

Caracterización del poder calorífico de la biomasa residual de cacao CCN51 mediante procesos de gasificación anaeróbica y termoquímica

Carlos Augusto **Carvajal-Jara**
Paúl Michael **Tafur-Escanta**
Ángelo Homero **Villavicencio-Poveda**
Eduardo Roberto **Gutiérrez-Gualotuña**

Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
ECUADOR

Tel. (593)992774720
correos electrónicos (emails): cacarvajal1@espe.edu.ec
pmtafur@espe.edu.ec
ahvillavicencio@espe.edu.ec
ergutierrez@espe.edu.ec

Recibido 31-01-2018, aceptado 13-03-2018.

Resumen

Se presenta una propuesta en la que se realiza el análisis respectivo para el procedimiento de caracterización del poder calorífico del gas, producido en una instalación de gasificación tipo *downdraft* y el biogás producido en biodigestores de los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Energía Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Este estudio se realiza con la finalidad de encontrar el mejor proceso para aprovechar el poder energético de la biomasa resultante del procesamiento del cacao CCN51 (Colección Castro Naranjal). La generación del gas producto del uso de estas dos tecnologías (anaeróbica y termoquímica) se analiza mediante cromatografías, realizadas en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, con las lecturas más altas en poder calórico, determinar el mejor método y procedimiento en la producción de calor de la biomasa residual del cacao CCN51 y su utilidad. El estudio analizó variables como; la relación carbono/nitrógeno, tiempo de retención en el proceso de gasificación anaeróbica; % de humedad, kg de biomasa en la tolva, % de apertura en el Venturi en el proceso de gasificación termoquímica. La investigación se efectuó bajo un diseño experimental de tipo factorial, que arrojó para el análisis nueve muestras con tres repeticiones para el proceso de gasificación anaeróbica y veintisiete muestras con

tres repeticiones para el proceso de gasificación termoquímica, de donde se obtuvo como resultado de un análisis estadístico un poder calorífico inferior y superior de 16,11 MJ/kg y 17,24 MJ/kg en el biogás; 13,36 MJ/kg y 15,85 MJ/kg en el gas de síntesis (syngas), respectivamente.

Palabras clave: cacao CCN51, gasificación anaeróbica, gasificación termoquímica, cromatografía, poder calorífico.

Abstract

(Characterization of the Calorific Power of the Residual Biomass of Cacao CCN51 through Anaerobic and Thermochemical Gasification Processes)

A proposal is presented in which the respectful analysis for the heat generation process of the gas is carried out, a gasification type installation was carried out and the biogas was made in bio digesters of the laboratories of the Faculty of Mechanical Energy Sciences of the University of the Armed Forces ESPE. This study is carried out in order to find the best process to take advantage of the energy power of the biomass resulting from the processing of cocoa CCN51 (Castro Naranjal Collection). The generation of the gas product of the use of these technologies (anaerobic and thermochemical), son analyzed by chromatography, carried out in the laboratories of the Chemical Engineering Faculty of the Central University of Ecuador, with the highest readings in caloric power, to determine the best method and procedure in the production of calories from the residual biomass of cocoa CCN51 and its usefulness. The study analyzed variables such as; the carbon / nitrogen ratio, retention time in the anaerobic gasification process; % of humidity, kg of biomass in the hopper, % of opening in the Venturi in the process of thermochemical gasification. The research was carried out under an experimental factorial design, which yielded for the analysis nine samples with three repetitions for the anaerobic gasification process and twenty-seven samples with three repetitions for the thermochemical gasification process, from which it was obtained as a result of an analysis statistical a lower and higher calorific value of 16.11 MJ / kg and 17,24 MJ / kg in the biogas; 13.36 MJ / kg and 15.85 MJ / kg in the synthesis gas (syngas), respectively.

Index terms: cacao CCN51, anaerobic gasification, thermochemical gasification, chromatography, calorific power.

1. Introducción

Las investigaciones sobre productos y subproductos de cacao inician desde el siglo XX y se refieren al uso alimenticio que se da al cacao, transformándose en el más importante producto de exportación, pero nunca se lo tomó como una posible fuente de producción energética [1].

La cáscara del cacao es una fuente de pectinas como lo indican Calderón y Matos, además, Barazarte y col. identifican el potencial de las cáscaras de cacao como fuente de pectinas. Posteriormente, Franco y col. demuestran que la pectina obtenida de la cáscara de cacao es aceptable para ser empleada en la industria alimentaria de los seres humanos dando un valor agregado a este subproducto [1].

Bermúdez *et al.* puntualizan que la fermentación de cáscara de cacao con *Pleurotus ostreatus*, permite obtener un sustrato remanente de alto valor nutritivo para ser utilizado en dietas alimenticias de animales o como abono orgánico [1].

Según Brenes, la cáscara de cacao puede ser utilizada en la alimentación animal, fertilización de plantas y como materia prima para biodigestores. Estos usos han sido planteados de acuerdo a la composición química de la cáscara: 27% de fibra cruda, 6,25% de proteína cruda con 35,5% de nitrógeno disponible total y 3,2% de potasio. Una tonelada métrica de materia seca de cáscara puede aportar 12 kg de nitrógeno, 2,5 kg de fósforo (P_2O_5), 42 kg de potasio (K_2O), 4,2 kg de Calcio (CaO) y 4,2 kg de Magnesio (MgO) [1].

En un estudio sobre la evaluación energética de las características de la biomasa residual agrícola del cacao Nacional y CCN51 (clon Castro Naranjal) [1], se determina que el poder calorífico inferior y superior de la cáscara del CCN51 es 11,70 MJ/kg y 14,00 MJ/kg.

