

# 13

## EFFECTO AMBIENTAL DE LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA POR BIOGÁS DE LA PAJA DE ARROZ

### ENVIRONMENTAL EFFECT OF ENERGY VALORIZATION BY BIOGAS OF THE RICE STRAW

Luz María Contreras Velázquez<sup>1</sup>

E-mail: [lcontreras@umet.edu.ec](mailto:lcontreras@umet.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4101-712X>

Ileana Pereda Reyes<sup>2</sup>

E-mail: [iperedareyes@gmail.com](mailto:iperedareyes@gmail.com)

Lisbet Guillen Pereira<sup>1</sup>

E-mail: [lguillen@umet.edu.ec](mailto:lguillen@umet.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1132-541X>

Osvaldo Romero Romero<sup>3</sup>

E-mail: [osvaldo@uniss.edu.cu](mailto:osvaldo@uniss.edu.cu)

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

<sup>1</sup> Universidad Metropolitana. Ecuador.

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” La Habana. Cuba.

<sup>3</sup> Universidad de Sancti Spiritus “José Martí Pérez” Cuba.

#### Cita sugerida (APA, sexta edición)

Contreras Velázquez, L. M., Pereda Reyes, I., Guillen Pereira, L., & Romero Romero, O. (2019). Efecto ambiental de la valorización energética por biogás de la paja de arroz. *Revista Científica Agroecosistemas*, 7(1), 90-96. Recuperado de <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>

#### RESUMEN

El presente trabajo se centró en un análisis del efecto ambiental de la valorización energética por biogás de la paja de arroz que proviene de este cultivo. Se empleó la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) para comparar el perfil ambiental en dos escenarios con ayuda del software SimaPro versión 7.2 a través del método del Eco-indicador 99, que considera once categorías de impacto y tres de daños. El primer escenario se trata de la producción de arroz en las condiciones actuales (Variante I) y el segundo cuando se incluye como alternativa la valorización energética por biogás de la paja de arroz con el fin de generar electricidad (Variante II). Se evaluó a escala de laboratorio el potencial bioquímico de metano con la paja de arroz como única fuente de carbono a temperatura mesofílica (37°C) y termofílica (55°C). Con ayuda de la prueba no paramétrica de Mann-Whitney, se pudo demostrar que existía diferencia significativa para una probabilidad ( $P < 0,05$ ) del rendimiento de biogás a ambas temperaturas de trabajo.

#### Palabras clave:

Valorización energética, biogás, medio ambiente, paja de arroz, residuos arroceros.

#### ABSTRACT

The present work focused on an environmental analysis about the effect of the energy recovery by biogas of the rice straw. The methodology of life cycle analysis (LCA) was used to compare the environmental profile in two scenarios with the help of SimaPro software version 7.2 through the method Eco-indicator 99, which considers eleven impact categories and three damage categories. The first scenario concerns the production of rice under the current conditions (Variant I) and the second, when it is included as an alternative energy recovery by biogas from rice straw in order to generate electricity (Variant II). The biochemical potential of methane was evaluated on a laboratory scale with rice straw as the only carbon source, at mesophilic (37°C) and thermophilic (55°C) temperatures. With the help of the non-parametric U de Mann-Whitney test, it could be demonstrated that there was a significant difference for a probability ( $P < 0.05$ ) of the biogas yield at both working temperatures.

#### Keywords:

Energy valuation, biogas, environment, rice straw, rice residues.

## INTRODUCCIÓN

El manejo integrado de los residuos de cualquier fuente y especialmente de los agrícolas, es una necesidad a nivel mundial y específicamente en la región del Caribe (Kevin de Cuba, Burgos & Contreras-Lisperguer, 2008), teniendo en cuenta los volúmenes de generación actuales, su potencial energético y las demandas de energía en los procesos en los que se originan. Por ello, el desarrollo de tecnologías que permitan mejor aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, de bajos costos y que propicien la obtención de subproductos aprovechables, constituye un reto que la comunidad científica debe enfrentar con urgencia.

