

Evaluación energética de la co-combustión de contenido ruminal-metano en frigoríficos y mataderos del departamento de Córdoba-Colombia

Energy evaluation of the co-combustion of rumen-methane content in slaughterhouses and slaughterhouses in the department of Córdoba-Colombia

<https://doi.org/10.17981/ladee.01.02.2021.5>

Fecha de Recibido: 30/06/2021 Fecha de Aceptado: 20/06/2021

Jesús David Rhenals-Julio

Universidad de Córdoba. Montería (Colombia)
jesusrhenalsj@correo.unicordoba.edu.co

Jorge Mario Mendoza Fandiño

Universidad de Córdoba. Montería (Colombia)
jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co

Taylor de Jesús de la Vega González

Universidad de Córdoba. Montería (Colombia)
tdelavegagonzalez@correo.unicordoba.edu.co

Stiven Javier Sofan German

Universidad de Córdoba. Montería (Colombia)
ssofangerman@correo.unicordoba.edu.co

Para citar este artículo:

J. D. Rhenals-Julio, J. M. Mendoza, T. De la Vega & F. J. Sofan, "Evaluación energética de la co-combustión de contenido ruminal-metano en frigoríficos y mataderos del departamento de Córdoba-Colombia", *LADEE*, vol. 2, no. 1, pp. 44-53, 2021. <https://doi.org/10.17981/ladee.01.02.2021.5>

Resumen— La generación de energía por medio de fuentes renovables ha ganado importancia en campos investigativos de la ingeniería gracias a los efectos adversos que generan los combustibles fósiles. En ese sentido, la biomasa residual representa una alternativa de bajo costo. En el departamento de Córdoba el sector agropecuario tiene una mayor participación en el PIB siendo la principal actividad económica la ganadería, donde se generan grandes cantidades de contenido ruminal bovino que podría ser aprovechado como fuente de energía térmica, ayudando a minorar costos de combustibles y a reducir el impacto ambiental. En este trabajo se evalúa la co-combustión entre el contenido ruminal y el metano en plantas de sacrificio con miras a su aprovechamiento energético. Para ello se realizó una caracterización fisicoquímica de la biomasa por medio de análisis último, granulometría, densidad real, densidad aparente, porosidad, curvas de secado para determinar la cinética de la biomasa y un modelo de combustión adiabática. Los resultados obtenidos muestran un poder calorífico de 10229.80 kJ/kg, granulometría de 1.70 mm, una densidad real, densidad aparente y una porosidad de 1.631, 0.750 (g/cm³) y 0.528 respectivamente, una relación aire-biomasa de 2.55, temperatura de llama adiabática de 1598°C y una eficiencia del 87% del proceso. Se concluye que existe un potencial energético que puede ser aprovechado para la sustitución de metano como combustible.

Palabras clave— Material ruminal; caracterización fisicoquímica; curvas de secado; co-combustión; granulometría

abstract— The generation of energy by means of renewable sources has gained importance in engineering research fields thanks to the adverse effects generated by fossil fuels. In this sense, residual biomass represents a low cost alternative. In the department of Córdoba, the agricultural sector has a greater participation in the GDP, the main economic activity being cattle raising, where large quantities of bovine rumen content are generated that could be used as a source of thermal energy, helping to reduce fuel costs and environmental impact. This work evaluates the co-combustion between rumen content and methane in slaughter plants with a view to its energetic use. For this purpose, a physicochemical characterization of the biomass was carried out by means of final analysis, granulometry, real density, apparent density, porosity, drying curves to determine the kinetics of the biomass and an adiabatic combustion model. The results obtained show a calorific value of 10229.80 kJ/kg, granulometry of 1.70 mm, a real density, bulk density and porosity of 1.631, 0.750 (g/cm³) and 0.528 respectively, an air-biomass ratio of 2.55, adiabatic flame temperature of 1598°C and an efficiency of 87% of the process. It is concluded that there is an energy potential that can be exploited for the substitution of methane as fuel.