Los residuos orgánicos que generan las plantas industriales que procesan el cacao en el Ecuador no son aprovechados adecuadamente, lo que genera una gran cantidad de desperdicios que al no ser utilizados se convierten en una fuente de contaminación ambiental debido a que se pueden producir bacterias las cuales pueden generar gas metano, este es el caso de los residuos producidos por las industrias procesadoras de cacao, mismos que pueden ser utilizados en ahorros significativos de uso para la generación energía eléctrica en las agroindustrias [19].

Para el proceso de la industrialización de cacao CCN51, se sabe que en Ecuador se producen 110 000 toneladas anuales de las cuales solo de desecho son cerca del 20% entre cáscara, granza, triturado, maguey, que proporcionan alrededor de 22 000 toneladas anuales de desperdicio (véase Tabla 1).

Tabla 1. Producción ecuatoriana de cacao en quintales y tiempo/hectárea del cacao nacional y el CCN51 [16].

Tipo de cacao	Producción cosechada	
	t/ha	qq/ha
Nacional	0.18	4.0
CCN51	0.93	20.5

La biomasa es la materia viva presente en la superficie terrestre. Los residuos que se generan a partir de procesos de transformación natural o artificial de la materia viva, también constituyen biomasa, misma que es considerada renovable debido a que forma parte del flujo natural y repetitivo de procesos productivos en la naturaleza, siendo las plantas las optimizan los procesos de fotosíntesis para captar energía solar y producirlos en energía [3], [4].

Según la investigación realizada por Escalante, la valoración energética de la biomasa está dada por la cantidad de energía que contiene y que se puede llegar a liberar cuando se somete a un proceso de conversión energética. Una buena parte de la población rural de los países en desarrollo depende de la biomasa como fuente energética. La biomasa suple un 35% en consumo de energía primaria en los países subdesarrollados y alcanza un 14% del total de la energía consumida por el mundo [4].

1.1. Análisis del potencial energético de la biomasa

En su investigación, Escalante indica que los análisis fisicoquímicos son los más importantes para determinar el potencial de la biomasa, estos análisis se expresan en base seca. Por esta razón, lo primero que se debe realizar es la determinación del contenido de humedad de la biomasa. Con el análisis elemental se determina el contenido de compuestos simples que se puede gasificar y aportar energía en las reacciones de combustión. El análisis incluye la determinación del porcentaje de azufre, carbono, hidrógeno y nitrógeno [4].

1.2. Contenido energético

En 1997 Flotats propuso que el contenido energético corresponde a la cantidad de energía disponible en el material, los combustibles son compuestos que poseen carbono, el cual reacciona con el oxígeno, en procesos térmicos o celdas de combustibles, liberando energía en forma de calor. La calidad de estos combustibles dependen de la cantidad de calor que puede liberar en el proceso de conversión energética; esta cantidad de calor referida a la unidad de masa es el poder o potencia calorífica [3].

Al romper los enlaces de los compuestos orgánicos, por combustión directa de biomasa o por combustión de productos obtenidos de ella mediante transformaciones físicas o químicas. Para dar dióxido de carbono y agua como productos finales, se libera energía. La biomasa puede proporcionar energía mediante su transformación en materiales sólidos, líquidos y gaseosos. Los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan, en general, biocombustibles y, específicamente, a todos aquellos, generalmente sólidos y gases, que se aplican con fines térmicos y eléctricos [5].

El contenido energético de un compuesto orgánico es proporcional a las cadenas C-C en su estructura; el contenido energético de la biomasa es menor que el de los combustibles fósiles, debido al contenido en su estructura de las cadenas C-O y C-H. El uso de la biomasa, con elevado porcentaje de humedad, reduce la eficiencia de la combustión, debido a que el calor liberado es para evaporar el agua y no para la reducción química del material [4].

1.3. Ecuaciones de transformación de la biomasa

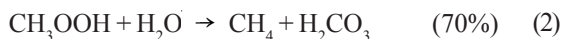
A. Reacciones en el proceso de gasificación anaeróbica

La metanogénesis, última etapa del proceso de digestión anaerobia, consiste en la transformación bacteriana del ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno [6], [18].

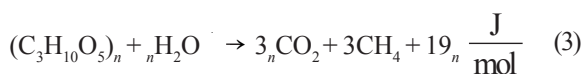
Reducción



Descarbonización del ácido acético



Ecuación de fermentación anaerobia



Donde n es el número de moles. El biogás generador por la digestión anaerobia se compone aproximadamente de 55% de metano y 45% de dióxido de carbono, además de otros contaminantes en trazas [7].

Relación Carbono-Nitrógeno

El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimento de las bacterias formadoras de metano. Por tanto, la

relación Carbono/Nitrógeno (C/N) es adecuada para la obtención de biogás en el proceso de gasificación anaeróbica.

$$\frac{\text{C}}{\text{N}} = \frac{\% \text{C} \times M_{\text{estiércol}} + \% \text{C} \times M_{\text{biomasa}}}{\% \text{N} \times M_{\text{estiércol}} + \% \text{N} \times M_{\text{biomasa}}} \quad (4)$$

La ecuación (4) sirve para el cálculo de la masa de los residuos de cacao CCN51.

El carbono es la fuente energética para los microorganismos y el nitrógeno es un material esencial para la síntesis proteínica. Esta relación expresa la digestibilidad de un determinado material orgánico [4].

La máxima relación de C/N que se debe obtener para una buena producción de biogás no debe superar 30:1 [8].

