



Evaluación de los recursos biomásicos como fuente de energía en una comunidad rural

Biomass resource's assessment as a source of energy in a rural community

Eduardo Miguel Matheu-Muñiz^{1,*}, Cesar Arnaldo Cisneros-Ramírez¹, Arnold Jannsen^{III}, Ileana Pereda-Reyes^{II}, Deny Oliva-Merencio^I

I. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER. La Habana, Cuba

II. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos, CIPRO. La Habana, Cuba

III. Ghent University, Faculty of Engineering & Architecture, Department of Architecture & Urban Planning. Ghent, Belgium

* Autor de correspondencia: ematheum@mecanica.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 1 de septiembre de 2022

Aceptado: 31 de octubre de 2022

Resumen

En este trabajo, se realizó una estimación de las potencialidades de generación de energía con recursos biomásicos propios de la zona y se propuso un sistema de indicadores de sostenibilidad que evaluó el aporte del aprovechamiento de los recursos biomásicos al completo ecoturístico Las Terrazas. Se confirmó que los residuos biomásicos más importantes, son los ganaderos porcinos, que producen 3 m³ biogás/día, y los forestales provenientes de la sierra. En un total de 5 201 ha con recursos forestales, se estimó un potencial biomásico residual de 4 524,87 t/año,

que corresponde con un potencial energético aprovechable de 9,52 GWh/año. Se planteó un sistema de indicadores biofísicos que puede expresar el nivel de sostenibilidad que podría alcanzar el asentamiento a partir del mayor aprovechamiento de los recursos biomásicos disponibles.

Palabras claves: recursos biomásicos, comunidad rural, sostenibilidad, fuentes renovables de energía, potencial energético.

Abstract

In this work, an estimation was made of the potential for energy generation with biomass resources from the area, and a system of sustainability indicators was proposed to evaluate the contribution of the use of biomass resources to the eco-tourism complex Las Terrazas. It was confirmed that the most important biomass wastes are from pigs, which produce 3 m³ biogas/day, and forestry wastes from the mountains. In a total of 5 201 ha with forest resources, a residual biomass potential of 4 524,87 t/year was estimated,

which corresponds to a usable energy potential of 9,52 GWh/year. A system of biophysical indicators was proposed that can express the level of sustainability that the settlement could reach from the best use of the available biomass resources.

Key words: biomass resources, rural community, sustainability, renewable energy sources, energy potential.

Cómo citar este artículo:

Matheu Muñiz EM, Cisneros Ramírez CA, Jannsen A, Pereda Reyes I, Oliva Merencio D. Evaluación de los recursos biomásicos como fuente de energía en una comunidad rural. Ingeniería Mecánica. 2023;26(1):e664. ISSN 1815-5944.

1. Introducción

Dentro de las posibilidades energéticas y medioambientales de las distintas Fuentes Renovables de Energía, FRE, la biomasa, por su carácter limpio e inagotable, permite un gran desarrollo como recurso endógeno en aquellas áreas que cuentan con el potencial necesario para su aplicación. La implementación de proyectos que permitan el uso de recursos biomásicos abre la posibilidad de generar energía térmica (calor), electricidad, combustible para el transporte y productos químicos básicos [1-3]. La energía obtenida dependerá del tipo de residuo que se emplee, del tipo de proceso de aprovechamiento biomásico que se implemente y de la aplicación concreta que se pretende realizar con la instalación.

Para Cuba, se torna cada vez más importante el sector energético en todas sus modalidades, fundamentalmente, el que permite mostrar las potencialidades naturales autóctonas de la isla y que ofrecen la vía más limpia e inofensiva para el medio ambiente de ciudades, campos, playas y en otros entornos naturales del país. Es

indispensable fortalecer las opciones que dan respuesta a la demanda de soluciones ecológicas en escenarios insertados en ecosistemas de realce en cuanto a belleza y cultura nacional. Tal es el caso de la comunidad turística rural Las Terrazas, ubicada en la Sierra del Rosario en la provincia de Artemisa, Cuba, la cual se corresponde con una propuesta que ha ido tomando relevancia con el pasar del tiempo. Esta busca consolidar sus metas de solución ecológica y amigable con el entorno natural donde se vive, y se oferta un ambiente totalmente integrado a la naturaleza.

La mayoría de las actividades que se llevan a cabo en ese asentamiento poblacional, hotel y complejo turístico, demandan una cantidad de energía que se debe satisfacer para alcanzar el cumplimiento de los planes trazados. La mayor parte del consumo energético del Complejo, hoy se satisface a través del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) con el consabido gasto de combustible fósil. En muchas ocasiones, en las comunidades rurales, las soluciones energéticas se basan en el uso de micro-redes integradas o sistemas de FRE aislados del SEN. Debido al entorno en el que se inserta la comunidad Las Terrazas, la posibilidad de empleo de los recursos biomásico con fines energéticos debe ser estudiado. El asentamiento residencial y el complejo turístico están ubicados en plena Sierra del Rosario la que debe ofrecer una cantidad importante de recursos forestales para su aprovechamiento como fuente renovable. Un elemento esencial para la sostenibilidad de los bosques es el manejo cultural del mismo que comprende labores de limpieza, clareo, raleo, poda y extracción de las ramas secas, arbustos o árboles muertos. Esas actividades mantienen el vigor y la salud del bosque [3-4].

