

Evaluation of the energy potential of organic waste from the agricultural sector in the department of Meta, Colombia.

Evaluación del Potencial Energético de los residuos orgánicos del sector agrícola en el departamento del Meta, Colombia.

**Ariadna Molina¹, Jennifer Sánchez^{1*}, Natalia Mosquera², Zully Gomez³, Karina Solano^{3*},
Francois Herrera^{3*}**

¹Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Ambiental, 111311, Bogotá D.C., Colombia.

*jennifer.sanchez@usantotomas.edu.co, ariadnamolina@usantotomas.edu.co, nataliamosquerab@gmail.com, zullygomez@usta.edu.co, johannasolano@usta.edu.co,

francoisherrera@usta.edu.co

ABSTRACT

In the department of Meta, agricultural production is one of the most relevant economic sectors, being one of the fields with the highest generation of agricultural waste, which is characterized by its energy potential. However, most of them are taken to sanitary landfills, representing an environmental problem due to the lack of techniques for their use and reuse (Núñez, 2012). In addition, they are the main source of odors, leachates, toxic gas emissions and groundwater contamination (Liu et al., 2010, p. 43). The objective of this study is to evaluate the biomethane potential of four agricultural residues (cocoa, banana, corn and orange) from the department of Meta through the mathematical model using the methodology of MinMinas & UPME (2011) and the model applied more recently by Surendran, P. A. & Shanmugam, P. (2021). The study shows that the physicochemical characteristics of the substrates are determinant to evaluate their efficiency in methane production, especially the moisture and ash content, aspects that allowed establishing the most efficient processes for each waste analyzed.

Key words: Agricultural biomass, Agricultural residues, Energy potential, Mathematical models, Renewable energy, Substrate.

RESUMEN

En el departamento del Meta la producción agropecuaria es uno de los sectores económicos más relevantes, siendo uno de los campos con mayor generación de residuos agrícolas, los cuales se caracterizan por su

potencial energético. Sin embargo, la mayoría son llevados a rellenos sanitarios, representando una problemática ambiental debido a la falta de técnicas para su aprovechamiento y reúso (Núñez, 2012). Además, son la principal fuente de emanación de olores, lixiviados, emisión de gases tóxicos y contaminación de las aguas subterráneas (Liu et al., 2010, p. 43). El objetivo del presente estudio es evaluar el potencial de biometano de cuatro residuos de origen agrícola (cacao, plátano, maíz y naranja) del departamento del Meta a través del modelo matemático empleando la metodología de MinMinas & UPME (2011) y el modelo aplicado más recientemente por Surendran, P. A. & Shanmugam, P. (2021). El estudio permite evidenciar que, las características fisicoquímicas de los sustratos son determinantes para evaluar su eficiencia en la producción de metano, especialmente el contenido de humedad y de cenizas, aspectos que permitieron establecer los procesos con mayor eficacia para cada residuo analizado.

Palabras Claves: Biomasa agrícola, Energía renovable, Modelos matemáticos, Potencial energético, Residuos agrícolas, Sustrato.

INTRODUCTION

El constante crecimiento en la población mundial ha aumentado la incertidumbre por la seguridad alimentaria, por consiguiente, los sistemas agroalimentarios del planeta se han vuelto uno de los principales pilares económicos a nivel mundial, según la FAO en 2018, el valor bruto estimado de la producción agrícola ascendió a 3,5 billones de USD. Cada año se producen aproximadamente 11.000 millones de toneladas de alimentos, 32 millones de toneladas de fibras naturales y 4.000 millones de m³ de madera (FAO, 2021). En consecuencia, las tierras dedicadas a cultivos han aumentado en un 110% y los pastos en un 59% desde 1850 hasta 2015, alrededor del mundo (Bahar et al., 2020). Aspecto que no sólo ha incrementado el consumo energético debido a su uso en la cadena de suministro sino también la producción de residuos agrícolas anuales.

La demanda energética continuará creciendo especialmente en los países en vías de desarrollo, según Sagastume Gutiérrez et al (2020) esto se traducirá en un aumento en el consumo del 48% entre 2012 y 2040. Por lo tanto, garantizar el acceso a una energía asequible, confiable y sostenible es uno de los objetivos principales para los países, incentivando la implementación de tecnologías verdes (Sagastume Gutiérrez et al., 2020). En este sentido, la biomasa residual cuenta con un alto interés, esta se refiere a los desperdicios orgánicos o subproductos generados a partir de la transformación natural o artificial de materia viva, como son los restos de cosecha o ganaderos y de plazas de mercado (Núñez, 2012). Su composición se basa

principalmente en carbono, hidrógeno y oxígeno, compuestos que reaccionan exotérmicamente cuando el residuo cede energía, siendo necesario conocer las propiedades del sustrato para identificar su capacidad de aprovechamiento energético (Escalante Hernández, 2010)

El aumento en la generación de residuos es una preocupación a nivel global, según el Banco Mundial se estima que en el año 2016 se generaron 2.010 millones de toneladas de residuos en todo el mundo, y se espera que para el año 2030, este número aumente a 2.590 millones de toneladas al año y para el 2050, se cree que puede llegar a 3.400 millones de toneladas. Los países de ingresos medios y bajos serán los principales contribuyentes en la generación de residuos (Kaza et al., 2018). En Colombia, en el año 2020 se generaron 26,46 millones de toneladas de residuos sólidos y productos residuales derivados de los procesos de producción, consumo y acumulación, con un crecimiento del 3,2% con respecto al año anterior, principalmente ocasionado por un incremento de 5,6% en la oferta generada por los hogares (12,29 millones de toneladas). Los residuos sólidos representaron el 85,3% de esta oferta, mientras que los productos residuales el 14,7% (DANE, 2021).

Colombia se caracteriza por su importante tradición agrícola con una producción de 14.974.807 t/año, que genera alrededor de 71.943.813 t/año de residuos heterogéneos, conformados principalmente por partes de plantas, cáscaras, y frutos (Peñaranda González et al., 2017). En la mayoría de los casos, estos son incinerados o llevados a rellenos sanitarios, siendo la principal fuente de emanación de olores, lixiviados, emisión de gases tóxicos y contaminación de las aguas subterráneas (Liu et al., 2010). Sin embargo, algunas ciudades de Latinoamérica implementan el gas de vertedero y exploran nuevas tecnologías, como la incineración de residuos a energía y la digestión anaeróbica (Kaza et al., 2018). En el departamento del Meta, la producción agrícola es uno de los sectores económicos más relevantes contando con 3.521.152 ha, representando el 41.12% total de hectáreas de la zona (Minagricultura, 2019), este sector produce residuos que pueden representar un problema medio ambiental debido a la falta de técnicas para su aprovechamiento (Núñez, 2012).