Keywords— Rumen material; physicochemical characterization; drying curves; co-combustion; particle size



I. INTRODUCCIÓN

La combustión de la biomasa es un proceso complejo que consiste en reacciones consecutivas heterogéneas y homogéneas. Los principales pasos del proceso son el secado, la desvolatilización, la gasificación, la combustión del carbón y la oxidación de la fase gaseosa [1], [2]. La combustión de la biomasa está fuertemente influenciada por las propiedades fisicoquímicas de ésta y las condiciones de reacción (ejemplo: relación aire/combustible). La cantidad de calor liberado durante la combustión depende del contenido de energía en el combustible y de la eficiencia de la reacción. La materia orgánica representa la mayoría de la energía de la biomasa. Sin embargo, la fracción inorgánica también tiene importancia en el diseño y operación del sistema de combustión, particularmente en lo que respecta a incrustaciones de cenizas y escoria [3]. Como se mencionó anteriormente, las vías de procesamiento de uso final de los combustibles de biomasa dependen de sus propiedades fisicoquímicas [2]. Estas propiedades dependen de los siguientes factores: La composición bioquímica, el contenido de humedad, el contenido de materia mineral, la composición elemental de materia orgánica (C, H, O, N, S), y las propiedades físicas. De acuerdo con ciertas investigaciones [4] la composición química del contenido ruminal bovino tiene altos niveles de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo cual es propio de las biomásas lignocelulósicas.

En la actualidad existen tres tecnologías que son ampliamente utilizadas para la combustión a gran escala de biomasa, estas son: la combustión en suspensión de biomasa pulverizada, la combustión con diferentes tipos de lechos fluidos y la quema de biomasa en rejillas o parrillas vibrantes o móviles. Las tres tecnologías tienen ventajas y desventajas con respecto a su uso con biomasa, y pueden verse como tecnologías complementarias en lugar de competitivas [5]. La quema de biomasa en parrillas viajeras o vibrantes se caracteriza por ser capaz de quemar casi cualquier tipo de combustible sólido independientemente de su condición, pero tienen una eficiencia más baja en comparación con los sistemas de biomasa pulverizada. Por otro lado, los sistemas en suspensión requieren de una alta calidad de la biomasa en cuanto a secado y pulverizado para su funcionamiento, pero funcionan mejor que todas las tecnologías usadas para el quemado de la biomasa [6]. La biomasa utilizada para los sistemas en suspensión básicamente utiliza la misma tecnología que para la combustión del carbón, la cual ya ha sido bien probada. Esta tecnología incluye pulverización en molinos, transporte neumático en sistemas de tuberías y el uso de intrincados patrones de remolino dentro del quemador para una combustión óptima, además de ciclones y filtros para el tratamiento de los productos de combustión. En cuanto al tamaño de la biomasa, en los sistemas en suspensión el combustible se debe reducir a tamaños del orden de mm y μm [5], [7]. Los lechos fluidizados presentan eficiencias relativamente altas y también son flexibles con respecto al combustible. Una ventaja de los sistemas de lecho fluidizado es que forman menos NO_x térmico en comparación con otras técnicas de combustión [8]. Mientras las desventajas notorias de esta tecnología son el alto costo de energía para el suministro de aire y el alto desgaste de las superficies de la cámara de combustión debido a la combustión del lecho.

El Contenido Ruminal puede ser usado como combustible sólido para satisfacer parcialmente la demanda de energía en forma de calor. Esta biomasa contiene una alta humedad, al punto que por cada res se generan de 40 kg a 50 kg húmedos de material ruminal que en estado seco puede llegar a pesar de 12 kg a 10 kg [9], [10]. Además, presenta un poder calorífico muy bajo, del orden de 2581 kcal/kg a 2950 kcal/kg, cuando se le compara por ejemplo con el carbón, para el cual es de 7000 kcal /kg aproximadamente. Por lo anterior, el secado y la co-combustión de contenido ruminal-gas natural presenta grandes retos tecnológicos y de investigación.