Para asegurar un alto nivel de sostenibilidad de los bosques, o de la biomasa producida por los mismos, es indispensable que haya una salida de aprovechamiento, que puede ser la bioenergía (calor, electricidad o combustibles) o la obtención de compuestos químicos [5]. La biomasa residual forestal debe ser un recurso atractivo como materia prima energética en esta zona, debido a su abundancia, lo mismo que para ciertas regiones en el mundo [6], y casi siempre es subutilizada. El empleo de los residuos forestales implicaría, además de aumentar la sostenibilidad del monte y de la zona, un paso hacia la transición a la economía circular [7,8], además de prevenir la propagación de incendios y plagas, favorecer a regeneración natural, el crecimiento del arbolado y el hábitat de la fauna silvestre, mejorando la estética del bosque aumentando la capacidad de acogida recreativa. Es indispensable realizar estudios que esclarezcan las potencialidades existentes en cuanto a recursos biomásico que pudieran aportar a las soluciones energéticas que fortalezcan el desarrollo integral de la comunidad, contribuyendo a la sostenibilidad de la zona [9].

El trabajo desarrollado por Baburam Rijal [6] fue enfocado en el impacto de las perturbaciones para el suministro de la biomasa forestal provocadas por incendios forestales e infecciones de insectos que interrumpen los planes de adquisición de la materia prima; de allí la importancia de la recolección y almacenamiento de los residuos forestales para su posterior aprovechamiento energético. Los resultados muestran que, a medida que aumenta la tasa de perturbación, disminuye el área disponible para la extracción de madera, lo que lleva a una reducción de estos. El método propuesto para evitar la disminución de los residuos forestales complementa el proceso de planificación de la producción de madera convencional y debería apoyar a mantener cadenas de suministro sólidas, al tiempo que facilita la adopción de los principios de la economía circular.

K. Winans [7], en su trabajo plantea la historia, desafíos y aplicaciones actuales del concepto de economía circular donde un tema central del concepto es la valoración de los residuos dentro de un sistema de circuito cerrado con el objetivo de permitir el uso de los recursos naturales mientras se reduce la contaminación o se evitan las limitaciones de recursos y se sostiene el crecimiento económico.

Sam Van Holsbeeck [9], plantea un estudio sobre la biomasa forestal y la viabilidad de instalaciones para transformar los residuos forestales en bioenergía, así tener un aprovechamiento energético de estos y crear sistemas con residuos ceros aplicando conceptos de economía circular. Como resultado de este estudio proporciona información sobre la distribución de la biomasa para identificar la ubicación óptima de estas instalaciones energéticas.

En este trabajo, se llevó a cabo una estimación de las potencialidades de generación de energía con recursos biomásico propios de la zona y se propuso un sistema de indicadores de sostenibilidad que evalúe el aporte del aprovechamiento energético de los recursos biomásico al completo eco-turístico Las Terrazas. Como principales resultados obtenidos se confirmó que los residuos biomásico más importantes, son los ganaderos porcinos, que producen 3 m³ biogás/día, y los forestales provenientes de la sierra con un potencial biomásico residual de 4 524,87 t/año, que se corresponde con un potencial energético aprovechable de 9,52 GWh/año. Se planteó un sistema de indicadores biofísicos que puede expresar el nivel de sostenibilidad que podría alcanzar el asentamiento a partir del mayor aprovechamiento de los recursos biomásico disponibles

2. Métodos y Materiales

2.1. Caracterización de la comunidad rural-complejo ecoturístico Las Terrazas

Las Terrazas, es una comunidad turística rural de desarrollo sostenible, ubicada en las cercanías del río San Juan, dentro de la Sierra del Rosario, en la Provincia de Artemisa a 77 km de la Habana.

Fundada el 28 de febrero de 1971, ocupa un área de 22 ha y tiene una población cercana a los 1 000 habitantes. Su núcleo central se compone de 69 viviendas unifamiliares aisladas, sobre terrazas de 3,50 m. Hacia la parte sur se localizan 10 edificios multifamiliares biplantas con un total de 117 apartamentos, con un promedio de 5 miembros de habitantes por viviendas (entre apartamentos y casas aisladas). Cuenta con una plaza central

en su punto más alto, donde se encuentran las principales instalaciones de servicio, con un hotel más al sur que posee 46 habitaciones (Hotel MOKA), además de cafeterías y restaurantes que conforman una buena red de servicios. En términos biomásicos, los recursos potenciales que deben ser estudiados deben ser los residuos sólidos urbanos (RSU) que se generan en el Complejo Las Terrazas (en la comunidad, en las cafeterías, restaurantes, oficinas, mercados, servicios a la población, hotel, entre otros) y los residuos que se generan en las áreas boscosas cercanas que se obtienen a partir de la realización de las labores culturales que necesita el monte para mantener vitalidad. Además, hay que mencionar a las aguas residuales que se generan de igual manera en los mismos lugares de acción humana que deben llevar un porcentaje de biomasa disuelta que debe ser objeto de atención.

2.2. Estimación de los recursos biomásicos en los RSU

Los puntos de recolección se encuentran dispersos. En la zona de edificios de vivienda están establecidos 8 puntos recolectores bien definidos, cada uno posee 3 tanques de 55 galones. En la zona de viviendas unifamiliares los puntos de recolección no están bien definidos (informales), cada 6-7 casas disponen de un tanque de 55 galones (equivalente a 250 litros aproximadamente). La recogida se realiza con un tractor (camión), el cual hace el recorrido regularmente cada 3 días. Se colectan aproximadamente 2 t de residuos inorgánicos. El vertedero de la comunidad se encuentra aproximadamente a 4 km de la comunidad, este tiene un área aproximada de 1 600 m².

El principal interés biomásico de estos residuos para su aprovechamiento en la comunidad, se centra en la Fracción Orgánica de los RSU (FORSU). Como resultado de esta investigación, se reveló que la FORSU se recolecta por los comunitarios en sus propias viviendas y se destina a la alimentación de la cría porcina de la localidad. En algunos de los puntos principales de servicios gastronómicos, los RSU no se recogen por la falta de depósitos para ello, como es el caso del restaurante El Almácigo, que desaprovecha sus residuos orgánicos en un 75 %. Por esta razón, desde el punto de vista de una solución energética, se excluyó el posible aprovechamiento de la FORSU en la comunidad.

