partir de la comparación matricial por pares de los criterios con respecto a la meta el vector de prioridad (PVE) indica que se le asignó mayor peso al criterio ambiental con respecto al criterio técnico (Energía total). La Tabla III.3 presenta la computación del PVE

Tabla III.3 Computación del vector de prioridad local. Fuente: (Elaboración propia)

Criterio	Ambiental	Energía total	Vector de prioridad (PVE)
Ambiental	0,75	0,75	0,75
Energía total	0,25	0,25	0,25

Para realizar una verificación de consistencia de los juicios, primeramente, se determina el principio de valor propio ($\lambda_{\text{máx}}$) utilizando el producto de matrices siguientes.

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.75 \\ 0.25 \end{bmatrix} = \lambda_{\text{máx}} \begin{bmatrix} 0.75 \\ 0.25 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1.5 \\ 0.49 \end{bmatrix} = \lambda_{\text{máx}} \begin{bmatrix} 0.75 \\ 0.25 \end{bmatrix}$$

El valor de $(\lambda_{\text{máx}})_{\text{promedio}}$ se obtiene resolviendo la matriz dada anteriormente, $(\lambda_{\text{máx}})_{\text{promedio}} = 3.96$. Por consiguiente, al utilizar la ecuación (III.1), el índice de consistencia (CI) se calcula como:

$$CI = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} = \frac{3.96 - 2}{2 - 1} = 1.96 \quad \text{III.1}$$

La siguiente evaluación implica la comparación para derivar los efectos del sub-factor en el factor primo. En la Tabla III.4, el sub-factor Amb1 y Amb2 se comparan con respecto al criterio principal (Ambiental).

El criterio de huella ecológica se considera ligeramente más importante que la reducción de CO₂, los expertos consideran que el parámetro de huella ecológica consiste en evaluar el impacto sobre el planeta de un determinado modo o forma de vida y compararlo con la biocapacidad del planeta. Se trata, pues, de un indicador clave para la sostenibilidad.

Tabla III.4 Comparación matricial por pares de los sub-criterios con respecto a criterios relativos. Fuente: (Elaboración propia)

Criterio	Criterio ambiental (Amb)		Vector de prioridad (PVE)
Sub-criterio	Reducción de CO ₂	Huella Ecológica	
	(Amb1)	(Amb2)	
Amb1	1	0,33	0,25
Amb2	3	1	0,75

Los juicios sobre las comparaciones por pares de las alternativas con respecto a los sub-criterios se forjaron en base a los resultados alcanzados en los epígrafes: (III.2; III.3; III.4).

Por otra parte, la comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al subcriterio Amb1 está presentada en la tabla III.5. A partir de esto se traduce que el mayor peso o vector de prioridad de las alternativas con relación al subcriterio de reducción de CO₂a la atmósfera fue para los residuos forestales con un PVE de 0,5130 seguido de la cascarilla de arroz con un PVE de 0,2731.

Tabla III.5 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al subcriterio Amb1. Fuente: (Elaboración propia)

Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al subcriterio Amb1						
Alternativa	Bagazo	Cachaza	RAC	Cascarilla de arroz	Residuos forestales	Vector de prioridad (PVE)
Bagazo	1	0,25	0,3333333	0,1428571	0,111111111	0,035827002
Cachaza	4	1	2	0,25	0,166666667	0,106332561
RAC	3	0,5	1	0,2	0,142857143	0,071552885
Cascarilla de arroz	7	4	5	1	0,333333333	0,273190759
Residuos forestales	9	6	7	3	1	0,513096793

La tabla III.6 presenta la comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al subcriterio de huella ecológica. En la misma se computaron con mayor peso los vectores de prioridad los pertenecientes a las fuentes de biomasa igual que para el caso del subcriterio anterior. Los residuos forestales con un vector de prioridad (PVE) de 0,5135 y la cascarilla de arroz con un PVE de 0,3026 respectivamente.