En este estudio se realiza una caracterización del material ruminal con miras a su aprovechamiento energético en los procesos de co-combustión. Para ello, se divide el trabajo en cuatro secciones. En la primera sección se encuentra una revisión del estado del arte, donde se recopila información concerniente a las integraciones de fuentes renovables de energía a sistemas productivos. En la segunda sección se presentan los materiales y métodos utilizados tales como la caracterización fisicoquímica de la biomasa, curvas de secado a diferentes temperaturas, procesos de combustión adiabáticos y eficiencia térmica del proceso. En la tercera sección se destacan los resultados obtenidos en la composición del combustible, el poder calorífico, la temperatura de llama adiabática y análisis de granulometría del material ruminal. Finalmente se presentan algunas conclusiones producto de los resultados obtenidos.

II. METODOLOGÍA

A. Muestreo del contenido Ruminal

Para efectuar la caracterización física y química del contenido ruminal se realizó un muestreo representativo bajo las normas ASTM D-2234 [18] y NTC 5167 [19], adoptando el muestreo tipo pila, en el que se seleccionaron muestras de diferentes lotes del sitio de acopio, con tiempos de almacenamiento entre 1-45 días. Posteriormente se homogenizó para luego realizar el cuarteo y empaque final en bolsas ziploc estériles.

B. Curvas de Secado

Se obtuvieron curvas de secado del contenido ruminal obtenido en el muestreo con el fin de conocer su comportamiento de pérdida de humedad bajo diferentes temperaturas fijas: 105°C, 60°C y 50°C. Este proceso se realizó en una mufla digital Thermo Scientific, donde se colocaron cinco muestras para las temperaturas mencionadas, con un peso inicial de entre 19- 22 g en crisoles de porcelana, monitoreando a través del tiempo la pérdida de humedad. Para este fin se pesaba en el tiempo estipulado cada crisol en una balanza analítica Sartorius (4 cifras significativas), la cual se sitúa al lado de la mufla, haciendo que el procedimiento se realizara en corto tiempo para asegurar que la muestra no ganara humedad nuevamente.

C. Densidad Aparente y Real de la biomasa.

La densidad aparente se determina con base en el volumen de la biomasa, incluyendo sus poros o cavidades presentes en ella. Para eso fue necesario utilizar el principio de Arquímedes con el fin de medir el volumen de la biomasa y se muestra mediante (1).

$$\rho_{aparente} = \frac{\text{Masa total de la biomasa}}{\text{Volumen desplazado por la biomasa}} \quad (1)$$

La Ecuación (1) se utiliza comúnmente para cálculos de diseño, ya que es la más fácil de implementar y se trabaja con el volumen real ocupado el material.

Por otro lado, para determinar la densidad real que presenta la biomasa, se realizó un análisis de densidad en un picnómetro AccuPyc.

D. Porosidad de la biomasa.

Para determinar la porosidad del material ruminal se estimó que el volumen de los vacíos o poros de la biomasa puede expresarse como una relación de su volumen real y su volumen aparente, de esta manera se cuantifica la porosidad intrínseca y de apilamiento. Esta relación se hace con la densidad real, la densidad aparente y la granular como se muestra en (2) y (3).

$$\rho_{aparente} = \rho_{real} (1 - \varepsilon_p) \quad (2)$$

$$\rho_{granel} = \rho_{aparente} (1 - \varepsilon_b) \quad (3)$$

Donde ε_p es la porosidad y ε_b es el índice de empaquetamiento entre las partículas de biomasa

E. Análisis de Granulometría de la Biomasa

Se determinó la distribución del tamaño de partícula en una muestra representativa del contenido ruminal por el método gravimétrico y análisis granulométrico, realizando una adaptación de la Norma ASTM C-136-01 [11]. Para efectuar lo dicho, se tomaron 100 gr de contenido ruminal seco, los cuales fueron pesados en una balanza analítica de tres dígitos (Sartorius). Luego se utilizaron 4 tamices (de 1.70 mm, 0.80 mm, 0.20 mm y 0.14 mm, respectivamente), se agitó manualmente durante un tiempo de 30 minutos por cada tamiz y se pesó la cantidad restante en los tamices. Este procedimiento se hizo por triplicado.