2.3. Estimación de los recursos biomásicos en los residuos ganaderos

En este aspecto, la visión es la probable producción de biogás a partir de los residuos ganaderos disponibles. La localidad cuenta con una amplia gama de especies de animales, como son: caballos, gallinas, guanajos, patos, vacas, cerdos y chivos, pero por la dispersión en que habitan dichas especies dentro de la comunidad, y la imposibilidad de concentrarlos debido a la escasez en números de miembros, no representan un potencial importante. Solo se pudo determinar la cantidad promedio de residuos provenientes del ganado porcino, son los únicos que se encuentran estabulados.

Actualmente, el estiércol del ganado porcino se aprovecha con fines energéticos pues se lleva a un reactor anaerobio convencional, modelo hindú de tipo campana móvil y sistema semicontinuo. Este biodigestor solo tiene una capacidad de hasta 50 m³ de residuos, por lo que es considerado un biodigestor de pequeña capacidad.

Tabla 1. Descripción del ganado porcino existente en la comunidad rural Las Terrazas. Fuente: autores

Estado del animal	Índice en crianza (%)	Cantidad
Engorde 20 a 50kg	0,320	57
Engorde 50 a 100kg	0,560	10
Madre seca	0,010	6
Madre gestante	0,075	15
Madre lactando	0,032	11
Semental	0,003	3
Totales	1,000	102

El biodigestor se localiza en la parte posterior del establo porcino de la comunidad y está funcionando con una producción de 3 m³ de biogás al día que pudiera abastecer aproximadamente a 6 vivienda, figura 1. Sin embargo, solo se abastece al círculo infantil de la localidad y una casa, por lo que se considera que la producción de biogás está siendo limitada y su capacidad, subutilizada.



Fig. 1. Biodigestor de cúpula móvil instalado en el establo porcino. Fuente: autores

2.4. Estimación de los recursos biomásicos en los residuos forestales

Los bosques de la Sierra del Rosario que rodean la comunidad se denominan bosques semidecíduos sobre suelo calizo o bosques semidecíduos mesófilo, con tres categorías fundamentales: bosques productores, bosques protectores de las aguas y los suelos, y bosques de conservación. Estos bosques semidecíduos son aquellos que pueden alcanzar alturas de hasta 30 m, constituidos por dos capas arbóreas y una arbustiva, la capa herbácea falta normalmente. Es característico que los árboles más altos pierdan sus hojas durante la época más seca mientras que los de la segunda capa arbórea los conserven normalmente todo el año, esto responde a adaptaciones del clima tropical. La superficie boscosa que rodea la comunidad rural Las terrazas tiene un total de 5 384,3 ha, dividida en tres categorías que se muestran y caracterizan en la tabla 2.

Tabla 2. Superficie de los bosques según sus categorías.
Fuente: datos tomados de una Estación Forestal de la zona

Categorías de Bosques	Superficie (ha)			%
	Forestal	Inforestal	Total	
Bosques productores	4 207,3	143,3	4 350,6	80,8
Bosques protectores de las aguas y los suelos	854,8	27,1	881,9	16,4
Bosques de conservación	137,7	14,1	151,8	2,8
Total	5 201,0	184,5	5 384,3	100,0

De las especies que se pueden encontrar en los bosques entorno a la comunidad Las Terrazas, las principales son el Pino, la Majagua y el Ocuje, tabla 3. Entre éstas, ocupan más del 45 % de toda la superficie boscosa.

Tabla 3. Características de las tres especies principales de árboles.
Fuente: datos tomados de una Estación Forestal de la zona

Características	Pino	Majagua	Ocuje
Área (ha)	626,2	1 533,6	317,9
V/ha (m ³ /ha)	193,8	274,8	82,4
Volumen total (Miles de m ³)	121,36	421,43	26,2
Edad media (años)	20	33	31
Incremento Medio Anual (m ³ /ha/año)	9,7	8,3	2,7
Incremento Total anual (Miles de m ³)	4,8	10,8	3,5

De todo lo relativo a la actividad biomásica forestal lo más significativo es conocer la potencialidad de producción de residuos forestales y sus características generales para la producción de biomasa. Es importante conocer en qué momento etario es más conveniente aprovechar el árbol o arbusto y las labores culturales para cada etapa (poda, clareo, raleo, etc.), que son las tareas que generan residuos por limpieza e higiene del monte [10].

2.5. Estimación del potencial biomásico de los residuos forestales

Como parámetros de predicción de la biomasa residual potencial para cada tipo de monte se definen los coeficientes de potencialidad λ_i y V_j de acuerdo con la ecuación (1) [11].

$$PB_j = S_j * \delta_j \quad (1)$$

Donde:

PB_j : es la biomasa residual potencial obtenida en un sistema biológico de características j en $t/año$.

S_j : es la superficie del sistema de características j (ha).

Δ_j : es el coeficiente de potencialidad superficial de producción de biomasa residual en un monte de características j (t de biomasa residual/ha y operación)

El subíndice j hace referencia a la especie dominante, edad, número de árboles por hectárea, diámetro medio de los árboles, altura media de la vegetación, determinada operación realizada en su gestión (clareo, poda, corta final selectiva, apertura de camino, limpieza etc..) y tecnología empleada en la extracción de la biomasa residual generada.