Tabla III.6 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al subcriterio Amb2. Fuente: (Elaboración propia)

Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al subcriterio Amb2						
Alternativa	Baga	Cacha	RA	Cascarilla de	Residuos	Vector de

	zo	za	C	arroz	forestales	prioridad (PVE)
Bagazo	1	2	2	0,1666667	0,142857143	0,080583947
Cachaza	0,5	1	0,5	0,1428571	0,111111111	0,041478098
RAC	0,5	2	1	0,1666667	0,142857143	0,061796068
Cascarilla de arroz	6	7	6	1	0,333333333	0,302606901
Residuos forestales	7	9	7	3	1	0,513534987

Sin embargo, desde el punto de vista del criterio de energía total sucede algo diferente, el bagazo presenta el mayor peso de prioridades con relación a las restantes alternativas evaluadas. Esta muestra un vector de prioridad PVE de 0,5765, seguido de los RAC con un PVE de 0,1915. Es decir, estas dos biomásas tienen un mejor desempeño desde el punto de vista de energía total disponible que las restantes fuentes de biomásas. La tabla III.7 resume la comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al criterio de energía total.

Tabla III.7 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al criterio de energía total. Fuente: (Elaboración propia)

Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al criterio de energía total						
Alternativa	Bagazo	Cachaza	RAC	Cascarilla de arroz	Residuos forestales	Vector de prioridad (PVE)
Bagazo	1	6	5	8	9	0,576569628
Cachaza	0,1666667	1	0,5	3	4	0,130514156
RAC	0,2	2	1	4	5	0,191576677
Cascarilla de arroz	0,125	0,33333333	0,25	1	2	0,060917518
Residuos forestales	0,1111111	0,25	0,2	0,5	1	0,040422021

En consecuencia, el compuesto o las prioridades finales de las alternativas se determinan sintetizando todas las matrices. La síntesis es el proceso en el cual el vector de prioridad local de alternativas se multiplica por el vector de prioridad

local de cada criterio y se agrega para obtener el vector de prioridad final (peso global) de cada alternativa.

Sin embargo, cuando un criterio consiste en sub-criterios, primero la calificación de cada alternativa se multiplica por los pesos de los sub-criterios, que luego se agregan para obtener el vector de prioridad local de alternativas con respecto a cada criterio. Después, el vector de prioridad local de alternativas obtenido se multiplica por el vector de prioridad local de cada criterio y luego se agrega para obtener el peso global de cada alternativa. El criterio ambiental consiste en dos sub-criterios: Amb1 y Amb2, por lo tanto, el vector de prioridad local de alternativas para el criterio ambiental se puede determinar mediante la siguiente matriz.

$$\begin{bmatrix} \text{Bagazo} & 0,035827 & 0,080584 \\ \text{Cachaza} & 0,1063326 & 0,041478 \\ \text{RAC} & 0,0715529 & 0,061796 \\ \text{Arroz} & 0,2731908 & 0,302607 \\ \text{Residuos forestales} & 0,5130968 & 0,513535 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \text{Amb1} & 0,25 \\ \text{Amb2} & 0,75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,06939471 \\ 0,05769171 \\ 0,06423527 \\ 0,29525287 \\ 0,51342544 \end{bmatrix}$$

Posteriormente, estos vectores de prioridad local de alternativas se multiplican con los pesos de cada criterio para determinar las prioridades generales de alternativas, que se dan a continuación en la matriz de prioridades generales de las alternativas

$$\begin{bmatrix} 0,06939471 & 0,576569628 \\ 0,057691714 & 0,130514156 \\ 0,064235272 & 0,191576677 \\ 0,295252865 & 0,060917518 \\ 0,513425439 & 0,040422021 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,75 \\ 0,25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Bagazo} & 0,19618844 \\ \text{Cachaza} & 0,075897324 \\ \text{RAC} & 0,096070623 \\ \text{Arroz} & 0,236669028 \\ \text{Residuos forestales} & 0,395174584 \end{bmatrix}$$

El control de consistencia para las matrices de comparación de las tablas III.5, III.6 y III.7 se muestran a continuación

Tabla III.8 Control de consistencia para la matriz de comparación mostrada en la Tabla III.5.