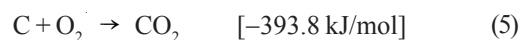
B. Reacciones en el proceso de gasificación termoquímica

La gasificación de biomasa es un complicado proceso que incluye numerosas reacciones químicas que determinan el comportamiento térmico, la composición del gas y las impurezas que acompañan a los compuestos principales. El modelo es descrito por los balances de carbón, hidrógeno, oxígeno, así como las ecuaciones de balance de energía y equilibrio químico [9], [17].

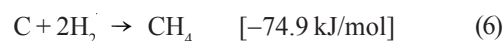
a) Reacciones exotérmicas

Son las principales responsables de aportar el calor necesario para compensar la absorción de calor de las reacciones endotérmicas.

Oxidación



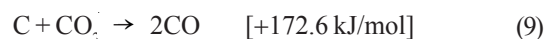
Finalmente las reacciones que son las responsables de la formación de impurezas:



b) Reacciones endotérmicas



Reacción Boudouard

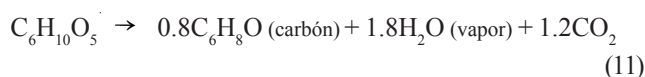


Ecuación de gasificación termoquímica



La reacción dada por (12) se puede describir como la consecución de varios fenómenos: secado, descomposición térmica o pirólisis, combustión parcial, craqueo de gases, vapores, alquitranes y gasificación de los productos finales [10], [11].

Ecuación del proceso de pirólisis



El calor liberado por la reacción dentro de gasificación no se pierde, sino que se aprovecha para la producción de vapor [12].

El gas de síntesis que se genera después del proceso de gasificación contiene una mezcla de gases combustibles y no combustibles, agua, polvo y compuestos de sulfuro como (H_2S) y compuestos de nitrógeno como (NH_3 , HCN) que son indeseables por generar condensados corrosivos y contaminantes en los gases de escape como los NO_x que son grandes contribuyentes al fenómeno de la lluvia ácida [13].

Con base en lo que se ha expuesto anteriormente, en este artículo se detalla una propuesta de caracterización del biogás y syngas de la biomasa residual de CCN51 mediante los procesos de gasificación anaeróbica y termoquímico para la obtención del poder calorífico inferior y superior con lo cual se puede promover eficiencia energética en el sector agroindustrial. De esta manera se puede involucrar a las agroindustrias que se dedican a esta actividad promoviendo un desarrollo sustentable.

El presente artículo está distribuido de la siguiente manera: la fase dos trata el contexto de residuos de biomasa que se tiene en el Ecuador, el análisis del potencial energético, el contenido energético y las ecuaciones de transformación energéticas de los residuos de biomasa. La fase tres especifica el diseño experimental y los parámetros operacionales tanto de variación como los que se mantienen constantes. La cuatro pormenoriza el desarrollo experimental de los procesos de gasificación anaeróbica y termoquímico. La fase cinco expone los resultados cromatográficos, concretamente los datos más altos de poder calorífico inferior y superior. Finalmente, en la fase seis se exponen las conclusiones de esta investigación.

2. Diseño experimental

Se realizó un diseño experimental 3N dada la necesidad de considerar el carácter no lineal esperado del proceso. Se uti-

Tabla 2. Parámetros operacionales de variación del proceso digestión anaerobia para la obtención del biogás.

FACTORES	VARIABLES	NIVELES		
		ALTO	MEDIO	BAJO
Relación C/N	X_1	30:1	25:1	22:1
Tiempo de retención (días)	X_2	30	25	20

lizan 3 réplicas para considerar la influencia de los factores aleatorios, en primer lugar el error de los medios de medición. En el caso de la digestión anaerobia $N = 2$, para un total de 27 experimentos. En el caso de la gasificación termoquímica en instalaciones tipo *downdraft* $N = 3$, para un total de 81 experimentos. En ambos casos los experimentos se realizaron en condiciones de estacionamiento del proceso, ya que se requiere, precisamente, el comportamiento para el estado estacionario [14].

Para la obtención del biogás, se consideró como factores las variables de proceso de digestión anaerobia que se encuentran en la Tabla 2. Mientras que para la obtención del gas de síntesis se consideró como factores los parámetros operacionales del proceso de gasificación termoquímica expuestos en la Tabla 4.

2.1. Parámetros de variación para la digestión anaerobia

Las variables de operación como pH, temperatura, agitación, nutrientes, tamaño de partícula y la presión atmosférica se mantendrán constantes en ésta investigación.

Como resultado del procesamiento se obtuvieron los siguientes modelos para la estimación de los poderes caloríficos inferior (PCI) y superior (PCS).

Tabla 3. Variables de operación que se mantendrán constantes en el proceso de digestión anaerobia para la obtención del biogás.

Variables de operación constantes	
pH	7
Temperatura	35 °C
Tamaño de Partícula	2 - 3 mm
Nutrientes	1 % en la mezcla
Presión atmosférica ESPE	0.740 atm

$$PCI = -0.0886705 + 1.13641(tret^{1.316})(RCN^{0.023}) \quad (12)$$

Se obtuvieron los siguientes indicadores de calidad:

R-cuadrado = 88,3151 %

Error estándar de la estimación = 0,832709

$$PCS = -0.0780329 + 1.13858(tret^{1.347})(RCN^{0.024}) \quad (13)$$

Se obtuvieron los siguientes indicadores de calidad:

R-cuadrado = 88,4129 %

Error estándar de la estimación. = 0,899387

donde:

RCN, Relación Carbono/Nitrógeno

tret, tiempo de retención

Las potencias *RCN* y *tret* se obtuvieron a partir de modelos para la búsqueda de las potencias de mejor ajuste correspondiente.