En el sector agrícola el cultivo de arroz constituye una de las actividades que aporta a las emisiones de GEI a nivel mundial (Gadde, Christoph & Reiner, 2009). El manejo o la disposición de sus residuos de cosecha y de beneficio industrial, es una problemática aún por resolver en países grandes productores de arroz. En el caso de los restos de la cosecha (paja de arroz) pese a que existen métodos disponibles para su uso como alimento animal, combustible para la cocina y fibras para pulpas de papel, entre otros (He, Pang, Liu, Li & Wang, 2008), existen cantidades significativas inutilizadas que contribuyen al impacto negativo sobre el medio ambiente.

La práctica más frecuente por los agricultores es quemar la paja en el campo, lo que genera gran concentración de emisiones al aire de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y otros en trazas como: óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), así como partículas que provocan la contaminación del lugar y zonas aledañas (Abril, Navarro & Abril, 2009). Otra práctica común es la incorporación de la paja de arroz al suelo. Debido al proceso de degradación natural que ocurre bajo estas condiciones, existen emisiones, entre otros, de gas metano a la atmósfera (Watanabe, Satoh & Kimura 1995).

Ante esta problemática ambiental, emerge la tecnología del biogás y se ha consolidado con impacto internacional. A través de ella además de facilitarse la depuración o el tratamiento de residuales orgánicos biodegradables mediante un proceso biológico, se obtiene un gas con valor combustible, que adquiere altos niveles de utilización como recurso energético (Montalvo & Guerrero, 2003; Chandra, Takeuchi & Hasegawa, 2012). El biogás se considera una fuente renovable de energía versátil ya que puede reemplazar combustibles fósiles en la producción de energía y calor, y más recientemente como combustible alternativo para vehículos (Weiland, 2010).

Si bien existen avances en los estudios con algunos residuos agroindustriales del arroz, aún quedan aspectos

por dilucidar sobre el comportamiento del proceso de degradación anaerobia cuando estas biomásas se emplean como única fuente de carbono, que justifiquen la posibilidad de implementación de esta tecnología como alternativa de tratamiento para estos desechos, a escala industrial. En muchos casos, las empresas arroceras están localizadas lejanas de otras fuentes de residuos y la posibilidad del mezclado es impracticable. Es necesario entonces un análisis de parámetros importantes que describan el comportamiento del proceso, cuando los residuos de la cosecha y la producción del arroz son utilizados como única fuente de carbono.

La actividad agrícola puede ser responsable de una serie de impactos sobre el medio natural, derivados fundamentalmente del uso de fertilizantes orgánicos y sintéticos, la actividad ganadera y otras actividades como el cultivo del arroz y la quema de residuos agrícolas. El arroz se cultiva en 113 países y se estima para el año 2025 una producción de 760 millones de toneladas, que generarán 1 140 millones de toneladas de paja (Gadde, et al., 2009).

Dentro de esta actividad, los campos de arroz constituyen una fuente significativa de emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ), uno de los principales gases de efecto invernadero GEI. Estos GEI provocan un aumento de la temperatura terrestre como resultado de la alteración en el balance energético de las capas de la atmósfera. Parte de la energía solar que llega a la Tierra, en forma de radiación de onda corta, es absorbida por la superficie terrestre y parte se refleja de nuevo a la atmósfera. Ese calor absorbido por la Tierra es devuelto en parte al espacio en forma de radiación de onda larga (radiación infrarroja), pero los GEI que se encuentran en las capas bajas de la atmósfera, retienen parte de esta radiación y la devuelven de nuevo a la Tierra (Correa, 2017), hecho que se produce de forma natural y trae consigo el aumento de la temperatura de la Tierra.

Según estudios realizados, el arroz originariamente crecía en suelos inundados de forma natural, por lo que la emisión de  $\text{CH}_4$  asociada podría considerarse una fuente de emisión natural. Sin embargo, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España reconoce que el aumento acelerado de la producción a nivel mundial, la intensificación del cultivo y el riego artificial han propiciado que estas emisiones sean consideradas como fuente antropogénica, y como tal, debe ser recogida en los Inventarios Nacionales de Emisiones (España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014).