2.6. Indicadores biofísicos de sostenibilidad

Los indicadores de sostenibilidad se han definido como pequeñas piezas de información que reflejan el estado de sistemas más amplios. Tienen la capacidad de hacer más sencillos los análisis sobre los sistemas complejos, lo que ayuda a las comunidades a determinar dónde están, hacia donde van, y lo lejos o cerca que están de los objetivos de sostenibilidad. Esta medida de sostenibilidad de la comunidad se divide en tres categorías interrelacionadas que reflejan los de la sostenibilidad: indicadores sociales, económicos y medioambientales. Independientemente del tipo de indicadores seleccionados, es importante que la comunidad sea la fuente principal de la identificación e implementación de los indicadores de sostenibilidad.

Los indicadores de sostenibilidad proporcionan señales para medir el progreso hacia objetivos que contribuyen conjuntamente al bienestar humano y al bienestar de los ecosistemas [12].

Resulta interesante como se puede enlazar una propuesta de sistema de indicadores biofísicos, asociado a la sostenibilidad energética, ambiental y que considere fuertemente las oportunidades de uso de la biomasa como fuente renovable de energía para cubrir las necesidades energéticas de la comunidad contribuyendo a definir el nivel de sostenibilidad del mismo.

- Cantidad de residuos forestales recolectados del bosque (t/mes).
Se define el potencial para la producción de residuos forestales asociados a las labores de poda, limpieza del bosque, raleo, extracción de ramas secas y muertas, tala controlada, etc., que puede estar disponible en la zona. El indicador debe expresar cual es el porcentaje de los residuos forestales que se colectan de la sierra y que llegan al Complejo con relación al potencial conocido. Mientras mayor y más cerca del potencial, mejor.
- Cantidad de residuos forestales para energía (t/mes)
Se define como el porcentaje de los residuos forestales que se destinan a generar energía con relación al total de los residuos forestales recolectados del bosque. Mientras mayor, mejor.
- Sistema de generación de energía con biomasa (#).
Debe definir si existen sistemas donde se emplee residuos forestales para la generación de energía de cualquier tipo (térmica, mecánica o eléctrica). Mientras más sistemas hayan, mejor.
- Cubrimiento eléctrico por biomasa (kWh generado desde biomasa/ kWh consumido) (%).
Se define como el porcentaje que relaciona los kWh que son generados a partir de recursos biomásico (residuos forestales) y los kWh consumidos en el Complejo comunitario. Mientras mayor, mejor.
- Cubrimiento térmico por biomasa (kWh generado desde biomasa/ kWh consumido) (%).
Se define como el porcentaje que relaciona los kWh que son generados a partir de recursos biomásico (residuos forestales) y los kWh consumidos en el Complejo comunitario. Mientras mayor, mejor.
- Empleos vinculados al manejo de biomasa energética (#).
Se define por el número de empleos que existen asociados a las instalaciones vinculadas al manejo de los residuos forestales destinados a la generación de energía y que son ocupados por los pobladores de la zona. Mientras mayor, mejor.
- Diesel o *Fuel oil* sustituido por biomasa (l/mes).
Hasta ahora, toda la demanda energética de la Comunidad, y del Complejo ecoturístico, se cubre por medio de combustible fósil. Mayoritariamente por vía eléctrica tomando la electricidad del SEN, que se alimenta de *Fuel oil* o diesel. Los kWh que se cubran con biomasa implicara un ahorro de kWh generados por estos combustibles fósiles. Mientras mayor, mejor.
- Cantidad de CO₂ evitado (tCO₂/mes).
El empleo de recursos biomásico para la generación energética implica una disminución de la concentración de CO₂ en la atmósfera por su carácter neutro en términos de ciclo del carbono. Cada kWh aportado por los residuos forestales, evita la emisión de CO₂ que contribuiría a enrarecer la atmosfera. Este indicador pretende contabilizar esta contribución. Mientras mayor, mejor.

Se realiza una propuesta de un método de diagramación para evaluar la sostenibilidad de un proyecto. La ventaja principal del método, es que permite hacer análisis comparativos del nivel de sostenibilidad, ya sea tanto de dos o más proyectos en manejo, como de un solo proyecto en varios momentos a lo largo del tiempo. El método consiste en la elaboración de un gráfico radial o matriz tipo telaraña, el cual está compuesto por una serie de ejes que parten de un origen común y tienen un límite superior. La cantidad de ejes representa el número de indicadores a analizar. El origen o punto cero representa el valor más crítico del indicador, mientras que el

límite superior señala el valor ideal a alcanzar por éstos. El diagrama se conforma con la convergencia de todos los valores obtenidos de los indicadores que están señalados en los ejes.

3. Resultados y Discusión

3.1. Consumo energético del complejo Las Terrazas

La comunidad tiene una demanda eléctrica de aproximadamente 156 588,0 kWh/mes. Entre los servicios que representan un 64,36 % con un consumo de 100 788 kWh/mes y las viviendas con un 55 800 kWh/mes lo que representa un 35,63 % del consumo aproximado de toda la comunidad. La fuente principal de abastecimiento energético es la convencional, con la energía eléctrica proveniente de la red nacional. La población realiza todas sus actividades domésticas y sociales con energía eléctrica de forma absoluta, Para cocinar, cuentan con recipientes individuales de gas licuado que se cambia cada seis meses. El gas licuado solo se usa para casos de emergencia, el resto del tiempo todo el consumo de energía en la comunidad es tomado del SEN.

En la tabla 4, se muestra el consumo eléctrico mensual (kWh) de los principales servicios con los que cuenta el Complejo Las Terrazas. Estos servicios son los que mayor consumo de energía tienen dentro de la comunidad. Algunos de estos servicios se encuentran a metros o incluso a kilómetros del núcleo central de la comunidad, pero su consumo pertenece a la misma.

Se puede decir que toda la energía eléctrica que necesitan estos servicios se obtiene de la red nacional, siendo este uno de los puntos débiles que resta sostenibilidad al Complejo ecoturístico Las Terrazas y que debe ser valorado su satisfacción a partir de fuentes de energía autóctonas.