Aunque la cobertura de recolección de basuras es bastante alta para la región de América Latina y el Caribe en comparación con las tendencias mundiales, en las comunidades rurales, es de alrededor del 30% (Kaza et al., 2018). En Colombia aproximadamente el 17% de los residuos son aprovechados, una cifra bastante alarmante debido a la gran cantidad de desechos agropecuarios generados. Por esta razón, el país ha buscado implementar diferentes alternativas para el aprovechamiento de residuos, en la industria agropecuaria, de la construcción, biocombustibles, productos farmacéuticos, cosméticos y nutricionales, estas técnicas se basan

principalmente en el uso de estos como biomasa en los procesos de producción (Peñaranda González et al., 2017).

Sagastume Gutiérrez et al (2020) estiman que el potencial de biomasa para 2050 a nivel global será de 1500 EJ, con 200-500 EJ que podrían explotarse de manera sostenible, lo que representa entre el 40-50% de la demanda prevista de energía primaria. Según Núñez, D (2012), Colombia cuenta con un potencial para el aprovechamiento energético alto, gracias a su oferta residual por hectárea, por esta razón, la biomasa se ha establecido como la principal fuente de energía renovable en Colombia, según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en 2017. A pesar de esto, el país solo cuenta con 11 proyectos de generación de energía a base de biomasa, que proyectan una capacidad limitada de 35,7 MW. De igual manera, se han identificado 449 proyectos para desarrollar 11.525 MW de capacidad energética a través de sistemas hidráulicos, solares y eólicos. Por tanto, menos del 2% de los proyectos de energías renovables que se prevé ejecutar hasta el 2023 en Colombia corresponden a fuentes de biomasa (Sagastume Gutiérrez et al., 2020).

Sin embargo, la biomasa también es utilizada en la producción de alimentos para animales y fertilizantes, compitiendo con sus aplicaciones energéticas, por consiguiente, aumentar su uso en sistemas de electricidad puede influir en las prácticas de uso de la tierra, generar un impacto en la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y la competencia por las tierras agrícolas con los cultivos alimentarios, afectando la disponibilidad y los costos de los productos agrícolas. Siendo necesario formular políticas fundamentadas en estudios de las potencialidades y disponibilidad de fuentes de biomasa, para promover una adopción más amplia y adecuada de esta energía, y disminuir su impacto en el sector alimentario (Sagastume Gutiérrez et al., 2020). La economía circular podría ser una estrategia sistemática para abordar los desafíos de la gestión del digestato, las limitaciones de la aplicación de la tierra y la necesidad de postratamiento de los residuos, permitiendo explotar plenamente el valor nutritivo del digestato, garantizar la máxima reutilización del agua y/o permitir una conversión más eficiente en energía (Peng, W. & Pivato, A., 2019). Permitiendo no sólo un desarrollo económico, sino también ambiental y social a través de su contribución en el crecimiento energético y en la utilización de la tierra.

Los datos para este estudio fueron seleccionados en los municipios del departamento del Meta a través de evaluaciones agropecuarias municipales (EVA) que permitieron identificar el área sembrada y cosechada (ha/año), producción (Ton/año), rendimiento y ciclo del cultivo en la zona (Unidad de planificación rural agropecuaria, 2021), como se evidencia en la Tabla 1.

Tabla 1. Base agrícola del departamento del Meta obtenida en las Evaluaciones agropecuarias municipales (EVA) en el periodo entre 2019 y 2021.

Cultivo	Área sembrada	Área cosechada	Producción	Rendimiento	Ciclo del cultivo
	ha/año	ha/año	Ton/año		
Cacao	9831,10	8826,10	5517,57	0,60	Permanente
Maíz	53349,43	53000,30	287896,96	3,73	Transitorio
Naranja	3469,85	3302,35	47937,76	13,22	Permanente
Plátano	25175,27	22629,27	397474,14	13,88	Permanente
Aguacate	3423,31	3275,41	33559,79	7,16	Permanente
Arroz	75156,00	74269,00	462950,29	5,78	Transitorio
Café	2869,91	2446,23	1971,89	0,84	Permanente
Mandarina	361,56	290,16	3778,64	12,47	Permanente
Caña	21972,50	21907,50	887425,00	46,87	Permanente
Palma de aceite	192561,15	186532,15	688759,31	3,63	Permanente
Yuca	7940,70	7789,70	127583,00	14,06	Transitorio
Piña	3025,26	2824,76	147661,06	40,07	Permanente
Papaya	929,00	803,00	15875,30	26,08	Permanente

Fuente: UPRA-EVA, 2021

De igual manera, es necesario conocer el potencial bioquímico de los residuos agrícolas, el cual es considerado como un indicador de biodegradabilidad anaeróbica de un sustrato o biomasa. Este parámetro es fundamental para el análisis tecno económico para la optimización del diseño y la gestión del proceso de digestión anaeróbica, además, indica la estabilidad de los residuos sólidos almacenados en las áreas de disposición (Aravani et al., 2022). Obtener el potencial energético permite identificar el tipo de materia prima más eficiente para el proceso según las condiciones ambientales, la composición y las propiedades fisicoquímicas de la biomasa, permitiendo conocer su potencial de bioenergía. Por consiguiente, en la Tabla 2 se muestra la búsqueda bibliográfica de las metodologías analizadas para la evaluación del potencial de biometano de los residuos seleccionados realizada para el presente estudio.

Tabla 2. Metodologías para la determinación del potencial de biometano estudiadas.