F. Análisis Próximo y Elemental de la Biomasa

Se realizó un análisis próximo bajo la norma ASTM D7582-12 [12] y un análisis elemental basado en la norma ASTM D3176-09 [13] para conocer las composiciones de los elementos que conforman esta biomasa, así como también para identificar los materiales volátiles, porcentaje de humedad, carbón fijo y cenizas. Los estudios fueron realizados en la empresa INTERLABCO S.A.S.

G. Modelado de Cinéticas de Combustión.

El modelado, desarrollado en Aspen Hysys, fue constituido por un reactor de Gibbs el cual, por medio de la minimización de la energía de Gibbs, encuentra la composición más probable de los productos de la reacción [14]. Para ello se creó un material en el simulador con la composición que se obtuvo del análisis elemental. En el modelo también se consideró combustión combinada de rumen y gas natural en porcentajes de 20%, 25%, 50% y 100% para el contenido ruminal. Posteriormente se determinó el comportamiento de la temperatura de llama adiabática y la eficiencia de cada mezcla al variar la relación Aire-Combustible (A/C).

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Curvas de Secado

Para obtener las curvas de secado del material ruminal, fueron sometidas a diferentes temperaturas fijas (105°C, 60°C y 50°C) cinco muestras con un peso de 18gr, como se ilustra en la Fig. 1, Fig. 2 y Fig. 3. El promedio de humedad inicial del material ruminal es de 74.5%, observándose variaciones significativas en el comportamiento del tiempo de secado entre las diferentes temperaturas.

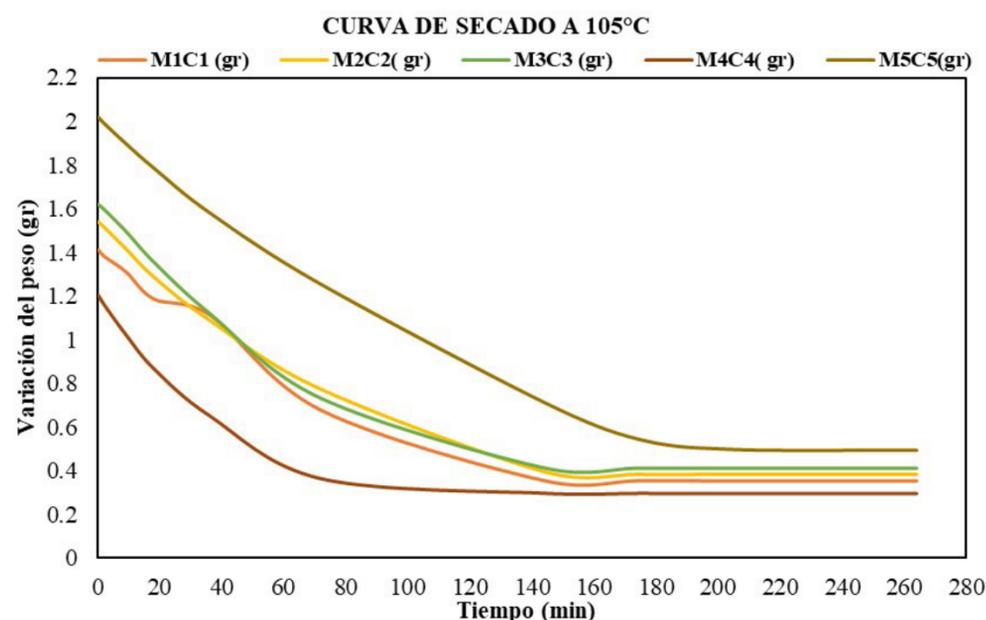


Fig. 1 . Curvas de secado de material ruminal proveniente de la empresa Frigosinú S.A. a temperatura fija de 105°C. Se detallan los valores de cinco réplicas (M1C1 a M5C5).
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Fig. 1, el comportamiento de la pérdida de humedad del rumen a 105°C no es homogéneo para las primeras 1.2 horas (72 min), ya que en las cinco muestras se observan variaciones en los porcentajes de humedad entre 29% y 69.7%. A partir de las 2.4 horas (144 min) el comportamiento cambia sustancialmente, observándose una mayor homogeneidad en todas las réplicas y a partir de este tiempo el porcentaje de humedad se estabiliza pasando de 64.8% (valor mínimo registrado en la réplica M5) a 75.6% (valor máximo registrado en la réplica M5) en un tiempo de 6.4 horas (384 min).