Principio del valor propio ($\lambda_{\text{máx}}$) promedio	5,22
Indice de consistencia (CI)	0,06
Relacion de consistencia (CR)	0,05

Tabla III.9 Control de consistencia para la matriz de comparación mostrada en la Tabla III.6.

Principio del valor propio ($\lambda_{\text{máx}}$) promedio	5,2
Indice de consistencia (CI)	0,05
Relacion de consistencia (CR)	0,05

Tabla III.10. Control de consistencia para la matriz de comparación mostrada en la Tabla III.7.

Principio del valor propio ($\lambda_{\text{máx}}$) promedio	5,2
Indice de consistencia (CI)	0,05
Relacion de consistencia (CR)	0,04

En cada uno de los tres casos se está en presencia de consistencia en cada uno de los juicios emitidos. Para cada uno de los casos la relación de consistencia CR fue menor de 0,1, es decir $CR \leq 0,1$.

La figura III.2 presenta los pesos locales de las alternativas bajo cada criterio de decisión, la misma evidencia como los residuos forestales desde el punto de vista de reducción de CO₂ y Huella Ecológica presenta el mayor peso local (38,51%), seguido de la cascarilla de arroz (22,14%). Mientras que en el caso del bagazo su mayor peso lo tiene de acuerdo con el criterio de energía total (14,41%).

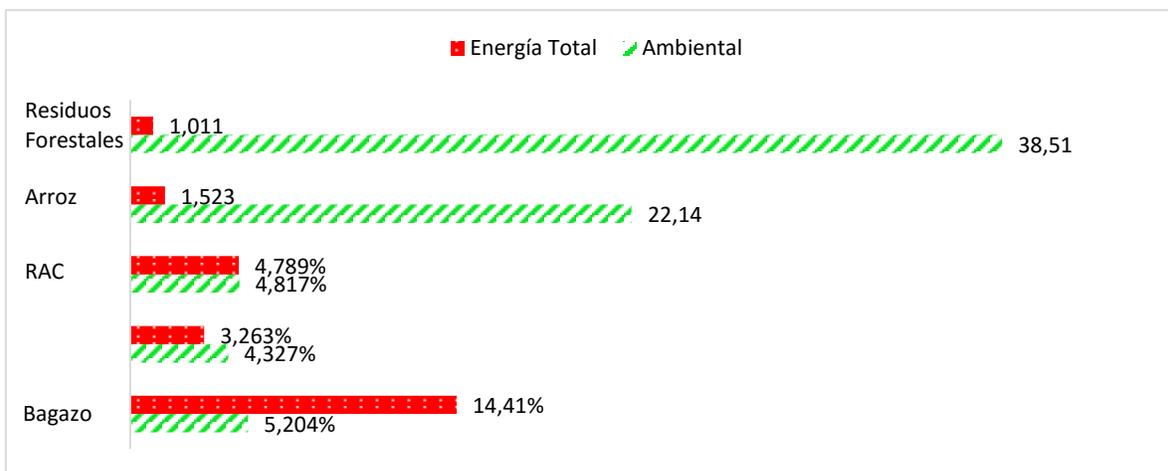


Figura III.2. Pesos locales de las alternativas bajo cada criterio de decisión. Fuente: (Elaboración propia)

Análisis de sensibilidad

Mediante el análisis de sensibilidad se puede constatar cómo varían las clasificaciones generales de las alternativas para la selección de la fuente de biomasa con respecto a cambios en las prioridades de los criterios o sub-criterios. Este análisis es muy utilizado en estudios que incluyen evaluación subjetiva para validar la solidez de los resultados (Al Garni et al., 2016).