2.2. Parámetros de variación para la gasificación en instalaciones *downdraft*

Las variables de decisión de la investigación, es decir, aquellas que al ser modificadas hacen variar la capacidad calorífica del gas de síntesis para una biomasa dada, son la humedad y la cantidad de biomasa, así como la apertura de la válvula (la que determina el caudal de aire a la zona de combustión).

Se mantuvieron constantes otros parámetros operacionales como la cantidad de carbón vegetal, el tamaño de la partícula de biomasa. La temperatura en el reactor se determina como resultado de los parámetros de operación, y la presión atmosférica.

Como resultado del procesamiento se obtuvieron los siguientes modelos para la estimación de los poderes caloríficos inferior (*PCI*) y superior (*PCS*).

Tabla 4. Parámetros de variación en el proceso de gasificación termoquímica para la obtención del gas de síntesis.

FACTORES	VARIABLES	NIVELES		
		ALTO	MEDIO	BAJO
% de humedad	X_1	15	12	8
Cantidad de biomasa (en kg)	X_2	5	3	1
% Apertura y cierre de la válvula del Venturi	X_3	100	50	25

Tabla 5. Parámetros operacionales que se mantendrán constantes en el proceso de gasificación termoquímica para la obtención de syngas.

Parámetros operacionales constantes	
Cantidad de carbón vegetal	3 kg
Temperatura en el reactor de inicio	600°C
Tamaño de partícula	2-3 mm
Presión atmosférica ESPE	0.740 atm

$$PCI = 1271.75 - 1269.99Av^{0.005} + 1258.09(Av^{0.005})(Cbio^{0.023}) + 0.239273Cbio - 1246.12Cbio^{0.023} - 0.196226Hu \quad (14)$$

Se obtuvieron los siguientes indicadores de calidad:

R-cuadrado = 87,2317 %

Error estándar de la estimación = 0,239817

$$PCS = 921.142 - 919.143Av^{0.008} + 916.82(Av^{0.008})(Cbio^{0.022}) + 0.259738Cbio - 902.391Cbio^{0.022} - 0.231425Hu \quad (15)$$

Se obtuvieron los siguientes indicadores de calidad:

R-cuadrado = 90,2694 %

Error estándar de la estimación = 0,241529

donde:

Av, apertura de la válvula del Venturi del gasificador

Cbio, cantidad de biomasa

Hu, porcentaje de humedad de la biomasa

Las potencias *Av*, *Cbio* y *Hu* se obtuvieron a partir de modelos para la búsqueda de las potencias de mejor ajuste correspondiente.

3. Desarrollo de los procesos de gasificación

3.1. Proceso de digestión anaerobia

Para esta investigación se construyeron 6 biodigestores con las siguientes características; como muestra la figura 3a.

- Volumen total de 19 lt
- Agitador de hélice manual
- Resistencia térmica variable de hasta 50°C

Un parámetro que se tomó en cuenta al momento de formar el lodo (biomasa cacao CCN51, estiércol vacuno y agua) es el porcentaje humedad $\geq 85\%$ como lo propuso Ortega [15]. El porcentaje de humedad de la biomasa debe oscilar entre 8-12%.

Descripción del proceso

1. Secado y triturado de la Biomasa con contenido de humedad del 8-12%, como se indica en la figura 1 b).
2. Se realizó el cálculo de la relación C/N para la obtención de las masas de cacao y estiércol para la mezcla.
3. Se estableció la relación entre la mezcla y el porcentaje de urea incluido.
4. Con el uso de una balanza se pesaron las masas de la mezcla de biomasa, estiércol y urea.
5. Colocación de agua en la mezcla y homogenización de la misma.
6. Colocar la tapa con el agitador y resistencia.
7. Sellar herméticamente para evitar fugas.

Cálculo de las masas de cacao CCN51 y estiércol

$$\rho_{lodo} = \frac{m_{lodo}}{V_T} \quad (16)$$

donde:

V_T volumen total del biodigestor

ρ_{lodo} densidad del lodo

m_{lodo} masa del lodo

$$M_s = M_h \frac{100 - xwi}{100} \quad (17)$$

donde:

M_s masa en base seca

M_h masa en base húmeda (m_{lodo})

xwi , porcentaje de humedad inicial lodo (85%)

para valores de $V_T = 12.60$ l, $\rho_{lodo} = 1174$ kg/m³. Al reemplazar en (4) se obtienen las relaciones C/N vs masa en kg de biomasa y estiércol vacuno (véase Tabla 6).

Tabla 6. Relaciones C/N vs masa en kg de biomasa y estiércol vacunos.

	RELACIÓN C/N		
	22/1	25/1	30/1
Masa (kg)			
Biomasa	1	0.6	1.24
Estiércol	1.25	1.65	1.01

3.2. Proceso termoquímico

Se utilizó el gasificador tipo *downdraft* de 10 kW como se muestra en la figura 2a. Para el proceso se requirió un secado de la biomasa a utilizar inferior al 18% de humedad (véase Fig. 2b).