Metodologías	Descripción	Ecuación	Parámetros
MinMinas & UPME, 2011	En primer lugar, es necesario realizar el análisis básico, último elemental, próximo y de Poder Calorífico Inferior (PCI) a las muestras seleccionadas. A continuación, a través de los modelos matemáticos calcular el potencial energético de la biomasa residual, basándose principalmente en “la masa del residuo” y “su contenido energético”, el cual se determinó a través del Poder Calorífico Inferior (PCI).	Los modelos matemáticos utilizados pueden expresarse en forma general como: $PE = (M_{rs} * (E))$ El valor de la Masa de residuo seco se obtiene también a través de una ecuación que relaciona parámetros del cultivo.	Ecuación 1: PE: Potencial energético [TJ/año] M_{rs}: Masa de residuo seco [t/año] E: Energía del residuo por unidad de masa [TJ/t] - PCI: Poder Calorífico Inferior del residuo [TJ/t]
Surendran & Shanmugam, 2021	Se deben emplear fórmulas empíricas para la obtención del poder calorífico de los residuos sólidos vegetales basadas en el potencial estequiométrico y experimental de metano y los valores energéticos caloríficos de los mismos. Obteniendo el valor calorífico estequiométrico (sCEV). Los residuos vegetales deben ser caracterizados utilizando métodos estándar para el examen del agua y las aguas residuales (APHA, 2005). Además, se requiere cuantificar el porcentaje de contribución de cada desperdicio vegetal.	Para el desarrollo de la metodología se secó un peso conocido de la muestra en el horno de aire caliente a 110 °C para eliminar el contenido de humedad presente en el sustrato. $CEV \left(\frac{MJ}{Kg} \right) = 0.349C + 1.1783H - 0.1034O - 0.015N - 0.0211A$	CEV = Valor Calorífico Estequiométrico C, H, N, O y A representan la masa de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cenizas en peso seco, respectivamente
González-Salazar et al., 2014	Esta metodología tiene en cuenta cuatro criterios para la obtención del poder calorífico: (1) fácil de implementar y reproducir, (2) económico para adaptarse a los presupuestos, (3) capaz de estimar el valor teórico y el potencial técnico de energía de biomasa a nivel de país y (4) capaz de estimar la incertidumbre en las predicciones cuando la disponibilidad y la calidad de los datos son limitadas. Para su implementación se debe determinar el área cosechada, los rendimientos de estos residuos, la media y la desviación estándar de	El potencial energético asociado con los residuos agrícolas se calcula utilizando la producción de cultivos P_i, la relación subproducto a cultivo k_{ij}, el contenido de humedad M_{ij} y el poder	P_i: Producción de cultivo k_{ij}: Relación subproducto del cultivo M_{ij}: Contenido de humedad

	los parámetros relevantes, entre otros datos. Por medio del algoritmo de Monte Carlo, se calcula estadísticamente el potencial teórico preliminar de la biomasa, que determina la incertidumbre preliminar y permite identificar los contribuyentes clave a la incertidumbre, a través de una búsqueda bibliográfica se mejora su estimación.	calorífico inferior LHV_{ij} $Q_{AR} = \sum_i \sum_j P_i * k_{ij} * (1 - M_{ij}) * LHV_{ij}$	LHV_{ij}: Poder calorífico interior del residuo agrícola
Cárdenas Cleves et al., 2016	La presente metodología utiliza la ecuación de Buswell para determinar el potencial energético de algunos residuos, debido a que predice el rendimiento de metano y se fundamenta en la composición del sustrato. En el caso de que la composición química elemental de la materia orgánica sea conocida, se puede estimar la cantidad de metano del residuo. Esta ecuación considera que todo el contenido de materia orgánica presente en el sustrato es biodegradable y se convierte en metano. Sin embargo, en condiciones reales está puede contener material orgánico no biodegradable.	$PBM(mLCH_4 gSV) = \frac{22,4 \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} + \frac{b}{4} + \frac{3c}{8} \right) 10^3}{12n + a + 16b + 14c}$ Número de moles de carbono Número de moles de hidrógeno Número de moles de oxígeno Número de moles de nitrógeno Pesos moleculares del carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno	n: Número de moles de carbono a: Número de moles de hidrógeno b: Número de moles de oxígeno c: Número de moles de nitrógeno

Fuente: Compilado por los Autores.

Por medio del Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia se determinó que el departamento del Meta cuenta con un potencial energético en el sector agrícola de 859,52 TJ/año, siendo el quinto departamento con mayor rendimiento en el país. Las evaluaciones evidenciaron el potencial energético de cultivos como la palma de aceite y la caña panelera de 4.039,48 TJ/año y 381,6 TJ/año, respectivamente. Sin embargo, este tipo de cultivos son altamente utilizados en el sector industrial y del transporte, reduciendo significativamente el porcentaje que podría emplearse en el sector energético. Cultivos como el arroz, el plátano y el maíz obtuvieron un potencial energético de 3.994,19 TJ/año, 859,52 TJ/año y 1.186,37 TJ/año, respectivamente; y no son empleados en un alto porcentaje en otros sectores (MinMinas & UPME, 2011). Es necesario realizar estudios que estimen el potencial de los residuos agrícolas para su posterior implementación, por consiguiente, el presente trabajo busca realizar un análisis sobre el poder calorífico de cuatro residuos orgánicos agrícolas del departamento.