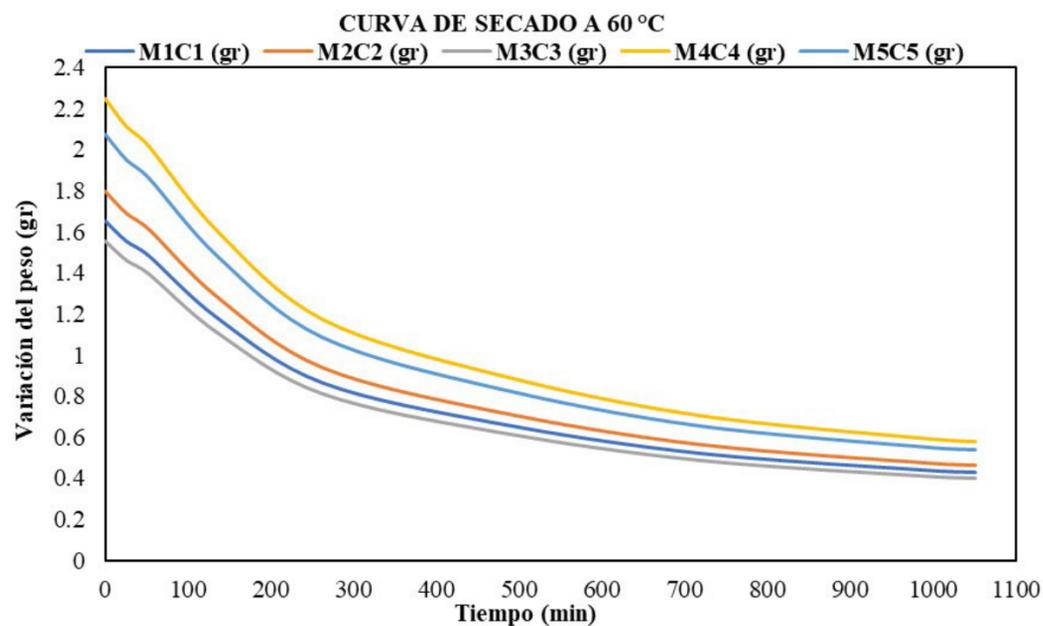


Fig. 2. Curvas de secado de material ruminal proveniente de la empresa Frigosinú S.A. a temperatura fija de 60°C. Se detallan los valores de cinco réplicas (M1 a M5)
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la curva de secado a 60°C muestra una mayor homogeneidad entre las réplicas, como se observa en la Fig. 2. A esta temperatura ocurre una pérdida de humedad pronunciada los primeros 204 minutos, y a partir de este tiempo la biomasa sigue perdiendo humedad más lentamente, observándose valores estables hasta el final del tiempo de experimentación.