La paja del arroz es la principal fuente de materia orgánica en los campos de arroz. Es una de las principales fuentes de nutrientes para el suelo ya que contiene un 40% de carbono, 5% de silicio, 1,5% de potasio, 0,6% de nitrógeno y 0,1% tanto de fósforo como de azufre. Sin embargo, a nivel mundial no existe un método de disposición final

de este residuo agrícola de forma amigable con el medio ambiente.

En este escenario, con una situación energética y ambiental altamente preocupante, la tecnología de biogás emerge como una fuente renovable de energía versátil ya que puede reemplazar combustibles fósiles en la producción de energía y calor, y más recientemente como combustible alternativo para vehículos, a la vez que utiliza como materia prima residuos agroindustriales, residuos sólidos urbanos entre otros y como subproducto del proceso se obtiene un lodo estabilizado con altas propiedades como biofertilizante (Barati, Aghbashlo, Ghanavati, Tabatabaei, Sharifi & Javadirad, 2017).

Al respecto se considera promover investigaciones que fundamenten las ventajas de la aplicación de la tecnología de digestión anaerobia como alternativa de energía renovable, capaz de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del cultivo de este cereal, a la vez que permite ahorrar en el consumo de agua y disminuir el uso de fertilizantes químicos. Sobre la base de lo anteriormente expuesto se plantea como objetivo general de este trabajo evaluar mediante análisis de ciclo de vida, el efecto ambiental de la valorización energética por biogás de la paja arroz para un caso de estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La experimentación se realizó en reactores de 2 L, a temperatura de  $37 \pm 1$  °C (mesofílico) y  $55 \pm 1$  °C (termofílico). En la figura 1 se muestran el esquema y una foto de la instalación. Se siguió el procedimiento descrito en el manual para la fermentación de materiales orgánicos (VDI-4630, 2006). Los experimentos se realizaron en triplicado y se reportan los resultados como valores promedio de cada experiencia.

Los residuos de arroz fueron pretratados físicamente y tamizados antes del ensayo. Durante 36 días se midió la producción de biogás y la composición en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . El potencial de biogás se determinó según la ecuación 1, de forma similar se calculó el potencial de metano  $y_{\text{CH}_4}$ , al multiplicar el volumen de biogás por la composición de metano (% volumétrico).

$$y_B = \sum_{t=0}^{t=36} \frac{V_B}{m_s} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,  $V_B$  representa el volumen de biogás acumulado durante el tiempo de digestión  $t$  ( $\text{Nm}^3$ ) y  $m_s$  la masa de sustrato adicionada al reactor en término de sólidos volátiles ( $\text{kg}_{\text{sv}}$ ).

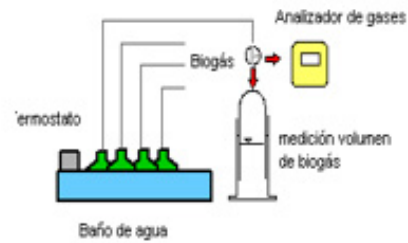


Figura 1. Esquema y foto del montaje experimental en discontinuo y analizador de gases.

La influencia de la temperatura en el rendimiento de biogás se analizó estadísticamente, mediante la prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney, para dos muestras independientes con ayuda del paquete estadístico SPSS versión 5.0.

### Evaluación de la digestión anaerobia de la paja de arroz en el reactor UASS

Diariamente se midieron el volumen de biogás y su composición ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ ) y además se analizaron periódicamente algunos parámetros químicos al sólido digerido y al líquido del proceso como: ST, SV,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$  y los ácidos grasos volátiles (AGV), entre otros, según los métodos estándar. Con la producción diaria de biogás se determinó el rendimiento de biogás ( $y_B$ ) y la velocidad de producción específica ( $r$ ) de acuerdo a las expresiones 2 y 3 (Mähnert, 2007).

$$y_B = \frac{Q_B}{m_0 \cdot c_0} = \frac{Q_B}{V_R \cdot B_V} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$r = \frac{Q_B}{V_R} = y_B \cdot B_V \quad \text{Ecuación 3}$$

Se analizó la implicación ambiental del tratamiento anaerobio de la paja de arroz y de la cogeneración de energía a partir del biogás, para el caso de estudio mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y se comparó el perfil ambiental de la producción de arroz actual (Variante I) con el perfil ambiental al incluirle esta propuesta de tratamiento (Variante II). Como producto final se tomó el arroz consumo y se asumió como unidad funcional la producción anual de 40 000 t en el año. En la figura 2

aparece un esquema que muestra los límites del sistema y los datos de las entradas y las salidas, recopilados durante la fase de inventario. El ACV se realizó con ayuda del software SimaPro versión 7.2 a través del método del Eco-indicador 99, que considera once categorías de impacto y tres de daños.