Considerando un escenario de igual peso (50% para cada criterio), los resultados muestran que en este caso el bagazo presenta el mayor peso (32,3%), y los residuos agroforestales (27,7%). Es decir, en un escenario de iguales pesos a los criterios de Huella Ecológica y Reducción de CO₂ el bagazo es la biomasa de mayor sustentabilidad general. La figura III.3 presenta la clasificación de las alternativas para criterios con igual peso.

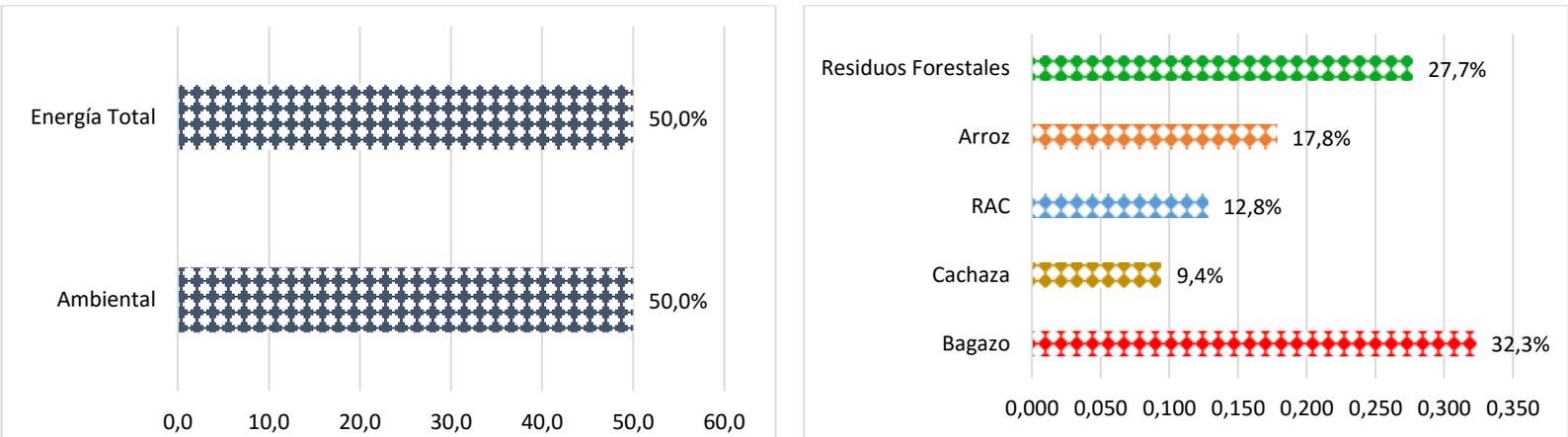


Figura III.1. Clasificación de las alternativas para criterios con igual peso. Fuente: (Elaboración propia)

Conclusiones parciales

1. A partir de la evaluación del potencial energético fue posible determinar que el bagazo presenta la mayor energía total con $2,45 \cdot 10^{10}$ MJ, así como la energía útil de $2,33 \cdot 10^{10}$ MJ. Por otro lado, la huella ecológica fue determinada en 101 924 h/año
2. Para el caso de la cachaza, Residuos de cosecha, Cascarrilla de arroz y residuos aserraderos la energía total y (huella ecológica) fueron de $2,7 \cdot 10^9$ MJ (101 932,25 h/año), $4,02 \cdot 10^9$ MJ (101 930,34 h/año), $1,69 \cdot 10^8$ MJ (97 110 h/año), $7,13 \cdot 10^7$ MJ (57 119,02 h/año) respectivamente.
3. A partir de la aplicación del método AHP se evidenció que de acuerdo con el criterio de reducción de CO₂ y Huella Ecológica el vector de prioridad local (PVE) mayor correspondió a los residuos forestales (PVE=0,5130), (PVE=0,5135) respectivamente. Esta biomasa según este criterio es más sustentable que el resto de las biomásas
4. De acuerdo con la comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al criterio de energía total el bagazo PVE=0,576 fue la biomasa de mejor resultado de acuerdo con este criterio. Es decir, presenta el mayor aporte energético de todas las restantes biomásas.