Tabla 4. Consumo total de los principales servicios en la comunidad. Fuente: autores

Nombre del servicio	Consumo total (kWh/mes)
Hotel Moka	46 126,32
Las Ruinas	3 094,44
Casa del campesino	2 113,88
Cafetería El Almacigo	4 500,00
Comedor Las Terrazas	1 790,00
Nevera	5 009,44
Fábrica de helado	1 524,44
Casa de botes	1 625,55
Eco restaurante El Romero	1 285,55
Cabaña 33 y 34	1 155,50
Oficina del complejo	2 753,33
Oficina LA forestal	1 935,55
Rancho curujey	3 197,77
Discoteca	1 655,55
Baño San Juan	6 316,66
Café Aire libre	1 020,00
Panadería	7 060,00
Total	100 788,00

3.2. Valorización energética de los residuos orgánicos

En cuanto a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos ya se comentó que se colecta por los moradores de la comunidad y se dedica 100% al alimento animal, fundamentalmente de los cerdos que tienen en crianza, por lo que no tiene ningún interés en constituirse en recurso biomásico con fines energéticos.

Por tanto, se determina que el análisis de valorización energética de las principales fuentes o potencialidades de los residuos se centre sólo en el estudio de los residuos ganaderos (específicamente el residual porcino) y los residuos forestales.

3.3. Residuos ganaderos

Según la cantidad de cerdos que tienen estabulados en la comunidad, y la categorización de los mismos, se realiza un análisis de la potencialidad energética que tiene en términos de producción de biogás.

En la tabla 5, se muestra los datos de partida que se tuvieron para desarrollar el cálculo del potencial de producción de biogás de los residuales porcinos.

Tabla 5. Datos para el análisis de biogás aportado por los residuos porcinos. Fuente: autores

Estado del animal	Cantidad	Índice de la producción de excreta (m^3 /animal/mes)	Producción de excreta (m^3 /mes)	Producción excreta de (m^3 /día)	kg agua residual/día
Engorde 20 a 50kg	57	0,25	14,25	0,480	475
Engorde 50 a 100kg	10	0,30	3,00	0,100	100
Madre seca	6	0,48	2,88	0,096	96
Madre gestante	15	0,27	4,05	0,140	135
Madre lactando	11	0,81	8,91	0,300	297
Semental	3	0,28	0,84	0,030	28
Totales	102		33,93	1,130	1 131

A partir de esta información, y considerando los parámetros más importantes que se deben tener en cuenta para la digestión anaerobia de este tipo de residuos, se calcula la cantidad de biogás que se puede esperar para las condiciones de explotación en la comunidad (tabla 6).

El potencial que se calcula para la producción de biogás a partir de los residuales porcinos en la comunidad de las Terrazas es de 3 m^3 por día. Es realmente pobre el potencial energético de estos residuos y no existen planes para aumentar la cantidad de animales.

Tabla 6. Resultado del cálculo de la producción de biogás según parámetros de los residuos porcinos. Fuente: [13,14]

Parámetros	Valor	Unidad
Sólidos Totales presentes en las aguas residuales porcinas (después de lavar)	0,02	%
Sólidos Volátiles presentes en las aguas residuales porcinas	0,85	%
Sólidos Volátiles Totales presentes en las aguas residuales	4,335	kg SV/día
Potencial de producción de metano desde residual porcino	0,4	m^3 CH ₄ /kg SV
Proporción porcentual de metano en el biogás	0,65	%
Potencial de producción de biogás desde residual porcino	0,615	m^3 biogás/kg SV
Producción estimada de biogás al día para la planta	3	m^3 biogás/día

3.4. Residuos forestales

Aplicando la ecuación (1), se obtiene la producción de biomasa residual para cada uno de las especies predominantes en la zona de la sierra del Rosario donde se ubica la Comunidad y Complejo ecoturístico Las Terrazas. En la tabla 7, se muestran los resultados que fueron obtenidos teniendo en cuenta la la distribución de edades de cada una de las especies estudiadas, y las operaciones que deben generar residuos a partir de actividades de limpieza en el bosque, dando lugar a biomasa forestal residual procedente de prácticas silvícolas, selección de brotes, clareos, podas, desbroces y cortes sanitario de ramas y cortezas.

Tabla 7. Cantidad del potencial de residuos que generan las tres especies principales ya estudiadas. Fuente: autores

Especies	S_j [Superficie ocupada por la especie j] (ha)	δ_j [Coeficiente de generación de biomasa residual de la especie j] (t/ha)	PB [Generación de residuos] (t/año)
Pino	626,2	0,94	586,68
Ocuje	317,9	0,62	197,94
Majagua	1533,6	0,89	1369,60
Total	2477,7	-	2154,22

Estos resultados son similares a otros encontrados en trabajos previos donde fueron estudiados algunos casos y referencias en los que se obtuvieron coeficientes de generación de biomasa residual forestal entre 0,65 y 1,21 t/ha/año, en diferentes escenarios [15,16].

A partir de los resultados del cálculo del potencial de generación de biomasa residual forestal, de las tres especies predominantes en la zona, se puede considerar que el promedio general del potencial de generación de residuos forestales por hectárea, en todo el territorio, es de 0,87 t/año [17]. En general, se identifican 5 201,0 ha categorizadas como forestales, tabla 2, por lo que se podría estimar que el potencial total de los residuos que genera la biomasa forestal en el bosque que rodea la comunidad, es de 4 524,87 t/año. Esta cantidad de residuos es la que estaría disponible anualmente para fines energéticos en la comunidad, teniendo en cuenta su poder calórico, necesidades en término de energía y posibilidades reales de aprovechamiento [18].