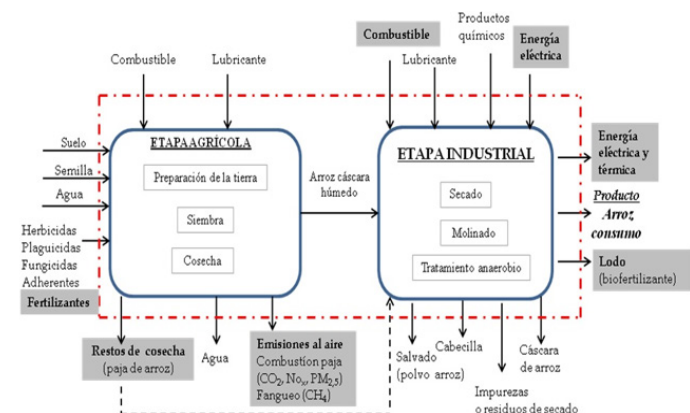


Figura 2. Esquema general del proceso de producción del arroz y límites del sistema para ACV.

En la tabla 1 se muestran los datos principales de las entradas y salidas (materiales, energía, agua y emisiones) para las dos etapas que conforman el proceso: la agrícola y la de procesamiento industrial del arroz, recopilados durante la fase de inventario.

Tabla 1. Datos para el análisis de inventario del ciclo de vida de la producción de arroz.

Entradas y salidas (materia prima, energía y agua)	Unidad	Cantidad	
		Variante I	Variante II
Etapa Agrícola			
Entrada			
Suelo <sup>a</sup>	ha/a	15 282,7	15 282,7
Semilla <sup>a</sup>	t/a	2407	2407
Agua <sup>a</sup>	L/a	436 038	436 038
Herbicidas <sup>b</sup>	t/a	168,04	168,04
Plaguicidas <sup>b</sup>	t/a	12,45	12,45
Fungicidas <sup>b</sup>	t/a	42,41	42,41
Adherentes <sup>b</sup>	t/a	1,18	1,18
Fertilizantes <sup>b</sup>			
Urea	t/a	338,7	116,10
Fósforo	t/a	338,7	116,10
Potasio	t/a	270,9	270,9
Zinc	t/a	169,35	169,35
Combustible <sup>c</sup>	L/a	1 574 118,1	1 574 118,1
Lubricante <sup>c</sup>	t/a	450	450
Salida			
Arroz cáscara húmedo <sup>a</sup>	t/a	112 592,0	112 592,0
Restos de cosecha <sup>a</sup>	t/a	146 360,7	0,0
Agua residual <sup>a</sup>	L/a	174 415,2	174 415,2

Emisiones			
Aire CH <sub>4</sub> (fangueo) <sup>d</sup>	kg <sub>CH<sub>4</sub></sub> /a	6 388 168,6	0,0
Aire PM <sub>2,5</sub> (combustión) <sup>d</sup>	kg <sub>PM<sub>2,5</sub></sub> /a	1 895 371,07	0,0
Etapa Industrial			
Entrada			
Arroz cáscara húmedo <sup>a</sup>	t/a	112 592,0	112 592,0
Combustible <sup>c</sup>	L/a	796 364,3	0,0
Lubricante <sup>c</sup>	t/a	150	150
Productos Químicos <sup>b</sup>	kg/a	13,58	13,58
Energía eléctrica <sup>c</sup>	kWh/a	2 769 819,15	2 769 819,15
Salida			
Arroz consumo <sup>a</sup>	t/a	40 000	40 000
Salvado (polvo de arroz) <sup>a</sup>	t/a	9 570,3	9 570,3
Cabecilla <sup>a</sup>	t/a	1 688,9	1 688,9
Impureza secadero <sup>a</sup> (residuo)	t/a	4 503,68	4 503,68
Cáscara de arroz <sup>a</sup>	t/a	24 770,24	24 770,24
Energía eléctrica	kWh/a	0,0	242 343,95
Energía térmica	kWh/a	0,0	360 799,06
Lodo (biofertilizante)	t/a	0,0	222,6