Descripción del proceso

1. Secado y triturado de la Biomasa con contenido de humedad del 8-15% como se muestra en la figura 2b.
2. Limpieza del gasificador de alquitrán, restos de biomasa y carbón no combustionado.
3. Colocación de empaques y sellado.
4. Alimentación y encendido de carbón vegetal hasta las temperaturas de funcionamiento como se indica en la figura 3a.
5. Encendido de la balanza digital para saber la cantidad exacta de biomasa que se va a colocar.
6. Se espera a que la temperatura de reducción alcance los 600°C.
7. Se prueba con una antorcha en la tobera de salida para comprobar que ya se produce el gas, una vez que este comienza a generarse, se enciende y se toma la muestra como se indica en la figura 3b.

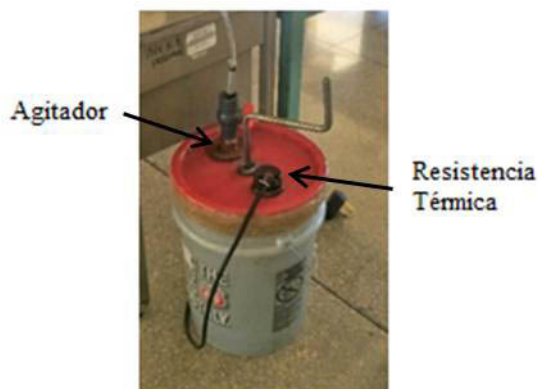


Fig. 1. Biodigestor, triturado y medición de la humedad de la biomasa.

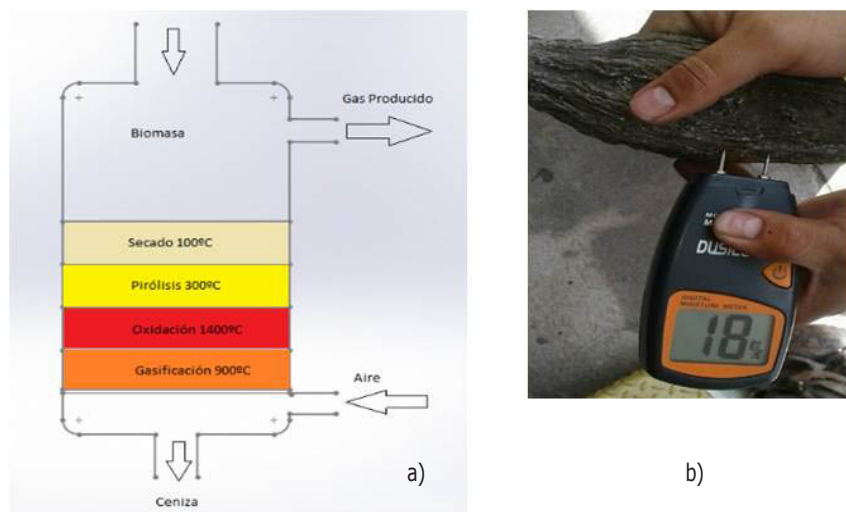


Fig. 2. Gasificador tipo downdraft de 10 kW y medición del porcentaje de humedad de la biomasa.

4. Resultados

Al graficar la composición química del gas de síntesis (véase Figura 4), encontramos grandes cantidades de N_2 , siendo el más representativo en lo que a poder calorífico se refiere al H_2 , adicionalmente metano (CH_4) y etano (CH_3) en bajas cantidades.

Se puede observar que el gas de síntesis se relacionó con el poder calorífico. La muestra correspondiente y los parámetros de variación (% de humedad, kg de biomasa, % de apertura y

cierre de la válvula del Venturi) obteniendo el más alto valor de poder calorífico para la muestra número 17 con 8% de humedad, 5 kg de biomasa y el 25% de apertura de la válvula del Venturi.

El gráfico muestra la composición química del gas, donde se encuentra una gran presencia de CO y CO_2 , siendo el más representativo en lo que a poder calorífico corresponde al metano (CH_4), adicionalmente Carbono (C), Hidrógeno (H_2) y Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) en bajos niveles.

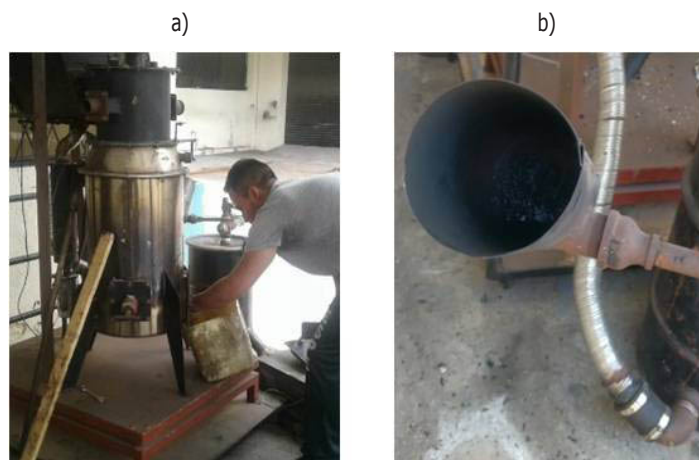


Fig. 3. Alimentación del carbón vegetal y tobera de salida de gas de síntesis.

Tabla 7. Resultados de la cromatografía del gas de síntesis con mayor poder calorífico.