Es importante enfatizar la necesidad de mejorar la eficiencia de la política de manejo del territorio sobre las especies forestales de la localidad de manera que se garantice el potencial natural que tienen en función de la producción biomásica que de manera sostenible se puede extraer del bosque semidecidual de la Sierra del

Rosario [19], en general, y que rodea al omplejo. De igual forma, se hace indispensable hacer un análisis más exhaustivo para identificar como impacta el uso de estos recursos biomásicos propios en los niveles de sostenibilidad de enclave poblacional y de los servicios allí desarrollados.

3.5. Sistema de indicadores biofísicos de sostenibilidad

Resulta interesante como se puede enlazar un sistema de indicadores biofísicos, asociado a la sostenibilidad energética, ambiental y social, que considere fuertemente las oportunidades de uso de las FRE, fundamentalmente la energía de la biomasa en el complejo, para contribuir a definir, e incrementar, el nivel de sostenibilidad del mismo.

En una primera etapa se realizó un diagnóstico dentro del complejo sobre el empleo de los posibles recursos biomásicos disponibles para el asentamiento. Para tener la información mínima que se usa en este apartado, se llevaron a cabo visita a las viviendas, entrevistas a pobladores y trabajadores en las distintas entidades del complejo, varios recorridos para inspeccionar visualmente el manejo de las posibles fuentes. Ya se conoce que los residuos forestales, a partir de lo que se puede extraer de las labores de atención cultural al bosque, son los recursos biomásicos más importantes que tiene la zona. Por tanto, el sistema de indicadores que se presenta, se enfoca principalmente en el empleo de esos recursos con fines de generación energética:

- Cantidad de residuos forestales recolectados del bosque (t/mes)
- Cantidad de residuos forestales para energía (t/mes)
- Sistema de generación de energía con biomasa (#)
- Cubrimiento eléctrico por biomasa (kWhe generado desde biomasa/ kWhe consumido, %)
- Cubrimiento térmico por biomasa (kWht generado desde biomasa/ kWht consumido, %)
- Empleos vinculados al manejo de biomasa energética (#)
- Diesel o *Fuel oil* sustituido por biomasa (l/mes)
- Cantidad de CO₂ evitado (tCO₂/mes)

Para hacer el análisis, se valoraron 3 escenarios; en primer lugar la situación actual que tiene el asentamiento con relación al uso de los recursos biomásicos forestales residuales en tareas asociadas a la energía; en segundo lugar, el impacto de la posible instalación de un sistema para la generación de energía basado en la gasificación del recurso acoplado a un grupo de generación de energía térmica y eléctrica de forma combinada, CHP, *Combined Heat and Power*; y en último lugar, el impacto del montaje y puesta en marcha de un sistema de generación energética constituido por un combustor de residuos forestales acoplado a un motor de combustión externa Stirling para brindar energía mecánica o eléctrica.

Tabla 9. Estado general de los indicadores biofísicos para cada escenario estudiado. Fuente: autores

Indicadores biofísicos de sostenibilidad	Estado actual	Gasificación + Generador CHP	Combustión Motor Stirling
Cantidad de residuos forestales recolectados del bosque (t/mes)	Se realizan tareas silviculturales, pero no son suficientes (25 % del potencial) [28]	Se deben desarrollar todas las labores silviculturales para disponer de toda la cantidad posible, cercana al potencial, para alimentar los sistemas energéticos.	
Cantidad de residuos forestales para energía (t/mes)	Solo es posible contabilizar alguna leña individual. No se considera para los fines de este trabajo.	Toda la cantidad recolectada es para alimentar el sistema de generación de energía instalado.	
Sistema de generación de energía con biomasa (#)	No se dispone de ningún sistema para aprovechar los recursos biomásicos. No se consideran las cocinas tradicionales a leña.	Se dispone de un sistema basado en la gasificación del recurso y un generador CHP (317 kW)	Se dispone de un sistema basado en la combustión del recurso y un motor Stirling (MCE)(460 kW)
Cubrimiento térmico por biomasa (kWht generado desde biomasa/ kWht consumido, %)	No se cubre ninguna demanda térmica con biomasa. Toda la demanda se cubre con electricidad.	El CHP genera energía térmica (45 %) por lo que se puede cubrir hasta ese porcentaje.	No hay cubrimiento térmico, porque toda la energía térmica inicial se convierte en electricidad

Indicadores biofísicos de sostenibilidad	Estado actual	Gasificación + Generador CHP	Combustión Motor Stirling
Cubrimiento eléctrico por biomasa (kWhe generado desde biomasa/ kWhe consumido, %)	Toda la demanda de energía eléctrica que se tiene en la comunidad-complejo ecoturístico se cubre por el SEN (156 588 kWh/mes)	El CHP genera energía eléctrica (42 % del potencial) de forma por lo que puede cubrir ese porcentaje.	Toda la energía eléctrica generada se destina a cubrir la demanda existente.
Empleos vinculados al manejo de biomasa energética (#)	Hay un número bajo de empleos asociados al manejo forestal. Cifra no encontrada.	Se supone que la cantidad de empleo se triplicaría para satisfacer la demanda de los sistemas de generación de energía lo que estimularía las labores silviculturales.	
Diesel o <i>Fuel oil</i> sustituido por biomasa (l/mes)	Según los resultados de la indagación, toda la demanda energética se cubre con energía eléctrica. Significa que todos los kWh se generan con fósil (240g/kWh)	Tiene la capacidad de entregar 1 250 MWh al año según su potencia (104,17MWh/mes). Sustituye 25 t de <i>Fuel oil</i> .	Tiene la capacidad de entregar 1 820 MWh al año según su potencia (151,67MWh/mes). Sustituye 36,4 t de <i>Fuel oil</i> .
Cantidad de CO ₂ evitado (tCO ₂ /mes)	Toda la demanda energética se cubre con energía eléctrica del SEN, por lo que se asume el consumo de ese sistema, 240g/kWh (1kWh – 0,27CO ₂)	Al funcionar el sistema a plena capacidad se podrían evitar 40,1 tCO ₂ /mes	Al funcionar el sistema a plena capacidad se podrían evitar 58,4 tCO ₂ /mes

Estos resultados del análisis se llevan a un gráfico radial para valorar visualizar cómo influye en cada caso, la implementación de las soluciones que se estudian. Se asignan valores para realizar el gráfico según los valores de las contribuciones de cada caso al indicador en particular. En la figura 4, se muestran los resultados de este ejercicio gráfico.