Adicionalmente y con el fin de estimar en cuanto podría disminuirse las emisiones de gases de efecto invernadero en el país, se calculó las emisiones evitadas en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (tCO<sub>2</sub>e) al sustituir la quema a cielo abierto de la paja de arroz (forma de disposición actual) por la alternativa que se propone (variante II), más las emisiones evitadas debido a la sustitución de la generación eléctrica con combustible fósil EGE por fuente renovable. Las emisiones por combustión a cielo abierto ECCA se estimaron por la ecuación propuesta por Gadde, et al. (2009), y para las emisiones por generación con combustible fósil, se empleó el factor de emisión específico de la generación en el país, para el caso de Cuba de 0,8 tCO<sub>2</sub>eMWh<sup>-1</sup> (Meneses, Roig, Paz, Alonso, Alvarado, 2018). Se tuvo en cuenta que en Cuba durante la transmisión existe una pérdida de 11,6%, las que pudieran evitarse si la generación se realizara a partir de biogás de forma descentralizada y cercana a la fuente consumidora.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la producción de biogás en los ensayos en discontinuos se muestran en la figura 3, a través de las curvas de rendimiento de biogás acumulado. Como se observa en la figura las curvas describen un comportamiento exponencial monofásico a ambas temperaturas y se puede deducir que para las condiciones de estudio la etapa de metanogénesis es el paso limitante de la velocidad global del proceso.

Sin embargo, en régimen termofílico además de lograrse un mayor rendimiento la parte lineal de la curva tiene una mayor pendiente, lo que manifiesta la presencia de compuestos hidrolizables para los microorganismos a



esa temperatura que facilitan el desarrollo del proceso. Similares curvas de rendimiento para la paja arroz, obtuvieron Yang, Zheng & Zhang (2009), que incrementó a  $0,6 \text{ Nm}^3\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$  cuando se trató la biomasa con NaOH y KOH.

Por su parte He, et al. (2008), reportan un rendimiento de  $0,52 \text{ Nm}^3\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$  cuando aplicaron combinaciones de pretratamientos. Sin embargo, el empleo de pretratamientos conllevaría un costo adicional al proceso por agentes químicos, gastos energéticos y otros insumos, con la consiguiente repercusión en el balance económico total del proceso.

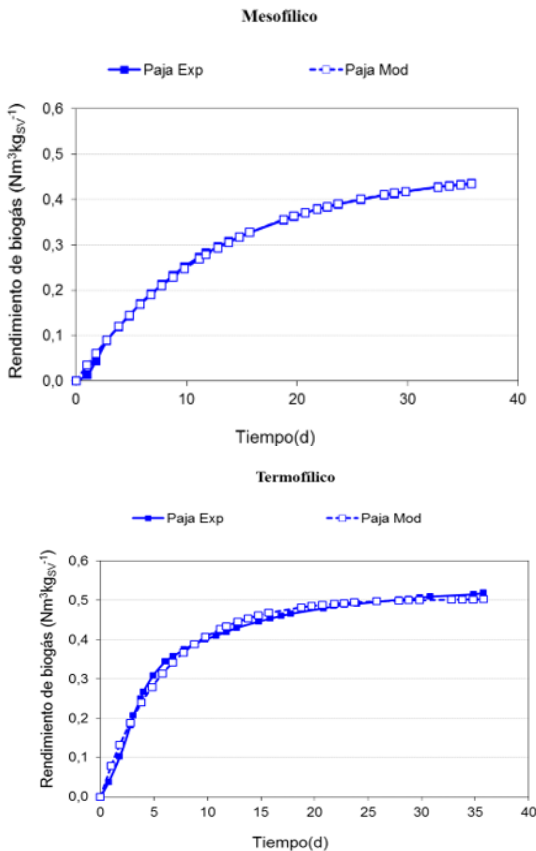


Figura 3. Rendimiento de biogás acumulado en régimen mesofílico y termofílico. Valores experimentales, valores generados de los modelos de primer orden.