Gas de síntesis Cacao CCN51	
Hidrógeno	10.681210%moles
Oxígeno	14.688000%moles
Nitrógeno	26.226000%moles
CO	4.6066000%moles
Metano	0.4815000%moles
CO_2	6.2646000%moles
Etano	0.1265000%moles
Agua	0.3505750%moles
N-I	36.575015%moles
PCS	15,85 kJ/kg
PCI	13,36 kJ/kg

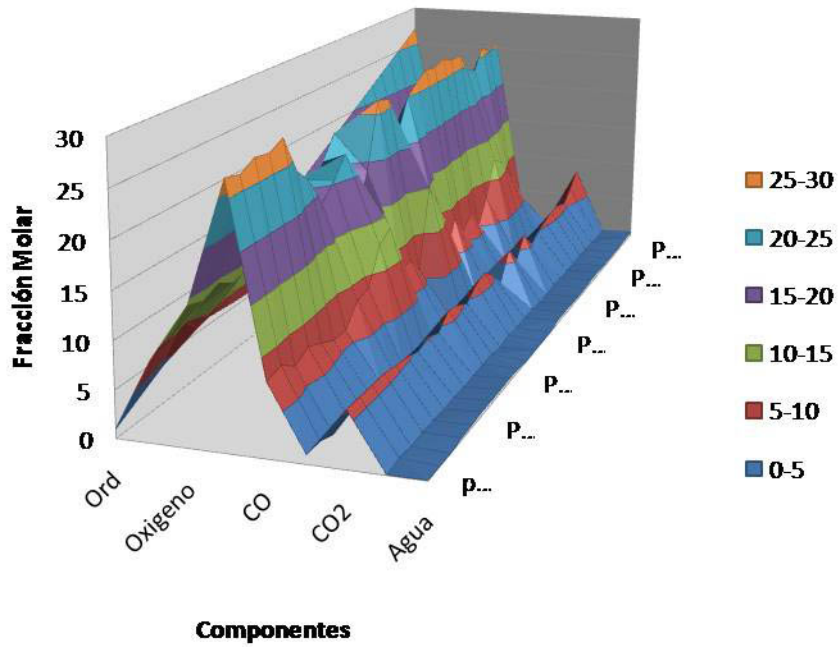


Fig. 4. Composición química del syngas del cacao CCN51.

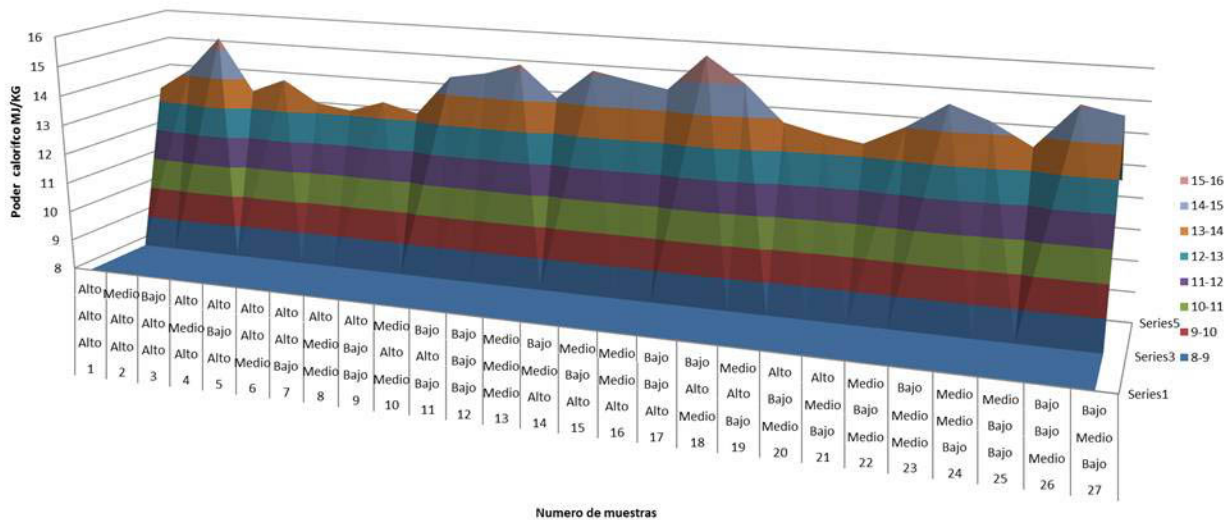


Fig. 5. Poder calorífico-número de muestras y variables syngas de cacao CCN51.

Tabla 8. Resultados de la cromatografía de biogás con mayor poder calorífico.

Biogás Cacao CCN51	
Hidrógeno	0,12819817%moles
Oxígeno	11,7940427%moles
CO	34,6696908%moles
Metano	20,0900526%moles
CO ₂	25,8269981%moles
H ₂ S	0,11678647%moles
Carbono	7,37423108%moles
N-I	0,30699000%moles
PCS	17,24 kJ/kg
PCI	16,11 kJ/kg

La figura 7 muestra la composición química del gas, donde se encuentra una gran presencia de CO y CO₂, siendo el más representativo en lo que a poder calorífico corresponde al metano (CH₄), adicionalmente Carbono (C), Hidrógeno (H₂) y Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) en bajos niveles.

En la Figura 6, se muestra la relación del poder calorífico, la muestra correspondiente, y los parámetros de variación (variables), (Relación Carbono/Nitrógeno y el tiempo de retención) obteniendo el más alto valor de poder calorífico para la muestra número 5 con Relación C/N de 25:1 y un tiempo de retención de 30 días.