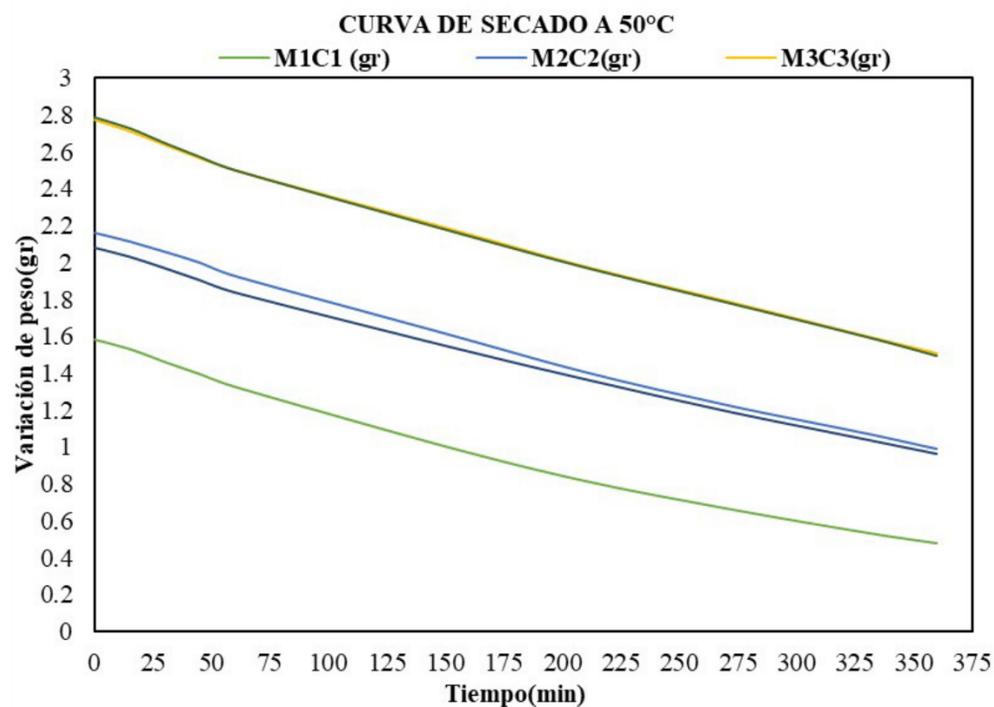


Fig. 3. Curvas de secado de material ruminal proveniente de la empresa Frigosinú S.A. a temperatura fija de 50°C. Se detallan los valores de cinco réplicas (M1 a M5).
Fuente: Elaboración propia.

Por el contrario, como se observa en la Fig. 3 el comportamiento de la pérdida de humedad en el material ruminal es marcadamente diferente entre las tres temperaturas, siendo que a 50°C y 60°C las muestras tardan más en alcanzar una estabilidad de la humedad. Al igual que a 60°C, también a 50°C se ve una mayor homogeneidad de los datos entre las cinco réplicas a través del tiempo. A diferencia de lo observado a 105°C, para 2.5 horas (150 min) a 50°C sólo se alcanza una humedad de entre el 21.1% y 36.5% para todas las réplicas, en comparación con 69.7% (valor máximo alcanzado en la M4 a 105°C). Igualmente, para el tiempo de 6.5 horas (390 min) la humedad oscila entre 48.2 % (valor mínimo registrado para la réplica M3) y 72.2% (valor máximo en la M1) a 50°C, siendo que se necesitó llegar a 20 horas de secado (1200 min) para alcanzar una estabilidad de la humedad, la cual se registra entre 73.8% y 74.8%.

Estos datos son importantes y necesarios para la definición final del diseño del secador y sus posibles adecuaciones en campo para un óptimo proceso de secado.

B. Densidad y Porosidad

La [Tabla 1](#) muestra la densidad real de la biomasa, la cual se obtuvo mediante el análisis descrito anteriormente, obteniéndose un valor de 1.631 g/cm³; por medio de (2) se obtuvo la densidad aparente con un valor estimado de 0.750 g/cm³, de esta manera se calculó la porosidad la cual entregó un valor de 0.528 o bien sea un 52.80%. Estos resultados permiten inferir que es un material apto para un proceso de combustión, ya que es un material muy volátil, lo que facilita el arrastre de éste sin un gasto mayor de energía para moverlo.

TABLA 1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA DENSIDAD REAL, APARENTE Y LA POROSIDAD DE MATERIAL RUMINAL.

| | |
|--|-------|
| Densidad real (g/cm ³) | 1.63 |
| Densidad aparente (g/cm ³) | 0.77 |
| Porosidad (%) | 52.80 |

Fuente: Elaboración propia.

C. Análisis de Granulometría

En la práctica, los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados en cada malla, debido a que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (Granulometría) basándose en la Norma ASTM C136-01 [11]. Los resultados de la distribución del tamaño de partícula del material ruminal se muestran en la [Fig. 4](#).