Estos resultados demuestran el potencial bioquímico de metano de la paja de arroz como única fuente de carbono con un rendimiento a  $55^\circ\text{C}$  de  $0,518 \text{ Nm}^3\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$ . Adicionalmente, el análisis estadístico corroboró que existe diferencia significativa con una probabilidad ( $P < 0,05$ ), entre el rendimiento de biogás en régimen de temperatura mesofílico y en termofílico. Los resultados obtenidos a través del software SPSS se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 2. Resultados de la prueba no paramétrica de Mann-Whitney al comparar dos muestras independientes medidas al menos en escala ordinal.

Estadísticos de contraste <sup>a</sup>	$Y_{\text{pajaaroz}}$
U de Mann-Whitney	2327.000
W de Wilcoxon	6698.000
Z	-5.186
Sig. Asintótica (bilateral)	0.000

Variable de agrupación: tipo

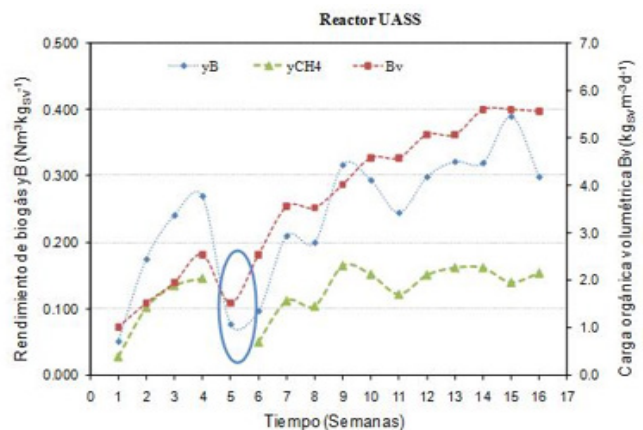
### Operación y evaluación del reactor UASS

En esta etapa experimental se evaluó de forma simultánea el desempeño del proceso de degradación de la paja de arroz en dos configuraciones: un reactor de tanque completamente mezclado CSTR (por sus siglas en inglés) y un reactor en estado sólido de flujo ascendente UASS (por sus siglas en inglés).

Ambos reactores de vidrio y enchaquetados con una capacidad de 3,5 L. El CSTR fue acoplado a un termostato para el control de la temperatura a  $55 \pm 2^\circ\text{C}$  y a su vez conectado a la chaqueta del UASS. El biogás producido se midió en litros, se almacenó en una bolsa recolectora y su composición fue analizada periódicamente.

El desempeño del proceso se evaluó mediante los parámetros de producción: rendimiento ( $y_B$ ,  $y_{\text{CH}_4}$ ) y velocidad de producción específica ( $r_B$ ,  $r_{\text{CH}_4}$ ). Además del monitoreo de los parámetros físico-químicos a los efluentes: pH, ST, SV,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , nitrógeno total Kjeldal NTK y la relación ácidos grasos volátiles/alcalinidad.

En las figuras 4, se muestra el comportamiento del rendimiento de biogás y de metano con la carga de trabajo, como valor promedio de la semana, durante el tiempo de operación en ambas configuraciones de reactores USAS y CSTR.



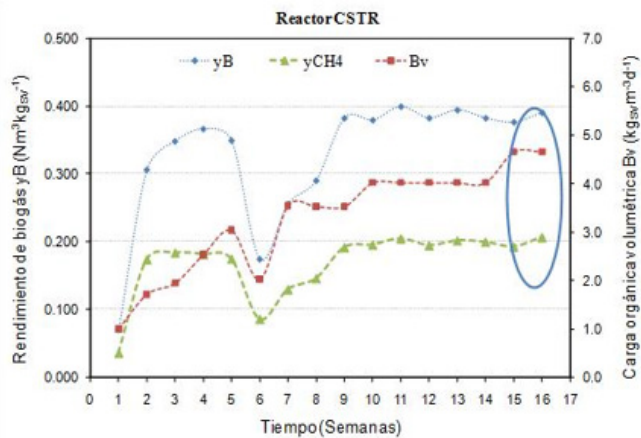


Figura 4. Rendimiento de biogás, metano y carga orgánica en el reactor CSTR y UASS.