Se encontró que el poder calorífico superior e inferior del gas de síntesis es de 15.85 MJ/kg y 13.36 MJ/kg respectivamente, mientras que el poder calorífico superior e inferior de biogás

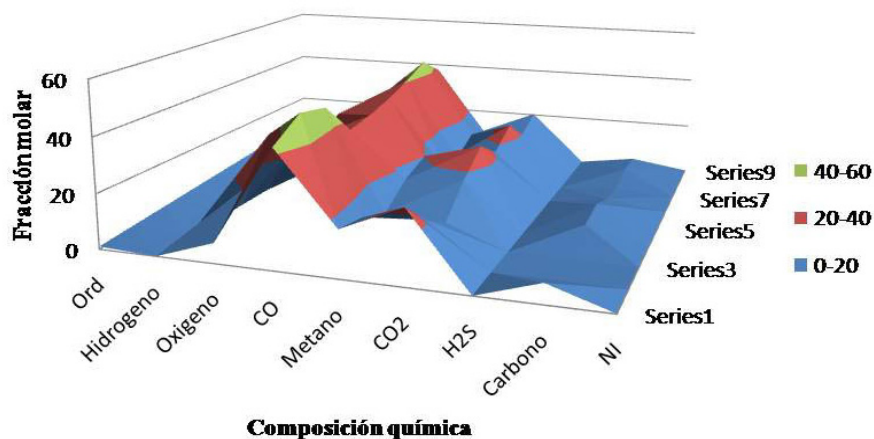


Fig. 6. Composición química del biogás del Cacao CCN51.

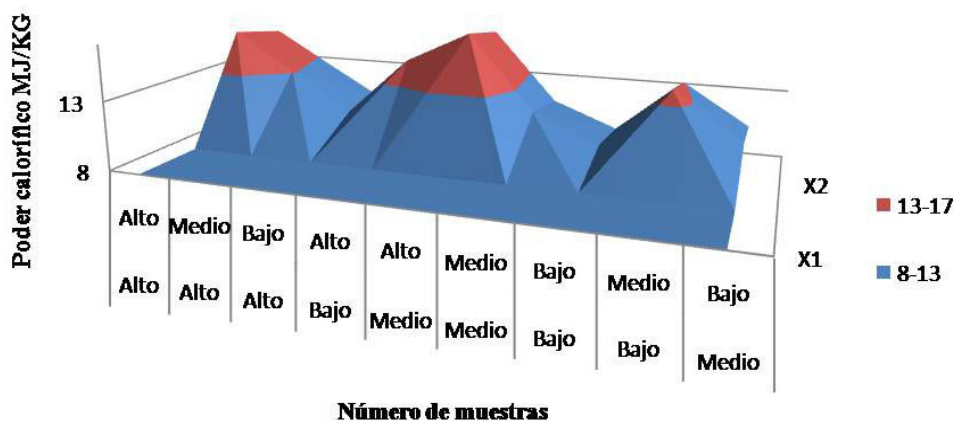


Fig. 7. Poder calorífico-número de muestras y las variables del biogás del Cacao CCN51.

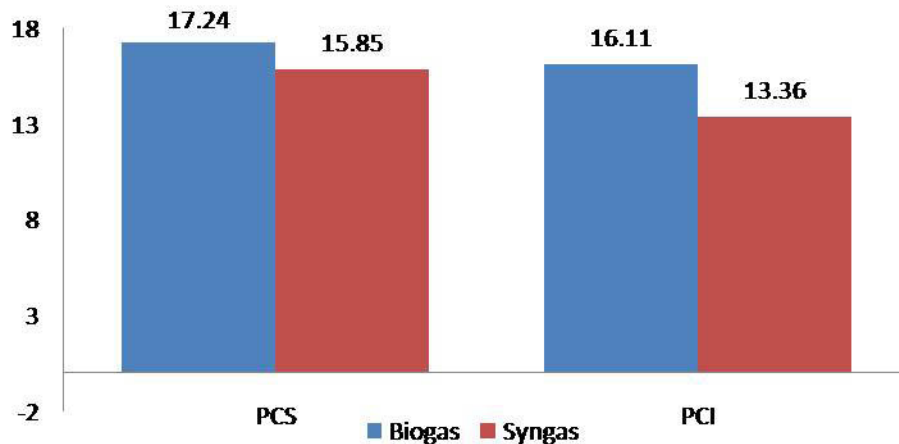


Fig. 8. Comparación del PCS y PCI obtenido por el gas de síntesis y biogás.

es de 17.24 MJ/kg y 16.11 MJ/kg respectivamente lo que representa que el biogás es superior al gas de síntesis en un 8.95%.

5. Conclusiones

- Se determinó que los residuos de cacao CCN51, posterior a pasar por procesos de gasificación anaeróbica y termoquímica, producen gases combustibles que podrían ser utilizados como una alternativa de generación energética dentro de aplicaciones domésticas y agroindustrial debido a que tanto el gas de síntesis como el biogás sirven para la generación eléctrica y sistemas de combustión de alta eficiencia.
- La investigación demostró que el valor más alto de poder calorífico del biogás generado por los residuos de cacao, en las condiciones preestablecidas de experimentación fue 17.24 MJ/kg. En cambio el valor más alto del poder calorífico generado por el gas de síntesis fue de 15.85 MJ/kg, obteniéndose un 8.95% mayor de poder calorífico del biogás frente al gas de síntesis.
- Se estableció que los procesos de producción del biogás y del gas de síntesis son diametralmente distintos en tiempo y forma de producción. El biogás requiere un tiempo mínimo de 15 días para su producción, mantener constante el parámetro de relación C/N y añadir biomasa se genera el biogás de manera continua el cual es almacenado en recipientes adecuados y temperaturas controladas donde los costos de construcción del biodigestor son bajos. En cambio el gas de síntesis requiere de un reactor donde los costos de construcción son altos para su producción, se requiere un tiempo mínimo de 30 minutos para su calentamiento y empezar a producir gas lo que hace que este proceso sea más simple ya que el momento cuando disminuye la

producción de gas de síntesis se abre la tolva y se ingresa más biomasa y el proceso sigue de manera continua.