MATERIALES Y MÉTODOS

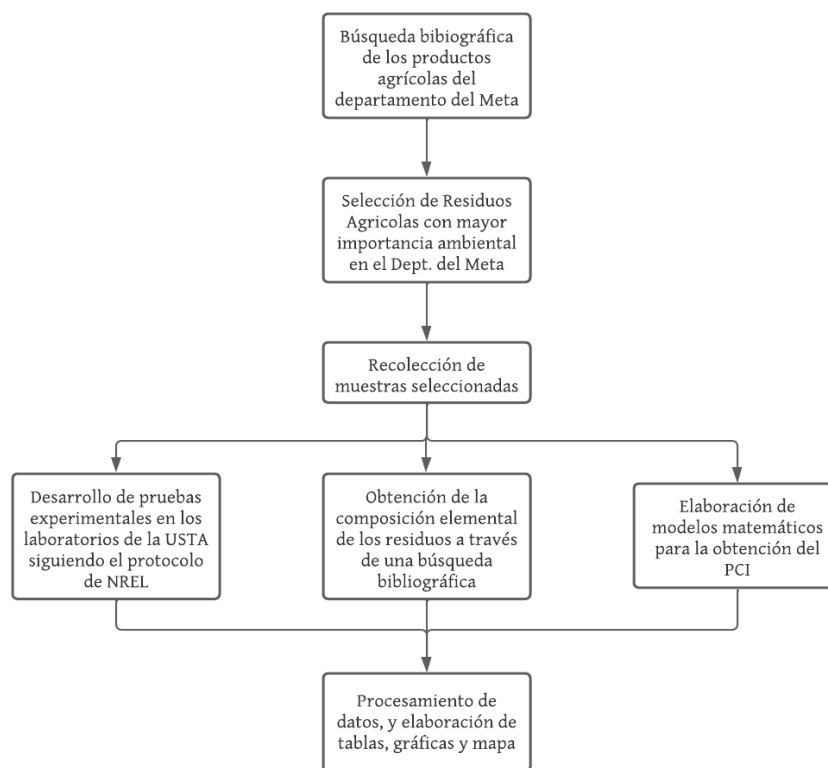


Figura 1. Ruta metodológica. Elaboración propia.

1. Selección de residuos orgánicos agrícolas.

Para el desarrollo de la presente investigación se empleó la ruta metodológica presentada en la Figura 1. Los residuos orgánicos fueron seleccionados por medio de un análisis bibliográfico de los productos agrícolas generados en el departamento del Meta, identificando por medio de la Figura 2 los dos productos agrícolas con mayor producción y rendimiento (maíz y plátano), el cítrico con mayor relevancia (naranja) y el producto con menor implementación en energía con biomasa (cacao) dentro del departamento, los cuales cuentan con importancia ambiental, social y económica.

El maíz, es un residuo permanente con cultivos de ciclos cortos, sin embargo, según la revista de investigación agraria y ambiental únicamente se aprovecha el 50% del cultivo, y el restante es incinerado o desperdiciado. El plátano es un producto altamente desaprovechado cuando no cumple con las características requeridas, convirtiéndose en un residuo, como consecuencia, la producción anual del plátano es de 14.974.807 t/año, mientras que se generan alrededor de 71.943.813 t/año de residuos en el cultivo, una cifra bastante elevada en comparación con su producción. Por otro lado, la naranja es el cítrico más

producido en el departamento del Meta y a nivel nacional, los cítricos cuentan con compuestos favorables para la producción de metano (Peñaranda González et al., 2017). Por su parte el cacao en el periodo comprendido entre 2015 y 2019 en Colombia según el Ministerio de Agricultura, 2020 ha tenido un crecimiento del 11% el área sembrada y la producción de un 9%. Para el año 2019, el área se incrementó en 7.447 hectáreas sembradas (tasa del 4%) con respecto al año anterior y la producción en 2.873 toneladas (tasa del 5%). Por tanto, es un cultivo que ha aumentado significativamente su producción a nivel nacional, y del cual se tienen pocos registros sobre su potencial energético, siendo requerido un estudio en el departamento basándose en sus parámetros fisicoquímicos.

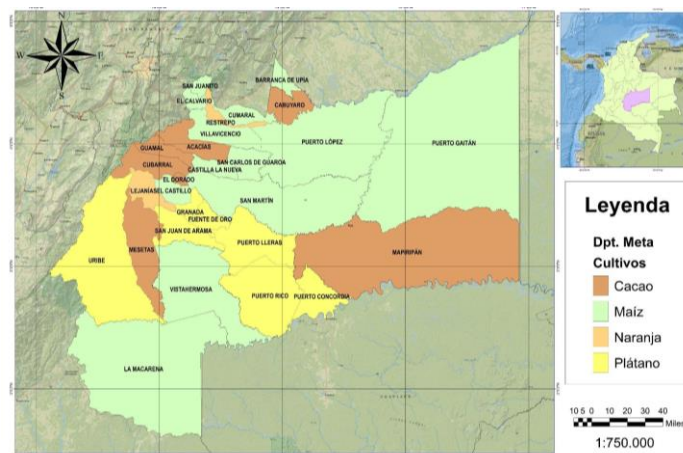


Figura 2. Mapa de los cultivos predominantes en los municipios del Departamento del Meta, Colombia.
Elaboración propia.

2. Recolección y preparación de las muestras.

Se siguió la metodología empleada por MinMinas y la UPME, (2011), se determinó la unidad de muestreo según el área cultivada y la ubicación geográfica de los cultivos seleccionados previamente. La recolección de las muestras agrícolas se llevó a cabo a través del método zig-zag, depositadas en bolsas herméticas debidamente identificadas, posteriormente fueron trasladadas a Bogotá. Para los análisis en laboratorio se tuvo en cuenta el procedimiento estándar de la FAO en la preparación de las muestras. Se utilizaron todas las partes en descomposición de la fruta como el tallo, la cáscara, las semillas y el zumo, las cuales fueron cortadas y trituradas para obtener una mezcla homogénea y representativa de cada fruta. Para no alterar los componentes elementales de los residuos, el procedimiento se realizó rápidamente y con la mínima exposición al medio ambiente. Las cuatro muestras se dividieron en dos partes iguales y fueron almacenadas en bolsas herméticas, y conservadas en refrigeración a temperatura promedio de 4 °C. Sin embargo, una

muestra de cada residuo fue usada en los análisis y el tamaño de partícula al triturar varió entre 2 a 10 mm para la totalidad de las pruebas requeridas.

3. Caracterización fisicoquímica de los residuos agrícolas seleccionados.

Para realizar la caracterización fisicoquímica de los cuatros residuos agrícolas seleccionados en el presente trabajo se utilizaron las metodologías mencionadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Metodologías empleadas para los análisis fisicoquímicos.

Parámetros	Porcentaje de humedad	Porcentaje de cenizas	Porcentaje de sólidos totales y volátiles
Método empleado	Metodología tradicional (método estufa)	Método de prueba estándar para cenizas	Método de horno de convección
Código	ASTM D 5142 – 02	NREL/TP-510-42622	NREL/TP-510-42621
Ecuación	$\%H = \frac{(B - A) - (C - A)}{(B - A)} * 100$ A: Peso cápsula seca B: Peso cápsula + muestra húmeda C: Peso cápsula + muestra seca	$\% \text{ cenizas} = \frac{m_2 - m_{\text{crisol}}}{m_1 - m_{\text{crisol}}} * 100$ m_1 = Masa Crisol con Muestra Seca (después del horno) (g) m_2 = Masa Crisol con las Cenizas (g)	$\%ST = \frac{(A + R)}{(B)} * 100$ $\%SV = \frac{(C) - (A + D)}{(C - A)} * 100$ A: Peso cápsula R: Residuo B: Peso cápsula + muestra húmeda C: Peso cápsula + muestra seca (105°C) D: Peso cápsula + cenizas
Referencia	Zamora Rueda et al., 2016	Sluiter et al., 2008	Stefanie V. & Lieve M., 2015

Fuente: Compilado por los Autores.