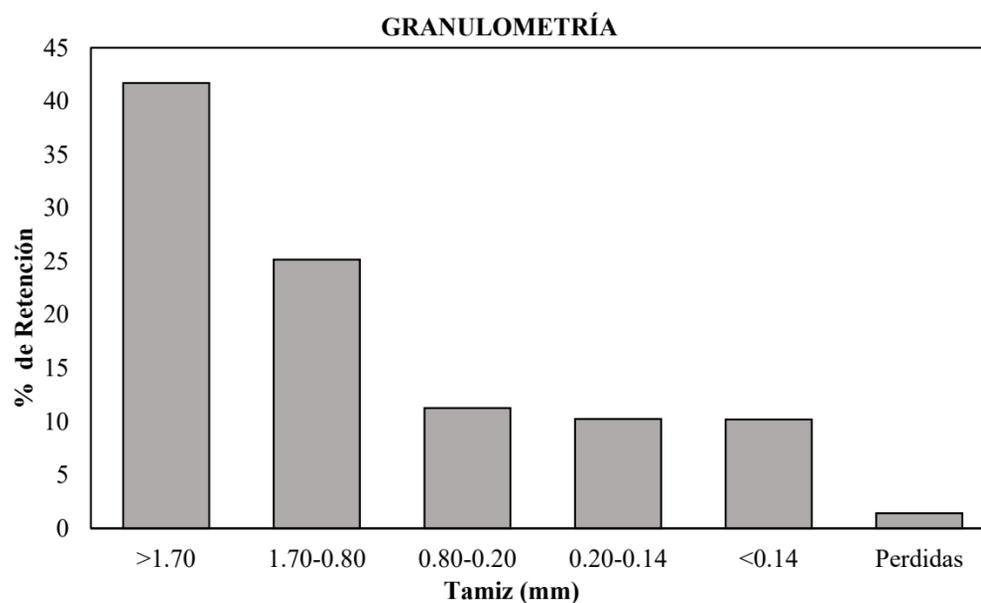


Fig. 4. Representación de la distribución del tamaño de partícula de una muestra representativa de material ruminal

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la [Fig. 4](#), el material analizado es altamente heterogéneo, mostrando que aproximadamente el 42% es mayor de 1.70 mm y el 58% restante se distribuye entre tamaños de 0.80 - 0.14 mm. En este último rango del 58% se destaca el tamaño entre 1.70 mm y 0.80 mm con un 25.20% del total. Tamaños menores de 0.80 mm tendrían un total aproximado del 31.50%, distribuyéndose así: tamaños entre 0.80 mm y 0.20 mm el 11.27%; tamaños entre 0.20 mm y 0.14 mm el 10.24% y finalmente tamaños menores de 0.14 mm el 10.20 % restante. Cabe mencionar que, debido a la agitación, hubo una pérdida de material muy fino representado en el 1.41%. Aunque se puede asumir que este porcentaje

es despreciable para los resultados de la distribución y la granulometría, este valor sí es importante cuando se considere la operación del sistema de combustión a nivel industrial. Por ejemplo, el dimensionamiento del sistema en una empresa frigorífica del departamento debe operar con aproximadamente 6 toneladas de material ruminal por día. Por lo tanto, este resultado puede sugerir que el sistema de combustión debe considerar un mecanismo de retención de dicho material (partículas menores a 0.14 mm) que se pierde en el proceso, ya que esto permitiría tanto la optimización del sistema como la reducción de la contaminación por material particulado.

D. Caracterización Fisicoquímica de la Biomasa

El análisis de resultados muestra que el contenido ruminal exhibe propiedades favorables para la combustión. Los resultados del análisis próximo y el último se muestran en la [Tabla 2](#).

TABLA 2. ANÁLISIS PRÓXIMO Y ÚLTIMO DE MATERIAL RUMINAL DE LA EMPRESA FRIGOSINÚ S.A.

| Análisis Próximo | | |
|----------------------------|----------------|-----------|
| Determinación | Como se recibe | Base seca |
| Humedad total [%] | 11.96 | |
| Cenizas [%] | 20.52 | 23.31 |
| Material Volátil [%] | 54.73 | 52.16 |
| Carbono Fijo [%] | 12.79 | 14.53 |
| Azufre [%] | 0.38 | 0.43 |
| Poder calorífico [kcal/kg] | 2153 | 2445 |
| Poder calorífico [kJ/kg] | 9008.15 | 10229.80 |
| Análisis último | | |
| Carbono, C [%] | | 33.95 |
| Hidrogeno, H [%] | | 4.80 |
| Oxígeno, O [%] | | 36.5. |
| Nitrógeno, N [%] | | 1.01 |