- Dentro de la investigación se observó que para la generación óptima en las condiciones preestablecidas de experimentación, el poder calorífico en el caso del biogás, los parámetros fueron la relación C/N de 25:1 y un tiempo de retención de 30 días. Para el gas de síntesis los parámetros óptimos de poder calorífico para nuestra investigación fueron: bajo % de humedad de la biomasa (8%), alta cantidad de biomasa (5 kg) y bajo % de apertura de la válvula del Venturi (25%), con estos parámetros de variación se encontraron los valores de poder calorífico más alto para el biogás y el gas de síntesis.
- De la investigación realizada se determina que el biogás sería el más aconsejable para el uso doméstico en los sectores marginales de la costa y el oriente, donde los campesinos no tienen la posibilidad de acceder al servicio continuo de gas licuado de petróleo (GLP), en cambio el gas de síntesis puede fácilmente ser generado por el sector agroindustrial que cuenta con todos los elementos y técnicas para producirlo. El Ecuador al ser un país agrícola por naturaleza brinda un aporte y desarrollo en el uso tecnificado de la biomasa para un mejor aprovechamiento del recurso.
- Como resultado del procesamiento de los datos experimentales se obtuvieron modelos matemáticos para la estimación de los poderes caloríficos inferior y superior tanto para el proceso de digestión anaerobia, como para el de gasificación termoquímica en instalaciones *downdraft*.
- En las ecuaciones obtenidas el error no supera en ninguna de ellas el 7% del valor estimado para un 97% de probabilidad.

Agradecimientos

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, a la Carrera de Ingeniería

ría Mecánica, al Laboratorio de Conversión de Energía, a los docentes, tutores, estudiantes y trabajadores por su importante ayuda en el desarrollo y concreción del presente trabajo de Investigación. En fin, agradecer a todos quienes colaboraron desinteresadamente.

Es necesario dejar constancia del más profundo agradecimiento y reconocimiento, al Laboratorio de investigación, de la Facultad la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, por su invaluable apoyo en el cometimiento de este Proyecto de Investigación.

Agradecemos también al PhD. José Arzola Ruiz por su colaboración en el modelado matemático.

Referencias

- [1] J. Sánchez. *Evaluación energética de cáscaras de cacao nacional y CCN51*. Tesis de maestría. Universidad de Cuenca, Cuenca- Ecuador, 2013.
- [2] Ministerio de Agricultura y Ganadería Ecuador. *Sistema de Información Pública Agropecuaria* [página web]. 2015. Disponible en <http://sinagap.agricultura.gob.ec/produccion-cacao>.
- [3] X. Flotats, E. Campos. & A. Bonmati. *Aprovechamiento energético de residuos ganaderos*. 1997. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/266218474_APROVECHAMIENTO_ENERGETICO_DE_RESIDUOS_GANADEROS
- [4] H. J. Escalante. *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Universidad Industrial de Santander. 2011. Disponible en <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1058>
- [5] A. Romero. "Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles," *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat.*, vol. 104, núm. 2, 2010, pp. 331-345. Disponible en <http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- [6] A. Damien, A. *La biomasa fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. París: Dunod. 2010.
- [7] G. Gutiérrez, I. Moncada, M. Meza, A. Félix, J. Balderas & P. Gortáres, "Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía", *Ide@s CONCYTEG*, vol. 7, núm. 85, 2012, pp. 881-894. Disponible en <http://doczz.es/doc/1297513/biog%C3%A1s--una-alternativa-ecol%C3%B3gica-para-la-producci%C3%B3n-de-e>.
- [8] E. Taiganides, *Biogas: Recuperación de energía de los excrementos animales*, Malasia: Agropecuaria Hemisferio Sur. 1981.
- [9] M. L. Souza-Santos, *Solid Fuels Combustion and Gasification Modeling, Simulation, and Equipment Operation*. State University at Campinas Sao Paulo, 2004.
- [10] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Academic Press, 2010.
- [11] M. Crocker, *Thermochemical conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemicals*. RCS Energy and Environment. 2010. Recuperado de <http://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-1-84973-035-8/>
- [12] A. Rodríguez, A. Zaleta, A. Olivares & F. Torres, *Análisis y diseño de un sistema de gasificación de biomasa*, Memorias del XVI Congreso Internacional anual de la SOMIM. Disponible en http://somim.org.mx/memorias/memorias2010/A5/A5_64.pdf
- [13] C. Estrada, & A. Zapata, "Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor," *Scientia Et Technica*, vol. 10, 2004. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911685028>. ISSN 0122-1701
- [14] L. Aguirre, *Evaluación y caracterización energética del gas de síntesis de biomasa con poder calorífico alto, medio y bajo, producto del proceso de gasificación downdraft de 10 kw*, (tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador, 2017.
- [15] M. Ortega, *Energías Renovables*. Madrid: Paraninfo, 2010.
- [16] A. Gonzales, *Modelo de empresa asociativa acopiadora de cacao fino de aroma para los productores del cantón Quinsaloma* (tesis de maestría). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2012.
- [17] A. Schlegel, *Mauss Proceedings, 25th Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 2013.
- [18] T. A. Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Kottner, T. Finsterwaldes, S. Volke, R. Janssens, *Handbook of Biogas*. University of Southern Denmark, Esbjerg, 2008. Disponible en [http://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1437252](http://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1437252)
- [19] WWF, Asociación para la defensa de la naturaleza [página web], 2018. Disponible en <http://www.wwf.es/>