4. Selección de la metodología para el cálculo del potencial energético.

El potencial energético de la biomasa estudiada en el presente se determinó a través de los modelos matemáticos relacionados en la Tabla 4.

Tabla 4. Metodologías empleadas para el análisis del potencial energético.

Metodología	Descripción	Parámetros
MinMinas & UPME, 2011	El potencial energético de la biomasa residual se determinó a través de modelos matemáticos, basándose principalmente en “la masa del residuo”	E: Energía del residuo por unidad de masa [TJ/t] - PCI: Poder Calórico Inferior del residuo [TJ/t]

	y “su contenido energético”, el cual se determinó a través del Poder Calorífico Inferior (PCI). A través de la siguiente fórmula: $PE = (M_{rs}) * (E)$ Dónde M_{rs} se obtiene por la siguiente ecuación $M_{rs} = A * R_c * M_{rg} * Y_{rs}$ PE: Potencial energético [TJ/año] M_{rs}: Masa de residuo seco [t/año]	A: Área cultivada [ha/año] R_c : Rendimiento del cultivo [t producto principal/ha sembrada] M_{rg}: Masa de residuo generada del cultivo [t de residuo / t de producto principal] Y_{rs}: Fracción de residuo seco [t residuo seco / t de residuo húmedo] PCI: Poder Calórico Inferior del residuo [TJ/t]
Surendran & Shanmugam , 2021	Se obtuvo el valor calorífico estequiométrico (sCEV) de los residuos sólidos vegetales a través de fórmulas empíricas basadas en el potencial estequiométrico y experimental de metano y los valores energéticos caloríficos de los mismos. Además, se cuantificó el porcentaje de contribución de cada desperdicio vegetal. Para el desarrollo de la metodología se secó un peso conocido de la muestra en el horno de aire caliente a 110 °C para eliminar el contenido de humedad presente en el sustrato.	$CEV \left(\frac{MJ}{Kg} \right) = 0.349C + 1.1783H - 0.1034O - 0.015N - 0.0211A$ CEV = Valor Calorífico Estequiométrico C, H, N, O y A representan la masa de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cenizas en peso seco, respectivamente

Fuente: Compilado por los Autores.

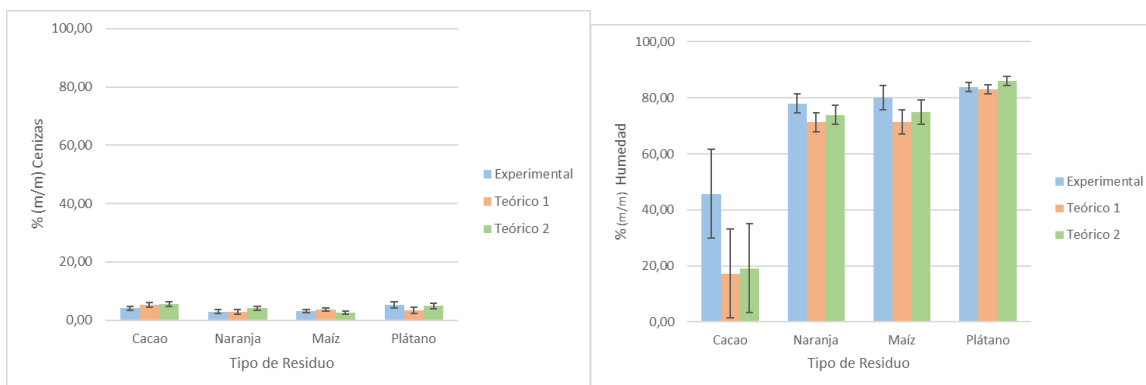
RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se llevaron a cabo ensayos experimentales en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás, con la finalidad de determinar los parámetros fisicoquímicos de las muestras, como el contenido de humedad, de cenizas, de sólidos totales y volátiles, los cuales fueron comparados a través de gráficas de barras con dos diferentes bases de datos como se muestra en la Figura 3 y 4, de las cuales se obtuvieron las propiedades fisicoquímicas de los residuos analizados.

Figura 3. Valores teóricos encontrados de los residuos seleccionados para cada parámetro.

% Cenizas	Cacao		Naranja		Maíz		Plátano	
	5,14	5,54	2,8	4,06	3,7	2,54	3,3	4,85
	Vivanco Carpio, E., et al., 2017		Li, A. M., et al., 1999	Rojas-González, A. F., et al., 2019.	Demirbaş, A., 1997	D'Jesús, P., et al., 2006	Martínez-Cardozo C, et al., 2016	Giraldo Cano, N. & Montoya Martínez, N., 2015
% Humedad	17,3	19,2	71,27	73,9	71,49	75	83	86,04
	Sandoval, A. J., et al., 2019	Tinajero-Carrizales, C., et al., 2021	Rojas-González, A. F., et al., 2019.	Li, A. M., et al., 1999	Ocanto G., et al., 2013	Infante, B. et al., 2016	Martínez Cardozo, C, et al., 2016	Ramírez Sedeño, K. et al.2019
% Sólidos Volátiles	79,9	78,4	82,5	80,79	85,17	84,3	89,36	88,4
	Lin, K. O., & Malar Vizhi, S. (1993)	Universität Stuttgart & CORDIS, 2004.	Li, A. M., et al., 1999	Rojas-González, A. F., et al., 2019.	NREL, 1988	Evans, R. J., ET AL., 1988	Giraldo Zuleta, S., et al.,2017	
% Sólidos Totales	19,6	19,82	14,7	18,34	14,83	15,7	10,64	11,96
	Lin, K. O., & Malar Vizhi, S. (1993)	Universität Stuttgart & CORDIS, 2004.	A.M.Li, et al.,2001	Aguilar, L., et al., 2009	NREL, 1988	Evans, R. J., ET AL., 1988	Giraldo Zuleta, S., et al.,2017	

Fuente: Compilación de Autores.