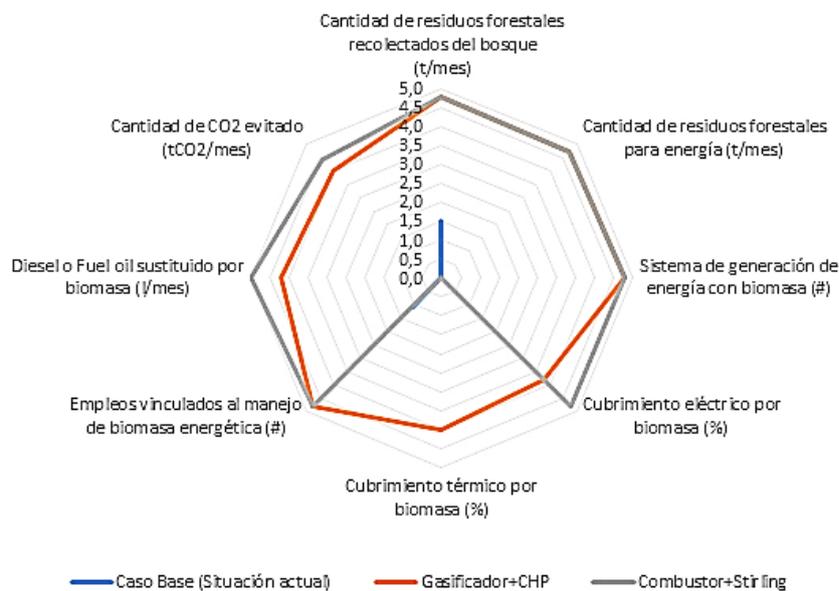


Fig. 4. Gráfico que representa la contribución de cada escenario a los indicadores de sostenibilidad que expresan la influencia del uso de los recursos residuales forestales con fines energéticos. Fuente: autores

Se puede observar en la figura 4, que la situación actual, en términos de aprovechamiento de los recursos biomásicos forestales de carácter residual, es realmente precaria. Responde a un nivel casi inexistente de sostenibilidad y se desperdicia el enorme potencial que tiene la zona para producir recursos renovables autóctonos para satisfacer una parte considerable de su demanda energética. Esta situación merece ser evaluada y se deben tomar acciones encaminadas a un mayor uso de los residuos forestales que puede proveer el entorno, lo que redundaría en una mejor atención silvicultural al bosque.

Obviamente, los niveles de sostenibilidad se incrementan cuando se implementan soluciones que llevan a la aplicación de sistemas de generación de energía que usan los recursos biomásicos residuales que puede ofrecer el monte. En el caso del sistema que propone la gasificación de los residuos forestales, produciendo una mezcla

de gases combustibles que se queman en un grupo electrógeno capaz de generar de manera combinada energía térmica y eléctrica, es una buena opción que solo muestra debilidad cuando se valora el cubrimiento de la demanda eléctrica y la térmica que tiene la comunidad-complejo. En este caso, el equipo entrega una parte del potencial energético del recurso biomásico en forma de calor y otro en forma de electricidad, sin poder cubrir 100 % ninguna de las dos necesidades. Sin embargo, es una buena variante a asumirse como posible solución, que debería definirse por los análisis económicos que se generen.

El segundo caso, es el sistema que propone la combustión del recurso entregándole la energía térmica completa a un motor Stirling, de combustión externa, para generar energía eléctrica. En esta variante se incrementa la potencia del equipo generador en detrimento de no poder cubrir ninguna porción de la demanda térmica que existe en el asentamiento. Esta variante llevaría incorporar otros medios auxiliares con el objetivo de solventar otras necesidades térmicas. Por lo demás, esta solución contribuye a incrementar el nivel de sostenibilidad de la comunidad.

El trabajo desarrollado tiene como limitante que no fue posible realizar experimentos de análisis químico elemental a los residuos forestales para obtener la composición química y elemental del mismo.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se propone un sistema de indicadores biofísicos de sostenibilidad que pueden expresar los niveles de sostenibilidad que tiene el asentamiento poblacional y de servicios de la comunidad Las Terrazas, en función del aprovechamiento que logra de los recursos biomásicos residuales que puede proveer el bosque como ente natural de suma importancia en la región. Se propusieron variantes de sistemas tecnológicos de generación de energía que aprovechan los residuos forestales, extraídos del monte en el entorno, que incrementan considerablemente los niveles de sostenibilidad del complejo ecoturístico y la comunidad rural, contribuyendo a cubrir la demanda energética existente e impulsando a mejorar su relación con la naturaleza que los acoge.

Agradecimientos

Agradecemos, por el acceso a bases de datos especializadas y gastos logísticos, al proyecto *Renewable energy and bioclimatic architecture improving sustainability and development in ecotouristic settlement: Las Terrazas*, de la Universidad de Gante; financiado por el grupo de apoyo a las universidades de la región de Flandes, en Bélgica.