CONCLUSIONES GENERALES



CONCLUSIONES GENERALES

1. Uno de los ejes estratégicos para nuestro país es el desarrollo de las fuentes renovables de energía en particular la biomasa, esta constituye en estos momentos una tarea priorizada ya que como proyección para el 2030 se prevé alcance un crecimiento de un 14 % en comparación con el 3,5 % de participación en estos momentos.
2. Fue posible a partir del levantamiento en cada unidad productora en la provincia determinar las cantidades de biomasa disponibles. En la industria azucarera se cuenta con un total de 70 716 t de bagazo sobrante, 186 618 t de cachaza y 234 241 t de paja en los centros de limpieza para las últimas tres zafras.
3. La cantidad de arroz secado en las últimas tres cosechas fue de 15 511,75 t, de ello 10 214,05 t corresponde a cascarilla, esta última representando un gran problema de contaminación por el gran volumen que ocupa. Por otra parte, la cantidad de residuos generados en la industria agroforestal fue de 3 855,9 m³.
4. A partir de la evaluación del potencial energético fue posible determinar que el bagazo presenta la mayor energía total con $2,45 \cdot 10^{10}$ MJ, así como la energía útil de $2,33 \cdot 10^{10}$ MJ. Por otro lado, la huella ecológica fue determinada en 101 924 h/año.
5. Para el caso de la cachaza, residuos de cosecha, cascarilla de arroz y residuos aserraderos la energía total y (huella ecológica) fueron de $2,7 \cdot 10^9$ MJ (101 932,25 h/año), $4,02 \cdot 10^9$ MJ (101 930,34 h/año), $1,69 \cdot 10^8$ MJ (97 110 h/año), $7,13 \cdot 10^7$ MJ (57 119,02 h/año) respectivamente.
6. A partir de la aplicación del método AHP se evidenció que de acuerdo con el criterio de reducción de CO₂ y Huella Ecológica el vector de prioridad local mayor (PVE) correspondió a los residuos forestales (PVE=0,5130), (PVE=0,5135) respectivamente. Esta fuente de biomasa según este criterio es más sustentable que el resto.

7. De acuerdo con la comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al criterio de energía total, el bagazo con un PVE=0,576 fue la biomasa de mejor resultado de acuerdo con este criterio. Es decir, presenta el mayor aporte energético de todas las restantes biomásas.

8. A partir de considerar un escenario de igual peso (50% para cada criterio) y mediante un análisis de sensibilidad los resultados mostraron que para el caso del bagazo este presenta el mayor peso (32,3%), los residuos agroforestales (27,7%). Es decir, en un escenario de iguales pesos, según los criterios de Huella Ecológica y Reducción de CO₂ el bagazo es la biomasa de mayor sustentabilidad general.

RECOMENDACIONES



RECOMENDACIONES

1. Evaluar otros indicadores de economía ecológica como el ACV para la evaluación de la sustentabilidad.
2. Ampliar el estudio con el levantamiento del marabú como fuente de biomasa a emplearse con fines energéticos.

BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

- Barba-RomeroCasillas, S. (1998). Conceptos y Soportes Informáticos de la Decisión Multicriterio Discreta. EN: Evaluación y Decisión Multicriterio. Reflexiones y Experiencias. Santiago de Chile, Chile: Editorial Universidad de Santiago. p 47-68.
- Curbelo, A.; Garea Moreda, B; Valdés Delgado, A. (2016). Generación de electricidad a partir del bagazo en Cuba. Recuperado de: (https://scholar.google.com/cu/scholar?q=related:3N-zGj5Dw7kJ:scholar.google.com/&scioq=&hl=es&as_sdt=0,5).
- De Lorenzi, O. (1958) "El bagazo como combustible en la Industria Azucarera Mexicana". Boletín Azucarero Mexicano. México.
- Doménech, J.L. (2007). "Huella Ecológica y Desarrollo Sostenible". Madrid, España: AENOR.
- Douglas, B. (2018). *Renewables 2017 Global Status Report*. Paper presented at the Cuba Sustainable Energy Forum, La Habana.
- FULCRUM INGENIERIA LTDA. (2000) Ingeniería en Toma de Decisiones. El Proceso Analítico Jerárquico. EN: Taller Internacional Planificación Estratégica y Territorial mediante el uso de Métodos Multicriterio, Santiago, Chile.
- Giuntoli, J., Agostini, A., Caserini, S., Lugato, E., Baxter, D. & Marelli, L. (2016). Climate change impacts of power generation from residual biomass. *Biomass and Bioenergy*. 89, 146-158. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.024>
- Guerra, R. (2016). Cartelera de oportunidades de inversión extranjera 2016 - 2017.
- Hernández, B. (2018). *Oportunidades de inversiones en Bioeléctricas*. Paper presented at the 1st International Fair "Energías Renovables Cuba 2018", La Habana, Cuba.
- Hugot, E. (1980) Manual para ingenieros azucareros.: Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba.
- MacGillivray, A. y Zadek, S. (1996) "Medir la Sustentabilidad: *Reflexión sobre el arte de hacer que funcionen los indicadores*". vol.151(218) pp. 139-175, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Martínez Alier, J. (1995) "indicadores de sustentabilidad y conflictos distributivos ecológicos". *Ecología Política*, (10), 35-43.
- Martínez, E, Escudey, M. (1998).- EVALUACION Y DECISION MULTICRITERIO: Reflexiones y Experiencias. Evaluación y Decisión Multicriterio: Una Perspectiva. Primera Edición en editorial Universidad de Santiago. Chile [Junio de 1998, pp 9-16.](#)
- MINAZ. (1993). Los residuos agrícolas cañeros (RAC) vistos como combustible nacional", Documentos del Consejo Técnico, área industrial del MINAZ, Sección 3,
- Torres, J (1999).: Biomasa cañera y electricidad. Recuperado de: https://scholar.google.com/cu/scholar?cluster=1150583416711168219&hl=es&as_sdt=2005&scioldt=0,5&scioq=Biomasa+ca%C3%B1era+y+electricidad
- Oficina Estadística de AZCUBA. (2019). Análisis multivariado de los residuos de la caña de azúcar, Cuba
- Oficina Municipal de Estadística (2019). Producciones de granos de Cienfuegos. Recuperado de: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6537>
- Oficina Municipal de Estadística (2019). Madera aserrada y residuos generados en los tres últimos años. Recuperado de: <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/RRNA/article/view/361>
- Piñas, J. V. (2014). Evaluación del potencial de generación energética con cascara de arroz en la zona del Huallaga Central del Departamento de San Martín.
- Salvador, A. R. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles, *104(2)*, 331–345.
- SAATY, T (1998). Método Analítico Jerárquico (AHP): Principios Básicos. EN: Evaluación y Decisión Multicriterio. Reflexiones y Experiencias. Editado por Eduardo Martínez y Mauricio Escudey. Editorial Universidad de Santiago. pp 17-46.
- Sawin, J. (2016). *Energías renovables 2016. Reporte de la situación mundial*. París, Francia.
- [Van Hawermeiren, S \(1998\). Manual de Economía Ecológica. Santiago de Chile.](#)

ANEXOS



ANEXOS

Anexo 1. Producción de biomasa como combustible de la caña de azúcar.



Anexo 2. Uso importante de los residuos de la caña de azúcar.



Anexo 3. Llenado de los sacos de café oro de la Empresa procesadora de Café
“Eladio Machín”



Anexo 4. Proceso de secado en la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”



Anexo 5. UEB La Paquita. Empresa de Granos de Aguada