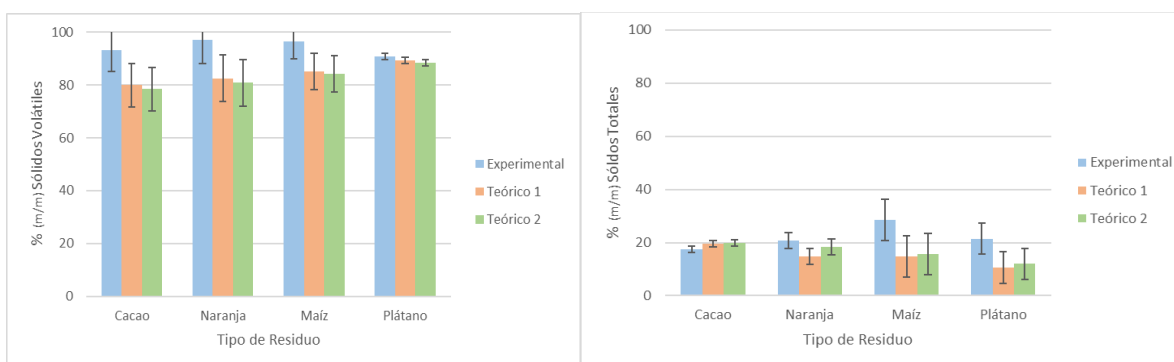


Figura 4. Gráficas de barras de las propiedades fisicoquímicas (H = humedad, Ce = cenizas, SV = Sólidos Volátiles y ST = sólidos totales) para los residuos de cacao, naranja, maíz y plátano. Elaboración propia.

Los sustratos pueden ser clasificados en cuatro categorías, de clase 1 pueden degradar eficientemente en biodigestores tipo Batch o por lotes, los de la clase 2 son degradados de manera eficiente en digestores mezcla completa de operación continua, de clase 3 deben tratarse con digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio, por último, de clase 4, por su alto contenido de Demanda Química de Oxígeno deben ser degradados en digestores aerobios intensivos para mayor eficiencia. Los residuos empleados en el presente estudio se consideran sustratos clase 1, que se caracterizan por ser sólidos provenientes de basura doméstica, estiércol sólido y restos de cosecha con un porcentaje de sólidos totales menor al 20%, y una fracción orgánica del 40-70 % (Ministerio de Energía et al., 2011).

Como se observa en la Figura 3 y Figura 4, los cuatro residuos presentan un bajo porcentaje de cenizas y un alto contenido de material volátil, siendo ideal para ser aprovechada energéticamente mediante procesos como pirólisis o gasificación. El contenido de sólidos volátiles representa el material disponible para el desarrollo y reproducción de bacterias anaeróbicas, en consecuencia, el contenido de materia volátil y sólidos totales son parámetros influyentes en la transformación energética de la biomasa (MinMinas & UPME, 2011). Por consiguiente, los cuatro sustratos cuentan con un buen resultado si son implementados debido a su alto contenido de materia volátil que indica una alta reactividad en la combustión (Rojas et al., 2019). Por otro lado, debido a que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato disminuye a medida que el contenido de sólidos totales aumenta, viéndose afectada la eficiencia y la producción de biogás, limitando el transporte masivo, afectando la capacidad de descomposición que tienen los microorganismos al no tener suficiente humedad e influyendo de manera negativa en su crecimiento (Giraldo Zuleta & Garzón Mora, 2017).

Según Aravani, V. P., et al., 2022, el cacao al tener un bajo porcentaje de humedad, como se comprueba con los datos registrados en la Figura 3 y 4, puede utilizarse en procesos de combustión directa o termoquímicos debido a que la biomasa con un contenido de humedad inferior al 50-55% y $C/N > 30$ se considera adecuada para tratamientos como pirólisis o gasificación. La naranja, el plátano y el maíz al tener un porcentaje de humedad superior al 50% tienen mayor eficiencia en procesos bioquímicos debido a que la biomasa con un contenido de humedad superior al 50-55% y bajo C/N (preferiblemente < 30) es adecuada para conversiones, como la digestión aeróbica o anaeróbica (AD) o la fermentación (Aravani et al., 2022). El plátano es el residuo con mayor contenido de humedad y al tener un contenido de sólidos totales reducido, tiene una producción de biogás óptima (Giraldo Zuleta & Garzón Mora, 2017).

Para la determinación del potencial energético se empleó en primer lugar el modelo matemático utilizado por MinMinas y UPME, 2011 que relacionan la cantidad total de cultivo generados en el Departamento del Meta. Por otro lado, la ecuación de Surendran, P. A & Shanmugam, P., 2021 permite determinar el poder energético de las muestras recolectadas para el presente estudio a través de su composición elemental, datos registrados en la Tabla 5, y el porcentaje de cenizas en peso seco. Al emplear las dos ecuaciones planteadas se obtuvieron dos diferentes resultados para cada residuo permitiendo un análisis más detallado.

Tabla 5. Composición Elemental de los Residuos.

Análisis Elemental de los Residuos					
Residuos	%C	%H	%O	%N	Referencia
Cacao	50,20	6,20	39,70	3,70	K. Lassing, E. O. and L. W. T. (2001).
Naranja	48,61	5,97	43,77	1,59	L. Aguiar, F. M.-M. A. G. J. S. J. A. (2008).
Maíz	44,53	6,33	47,03	1,05	P. D'Jesus, N. B. B. K.-C. (2006).
Plátano	48,4	7,27	42,91	1,36	Rojas, A. F., et al., (2019).

Fuente: Compilado por los Autores.

Tabla 6. Cálculo experimental de Potencial Energético de los Residuos.

Potencial Energético		
Residuos	PE (TJ/t)	sCEV (MJ/kg)

Cacao	5.916.756	20,20
Naranja	18.424.821.474	19,02
Maíz	92.518.255.143	17,67
Plátano	808.502.666.742	20,45

Fuente: Elaboración propia.