Referencias

- Bajwa DS, Peterson T, Sharma N, Shojaeiarani J, Bajwa SG. A review of densified solid biomass for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;96:296–305. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040>
- Aberilla, JM, Gallego Schmid A, Stamford L, Azapagic A. Design and environmental sustainability assessment of small-scale off-grid energy systems for remote rural communities. *Applied Energy*. 2020;258:114004. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114004>
- Chowdhury H, Chowdhury T, Chowdhury P, Islam M, Saidur R, Sait SM. Integrating sustainability analysis with sectoral exergy analysis: A case study of rural residential sector of Bangladesh. *Energy & Buildings*. 2019. 202:109397. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109397>
- Ayala Mendivil N, Sandoval G. Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y Bosques*. 2018;24,e2401877. <http://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877>
- Santos A, Carvalho A, Barbosa Povoá AP, Marques A, Amorim P. Assessment and optimization of sustainable forest wood supply chains – A systematic literature review. *Forest Policy and Economics*. 2019;105,112–135. <http://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.05.026>
- Rijal B, Gautam SH, LeBel L. The impact of forest disturbances on residual biomass supply: A long-term forest level analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2020;248,119278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119278>
- Winans K, Kendall A, Deng H. The history and current applications of the circular economy concept. *Rew. Sust. Energ. Rev.* 2017;68,825e833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>
- Pukšec T, Foley A, Markovska N, Duić N. Life cycle to Pinch Analysis and 100% renewable energy systems in a circular economy at sustainable development of energy, Water and Environment Systems 2017. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;108,572–577. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.046>
- Van Holsbeeck S, Kumar Srivastava S. Feasibility of locating biomass-to-bioenergy conversion facilities using spatial information technologies: A case study on forest biomass in Queensland, Australia. *Biomass and Bioenergy*. 2020;139,105620. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105620>
- Hayashi T, Sawauchi D, Kunii D. Forest Maintenance Practices and Wood Energy Alternatives to Increase Uses of Forest Resources. In a Local Initiative in Nishiwaga. Iwate, Japan. *Sustainability*; 2017 <http://doi.org/10.3390/su9111949>
- Yáñez Iñiguez L, Urgilés Urgilés E, Zalamea León E, Barragán Escandón A. Potencial de los Residuos Forestales para la contribución a la Matriz Energética Urbana. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. 2020;32(2).42-53. <http://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.04>
- Hodge T, Hardi P, Bell D. Seeing Change Through the Lens of Sustainability. In: *Beyond Delusion: Science and Policy Dialogue on Designing Effective Indicators of Sustainable Development*. Costa Rica: The International Institute For Sustainable Development; 2007. Disponible en: <http://www.rmi.org/images/other/ER-InOpp-SeeingChange.pdf>
- Garfí A, Ferrer Martí L, Perez I, Flotats X, Ferrer I. Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecological Engineering*. 2011;37,2066-2070. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.018>

14. Barreda Del Carpio JE, Ancco Mamani MR, Nuñez Chambi AD, Aguirre Gamero CE, Tejada Meza K, Pacheco Pacheco GM. Co-Digestión de Tres Tipos de Estiércol (Vaca, Cuy y Cerdo) para Obtener Biogás en el Sur del Perú. *Revista De Investigaciones Altoandinas*. 2022;24(3),174-181. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.457>
15. Kumar A, Adamopoulos S, Jones D. Forest Biomass Availability and Utilization Potential in Sweden: A Review. *Waste Biomass Valorization*. 2021;12,65-80. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00947-0>
16. Villela Suárez JM, Aguirre Calderón OA, Treviño Garza EJ, Vargas Larreta B. Disponibilidad de residuos forestales y su potencial para la generación de energía en los bosques templados de El Salto, Durango. *Madera y Bosques*. 2018;24(3),e2431529. <http://doi.org/10.21829/myb.2018.2431529>
17. Morales Máximo M, García CA, Pintor Ibarra LF, Alvarado Flores JJ, Velázquez Martí B, Rutiaga Quiñones JG. Evaluation and Characterization of Timber Residues of Pinus spp. as an Energy Resource for the Production of Solid Biofuels in an Indigenous Community in Mexico. *Forests*. 2021;12,977. <https://doi.org/10.3390/f12080977>
18. Dupuy Parra JR, Garrido Montaya O, Guerra Maldonado G. Cálculo de cantidad de residuos para generación de electricidad utilizando la gasificación de la madera; una solución para mitigar impactos ambientales. *Revista ECOVIDA*. 2019;9(1):html.
19. González Díaz S, León Sánchez MA, Sotolongo Sospedra R, Góngora Rojas F. La modificación de los estratos del bosque y su incidencia sobre especies leñosas semidecíduas, Sierra del Rosario, Candelaria, Cuba. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 2014;61:5-11.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Eduardo Miguel Matheu Muñiz. <https://orcid.org/0000-0002-6187-2481>

Participó en el diseño de la investigación y en la revisión de la bibliografía, trabajó en la recolección y el procesamiento de los datos para el estudio, realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los indicadores biofísicos, en el análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.

Cesar Arnaldo Cisneros-Ramírez. <https://orcid.org/0000-0002-9969-801X>

Trabajó en la revisión bibliográfica, diseño de la investigación y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.

Arnold Janssen. <https://orcid.org/0000-0003-4950-4704>

Trabajó en la recolección y el procesamiento de los datos, en el análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.

Ileana Pereda-Reyes. <https://orcid.org/0000-0001-6517-4202>

Participó en el diseño de la investigación, en la recolección y el procesamiento de los datos resultad y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final

Deny Oliva Merencio. <https://orcid.org/0000-0001-8117-3605>

Participó en el diseño de la investigación, trabajó en la recolección de los datos, realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los indicadores biofísicos y en el análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.