De forma general, al incrementar la carga orgánica en el CSTR, el rendimiento se incrementó y alcanza un valor estable a partir de la semana nueve de operación. En los casos donde disminuyó, estuvo asociado a los cambios en los tamaños de partículas. Estos resultados, unidos al comportamiento de la eficiencia relativa de metano que resultó siempre superior en el reactor CSTR, fundamentan la decisión sobre esta configuración para el caso de estudio.

A partir esta producción de biogás esperada y los índices de generación de energía eléctrica y térmica empleados, se pudo estimar una producción de energía de 242 344 kWhd<sup>-1</sup> eléctricos para una potencia de 10 MW y una disponibilidad de energía térmica de 360 799 kWhd<sup>-1</sup> para una potencia de 15 MW. Este potencial de energía posibilitaría a la empresa agroindustrial de granos “Sur del Jíbaro” el autoabastecimiento de energía eléctrica, la venta de la energía sobrante al sistema electroenergético nacional SEN y la sustitución de diesel en la etapa industrial de secado. Por lo que se le añadiría un valor adicional a este residuo.

Los resultados del análisis de ciclo de vida de la producción de arroz en la empresa caso de estudio, bajo las condiciones actuales (Variante I) y cuando en ésta se incluye, como alternativa de tratamiento para los restos de cosecha la digestión anaerobia con el fin de generar electricidad (Variante II), se muestran a continuación de forma comparativa, a partir de la cantidad de emisiones, ocupación de suelo o agotamiento de recursos consideradas en el proceso.

En la figura 5 se observa como esta alternativa implica una disminución en las 11 categorías intermedias analizadas representadas en por ciento, dado por las emisiones que se evitan de CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y de material particulado, asociadas con la quema de la paja de arroz, y por la mitigación de daños al sustituir combustible fósil

en la generación eléctrica, por una fuente renovable. Además de la sustitución del recurso diesel que se utiliza como combustible en los secaderos, por la energía térmica disponible de la etapa de cogeneración.

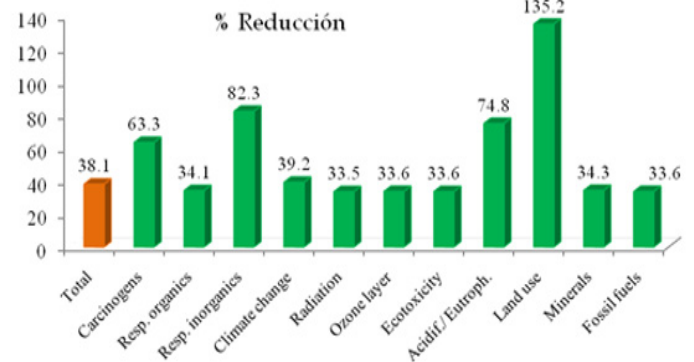


Figura 5. Resultados de las categorías de impactos ambientales intermedios en por ciento de reducción.

Adicionalmente, se hizo un análisis cuantitativo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas al emplear la paja de arroz, que actualmente se quema a cielo abierto, para la producción de energía mediante tratamiento anaerobio y de esa forma analizar su contribución a la minimización de emisiones por el sector energético nacional.

Sobre la base de los datos de producción de la empresa caso de estudio, se obtuvo que se hubieran dejado de emitir a la atmósfera 6.041.438 t de CO<sub>2</sub> equivalente si la paja de arroz hubiese sido tratada por vía anaerobia, valor que significa el 0,2% de las emisiones totales del país y el 3,2% de las emisiones del sector energético en ese propio año. Este resultado corrobora el efecto ambiental positivo de la propuesta desde la perspectiva nacional.