El potencial energético obtenido a través del modelo matemático de MinMinas & la Unidad de Planeación Minero-Energética -UPME- (2011) se relaciona con los valores de área cosechada, producción y rendimiento de los cultivos, en consecuencia, el cacao y la naranja obtuvieron un bajo factor energético debido a que cuentan con la menor producción en el Departamento del Meta entre los cuatro residuos estudiados como se evidencia en la Figura 2. Sin embargo, tienen la energía por unidad de masa más altas de las cuatro analizadas, 0,01821 TJ/Kg y 0,02672 TJ/Kg, respectivamente, valores obtenidos a través de una búsqueda bibliográfica encontradas en UPRA-EVA, 2021 realizando una conversión a Toneladas Joules sobre Kilogramo para así poder realizar los cálculos. Por otro lado, el modelo matemático Surendran, P. A. & Shanmugam, P., 2021, al basarse en la estequiometría tiene en cuenta el número de moles del compuesto y su contenido de cenizas, el cacao obtuvo el segundo valor más alto entre los residuos analizados debido a que obtuvo un alto valor de cenizas a través de los ensayos experimentales realizados por triplicado, sin embargo, la naranja obtuvo el porcentaje de cenizas más bajo de los cuatro productos.

El cacao obtuvo un potencial energético de 20,20 MJ/Kg como se evidencia en la Tabla 6, debido a que su producción es menor a la de los otros cultivos. Sin embargo, en el 2019, el área sembrada en Colombia incrementó en un 4% y la producción en un 5% con respecto al año anterior (Ministerio de Agricultura, 2020). Los cítricos como la naranja cuentan con compuestos favorables para la producción de metano obteniendo curvas monofásicas y un rendimiento de metano superior al 90% entre los 40 y 50 días de fermentación, por esta razón, aunque la naranja tuvo menor porcentaje de cenizas cuenta con mayor potencial energético que el maíz. Por otra parte, las tasas de producción de metano de las cáscaras de plátano son más altas que la mayoría de los residuos de frutas (Gunaseelan, 2004), siendo el sustrato con mayor potencial de biometano de los analizados con 20,45 MJ/Kg.

CONCLUSIONES

El cacao obtuvo un potencial de biometano de 20,20 MJ/Kg; tener una producción menor a la de los demás cultivos afectó negativamente su capacidad energética a través del primer modelo matemático empleado. Sin embargo, en Colombia ha aumentado significativamente su producción, y al ser menos utilizado en otros sectores económicos, a diferencia del maíz y el plátano, podría generar una mayor eficiencia en la producción de energía gracias a su alto potencial en procesos de combustión directa o termoquímicos, además, al ser un sustrato con poco contenido de humedad requiere menor gasto energético en el proceso de combustión, aspecto que se puede evidenciar con los modelos matemáticos empleados. Por otra parte, la naranja al ser un cítrico cuenta con compuestos favorables para la producción de metano, el cual puede ser aprovechado energéticamente mediante procesos como la fermentación o digestión anaeróbica.

A través de los dos modelos matemáticos empleados, se obtuvo que el plátano es el residuo con mayor eficiencia debido a su alto porcentaje de humedad y de cenizas favoreciendo la producción de metano, además, a diferencia de los otros residuos este cuenta con un contenido de azúcares, celulosa, almidón y proteínas elevado, los cuales influyen positivamente en el proceso de fermentación permitiendo mayor eficiencia en la producción del potencial energético (González-Sánchez, M. E., et al.2015). Además, al ser un cultivo permanente, es decir, que se da durante todo el año favorece la producción de potencial energético, por el contrario, el maíz es un cultivo transitorio porque su ciclo vegetativo dura pocos meses al año, disminuyendo su eficiencia ya que durante algunos meses no se obtendrá el residuo suficiente para el proceso energético.

Agradecimientos.

El presente trabajo fue apoyado por el proyecto FODEIN denominado "Evaluación de la viabilidad de Integración de residuos agroindustriales lignocelulósicos en mezclas de residuos poliméricos a través de vigilancia tecnológica, caracterización fisicomecánica y análisis ambiental".

REFERENCIAS

- Aguiar, L., Márquez-Montesinos F, & Sánchez, J. L. (2009). *Influence of temperature and particle size on the fixed bed pyrolysis of orange peel residues*.
- Aravani, V. P., Tsigkou, K., Papadakis, V. G., & Kornaros, M. (2022). Biochemical Methane potential of most promising agricultural residues in Northern and Southern Greece. *Chemosphere*, 296, 133985. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133985>

- Bahar, N. H. A., Lo, M., Sanjaya, M., Van Vianen, J., Alexander, P., Ickowitz, A., & Sunderland, T. (2020). Meeting the food security challenge for nine billion people in 2050: What impact on forests? *Global Environmental Change*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102056>
- Banco Mundial. (2019, March 6). Convivir con basura: el futuro que no queremos. *Grupo Banco Mundial*.
- Cárdenas Cleves, L. M., Parra Orobio, B. A., Torres Lozada, P., & Vásquez Franco, C. H. (2016a). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista ION*, 29(1), 95–108. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>
- Cárdenas Cleves, L. M., Parra Orobio, B. A., Torres Lozada, P., & Vásquez Franco, C. H. (2016b). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista ION*, 29(1), 95–108. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>
- DANE. (2021). *Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales – residuos sólidos (CAEFM-RS)*.
- Demirbaş, A. (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel*, 76(5), 431–434. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)85520-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)85520-2)
- D’Jesús, P., Boukis, N., Kraushaar-Czarnetzki, B., & Dinjus, E. (2006). Gasification of corn and clover grass in supercritical water. *Fuel*, 85(7–8), 1032–1038. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.10.022>
- Escalante Hernández, H. (2010a). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*.
- Escalante Hernández, H. (2010b). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*.
- Evans, R. J., Knight, R. A., Onischak, M., & Babu, S. P. (1988). *Development of biomass gasification to produce substitute fuels*. <https://doi.org/10.2172/5206147>
- FAO. (2021). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2021. In FAO (Ed.), *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2021*. FAO. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cb4476es>
- Giraldo Cano, N., & Montoya Martínez, N. (2015). *Caracterización de residuos de banano (pseudotallo y hojas) mediante análisis termogravimétrico para uso potencial como biocombustible sólido*.
- Giraldo Zuleta, S., & Garzón Mora, J. M. (2017a). *Análisis del efecto de la semilla del mango en la producción de biogás a partir de la fermentación de residuos de mango*.
- Giraldo Zuleta, S., & Garzón Mora, J. M. (2017b). Análisis del efecto de la semilla del mango en la producción de biogás a partir de la fermentación de residuos de mango (*Manguifera indica*) y banano (*musa paradisiaca*). *Instname: Universidad de Los Andes*. <http://hdl.handle.net/1992/39945>
- Gonzales-Salazar, M. A., Morini, M., Pinelli, M., Spina, P. R., Venturini, M., Finkenrath, M., & Poganietz, W. R. (2014). Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia. *Applied Energy*, 136, 781–796. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.004>

- González-Sánchez, M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., & Yáñez-Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- Gunaseelan, V. N. (2004a). Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.006>
- Gunaseelan, V. N. (2004b). Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.006>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. In *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Li, A. M., Li, X. D., Li, S. Q., Ren, Y., Shang, N., Chi, Y., Yan, J. H., & Cen, K. F. (1999). Experimental studies on municipal solid waste pyrolysis in a laboratory-scale rotary kiln. *Energy*, 24(3), 209–218. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00095-4)
- Lim, K. O., & Malar Vizhi, S. (1993). Carbonisation of cocoa tree prunings at moderate temperatures. *Bioresource Technology*, 44(1), 85–87. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(93\)90214-V](https://doi.org/10.1016/0960-8524(93)90214-V)
- Liu, X.-Y., Ding, H.-B., & Wang, J.-Y. (2010). Food Waste to Bioenergy. In *Bioenergy and Biofuel from Biowastes and Biomass* (pp. 43–70). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784410899.ch03>
- López-Dávila, E., Hernández, J. J., López González, L. M., Barrera Cardoso, E. L., Amarante, E. B., Contreras Velázquez, L. M., & Romero-Romero, O. (2022). Biochemical methane potential of agro-wastes as a renewable source alternative for electrical energy production in Cuba. *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, 23(1). https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:1890
- Martínez-Cardozo C, Cayón-Salinas G, & Ligarreto-Moreno G. (2016). *Composición química y distribución de materia seca del fruto en genotipos de plátano y banano*. 217–227.
- Minagricultura. (2020). *Cadena del Cacao*.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *Plan Integral de Desarrollo Agropecuario y Rural con enfoque territorial*. Departamento del Meta (V. Aguirre Vera & D. M. Rendón Murillo, Eds.).
- Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Global Environment Facility. (2011). *Manual de Biogás. Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables* (M. T. Varnero Moreno, Ed.).

- Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero-Energética. (2011). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia* (H. Escalante Hernández, J. Orduz Prada, H. J. Zapata Lesmes, M. C. Cardona Ruiz, & M. Duarte Ortega, Eds.).
- Montenegro Orozco, K. T., Rojas Carpio, A. S., Cabeza Rojas, I., & Hernández Pardo, M. A. (2017). Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. *Revista ION*, 29(2), 23–36. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016002>
- NREL. (1988). *SERI Standard Broadband Format: A Solar and Meteorological Data Archive Format*. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/assets/data/3305.pdf>
- Núñez, D. (2012). *Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta*. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/6858/8442>
- Peñaranda Gonzalez, L. V., Montenegro Gómez, S. P., & Giraldo Abad, P. A. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 141–150. <https://doi.org/10.22490/21456453.2040>
- Peng, W., & Pivato, A. (2019). *Sustainable Management of Digestate from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy*.
- Ramírez Sedeño, K., & Ortiz Hernández, L. (2019). *Generación de Residuos de Plátano y su Posible Utilización para Apoyar la Seguridad Alimentaria*.
- Rojas, A. F., Rodríguez-Barona, S., & Montoya, J. (2019). Evaluación de Alternativas de Aprovechamiento Energético y Bioactivo de la Cáscara de Plátano. *Información Tecnológica*, 30(5), 11–24. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500011>
- Rojas-González, A. F., Flórez-Montes, C., & López-Rodríguez, D. F. (2019). Prospectivas de aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales. *Revista Cubana de Química*, 31(1), 30–52.
- Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J. J., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2020). The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 269(122317). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317>
- Sandoval, A. J., Barreiro, J. A., De Sousa, A., Valera, D., López, J. V., & Müller, A. J. (2019). Composition and Thermogravimetric Characterization of Components of Venezuelan Fermented and dry Trinitario Cocoa Beans (*Theobroma cacao* L.): Whole Beans, Peeled Beans and Shells. *Revista Tecnica De La Facultad De Ingenieria Universidad Del Zulia*, 38–45. <https://doi.org/10.22209/rt.v42n1a06>
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., & Templeton, D. (2008). *Determination of Ash in Biomass Laboratory Analytical Procedure (LAP)*.

- Stefanie V., & Lieve M. (2015). *Determination of Total Solids and Ash in Algal Biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP)*.
- Surendran, P. A., & Shanmugam, P. (2021). Correlation between empirical formulae based stoichiometric and experimental methane potential and calorific energy values for vegetable solid wastes. *Energy Reports*, 7, 19–31. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2020.10.071>
- Tinajero-Carrizales, C., González-Pérez, A. L., Rodríguez-Castillejos, G. C., Castañón-Nájera, G., & Ruíz-Salazar, R. (2021). Comparación proximal en cacao (*Theobroma cacao*) y pataxte (*T. bicolor*) de tabasco y Chiapas, México. *Polibotánica*, 0(52). <https://doi.org/10.18387/polibotanica.52.10>
- Unidad de planificación rural agropecuaria. (2021). *Evaluaciones agropecuarias municipales (EVA)*.
- Universität Stuttgart, & CORDIS. (2004, September). *quality of secondary fuels for pulverised fuel co-combustion (SEFCO)*.
- Vivanco Carpio, E., Matute Castro, L., & Campo Fernández, M. (2017). *Caracterización físico-química de la cascarilla de Theobroma cacao L, variedades Nacional y CCN-51*.
- Zamora Rueda, G., Gutiérrez, C., Mistretta, G., Peralta, F., Golato, M., Ruiz, M., & Paz, D. (2016). Determinación del contenido de humedad del bagazo de caña de azúcar por medio de microondas. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán*, 93(2), 7–12.