## CONCLUSIONES

Se demostró que la paja de arroz tiene un significativo potencial de biogás con un valor máximo de hasta 0,5 m<sup>3</sup>kg<sub>sv</sub><sup>-1</sup>, como única fuente de sustrato, régimen de temperatura termofílico. Se comprobó que la digestión anaerobia de la paja de arroz es más estable cuando se trabaja en reactores de mezcla completa y se alcanzan valores de carga orgánica volumétrica superiores a las reportadas para este tipo de configuración al tratar residuos lignocelulósicos. Este resultado fundamenta el criterio tecnológico de decisión hacia la propuesta para al caso de estudio, lo que significa que es posible contar un potencial de cogeneración de 10 MW de potencia eléctrica y 15 MW de potencia térmica, un aporte ambiental positivo al proceso de producción de arroz y una disminución en un 0,2% de las emisiones totales de GEI del país y de 3,2% las emisiones equivalentes del sector energético en el caso de Cuba.

Se considera que la propuesta de valorización energética de la paja de arroz mediante producción de biogás es una alternativa amigable con el medio ambiente al evitarse emitir a la atmósfera por este concepto 6.041.438 t de CO<sub>2</sub> equivalente para el caso de estudio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril, D., Navarro, E., & Abril, A. (2009). La paja de arroz. Consecuencias de su manejo y alternativas de aprovechamiento. *Agronomía*, 17(2), 69-79. Recuperado de <https://biblat.unam.mx/es/revista/agronomia-manizales/articulo/la-paja-de-arroz-consecuencias-de-su-manejo-y-alternativas-de-aprovechamiento>
- Barati, R., Aghbashlo, M., Ghanavati, M., Tabatabaei, H., Sharifi, M., & Javadirad, M. (2017). Comprehensive exergy analysis of a gas engine-equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*, 151, 753-763. Recuperado de <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183007317>
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 16(3), 1462-1476. Recuperado de <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v16y2012i3p1462-1476.html>
- Correa, L. G. (2017). Cambio climático, energía solar y disputas comerciales. *Portes, revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del Pacífico*, 11(21), 7-26. Recuperado de <http://revistasacademicas.ucol.mx/index.php/portes/article/view/1310>
- España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2014). *Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera 2012*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Gadde, B., Christoph, M., & Reiner, W. (2009). Rice straw as a renewable energy source in India, Thailand, and the Philippines: Overall potential and limitations for energy contribution and greenhouse gas mitigation. *Biomass and Bioenergy*, 33(11), 1532-1546. Recuperado de <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/rice-straw-as-a-renewable-energy-source-in-india-thailand-and-the-yLTED0KzK0>
- He, Y., Pang, Y., Liu, Y., Li, X., & Wang K. (2008). Physicochemical Characterization of Rice Straw Pretreated with Sodium Hydroxide in the Solid State for Enhancing Biogas Production. *Energy & Fuels*, 22(4), 2775-2781. Recuperado de <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef8000967>
- Kevin de Cuba, A., Burgos, F., & Contreras-Lisperguer, R. (2008). *Integrated Waste Management including Renewable Energy. Limits and Potential for Waste Management to Energy Generation in the Caribbean*. Washington DC: Department for Sustainable Development -The Organization of American States.
- Mähnert, P. (2007). *Kinetik der Biogas production aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle*. Dissertation zu Erlangung des akademischen Grades doctor rerumagriculturarum (Dr. rer. agr.). Berlin: Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu.
- Meneses, R., Roig, R., Paz, E., Alonso, D., & Alvarado, J. (2018). Factores de emisión de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> para instalaciones generadoras de electricidad en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(1), 1-9. Recuperado de <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/viewFile/255/295>
- Montalvo, S., & Guerrero, L. (2003). *Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico de Santa María.
- Watanabe, A., Satoh, Y., & Kimura, M. (1995). Estimation of the increase in CH<sub>4</sub> emission from paddy soils by rice straw application. *Plant and Soil*, 173(2), 225-231. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00011459>
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. Mini-review. *Appl Microbiol Biotechnol*, 85(4), 849-860. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19777226>
- Yang, D., Zheng, Y., & Zhang, R. (2009). Alkali pretreatment of rice straw for increasing the biodegradability. *St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers*.