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos y mostrados anteriormente fueron calculados con base en aire seco, donde se pudo apreciar que la biomasa contiene propiedades favorables para un aprovechamiento energético. Esto se debe a que aproximadamente el 68% de su composición está constituida por materiales volátiles y carbono fijo. También se puede notar el bajo contenido de humedad interna con un valor de 11.96%, cerca de referencias para combustibles sólidos. Para el contenido de cenizas se observó un porcentaje alto, superando el 20.50%, el cual está indicando que el empleo de esta biomasa puede producir problemas de corrosión en la infraestructura de conversión por la acción de algunos óxidos generados [15]. De igual forma se logra observar un poder calorífico que sobrepasa los 10 000 kJ/ kg.

Por otro lado, resultados del análisis último muestran que esta biomasa posee un alto contenido de nitrógeno, lo cual puede ser característico de este tipo de biomasa. Dicho elemento es no deseado debido a sus efectos de contaminación [16]. También se observa una alta cantidad de oxígeno, lo cual permitirá que el balance estequiométrico de la combustión sea eficiente, seguido del carbono y el hidrogeno.

E. Modelado de cinética de Combustion

El modelo de cinéticas de combustión, desarrollado en Aspen Hysys, muestra que el contenido ruminal tiene potencial para ser aprovechado mediante combustión, sobre todo cuando se mezcla con gas natural. En la [Fig. 5](#) se muestra el comportamiento de la temperatura de llama adiabática respecto a la relación (A/C) para cada una de las biomásas evaluadas.

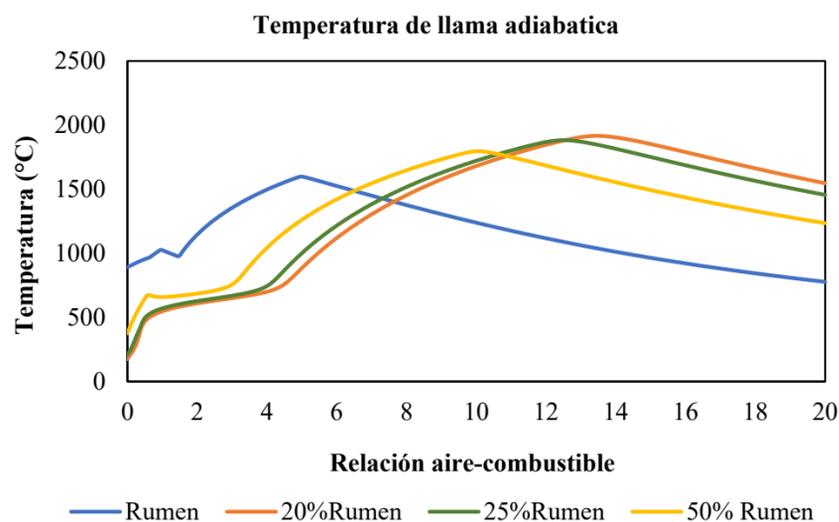


Fig. 5. Perfiles de temperatura de llama adiabática a diferentes relaciones A/C.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 5 se observan los valores de la temperatura de llama adiabática máximos para la relación estequiométrica aire-combustible, además se nota que las mezclas con mayor temperatura de llama adiabática son la de 20% rumen y 25% rumen con valores de 1916°C y 1882°C, respectivamente, mientras para la mezcla de 50% rumen fue de 1796°C y para el rumen puro fue de 1598°C, que es menor si se compara con otros combustibles como gas natural (2770°C), gas propano (2820°C), gas metano (2737°C), tolueno (2071°C), madera (1980°C), entre otros [17].

Adicionalmente, es notable que a mayor proporción de rumen a la mezcla el máximo de la temperatura de llama adiabática se desplaza hacia la izquierda, lo cual se debe al alto contenido de oxígeno que posee el rumen y que se libera en la desvolatilización de sólidos. Esto hace que se requiera menos oxígeno exterior para alcanzar el punto de estequiometría. El comportamiento de la eficiencia de cada mezcla se muestra en la Fig. 6.

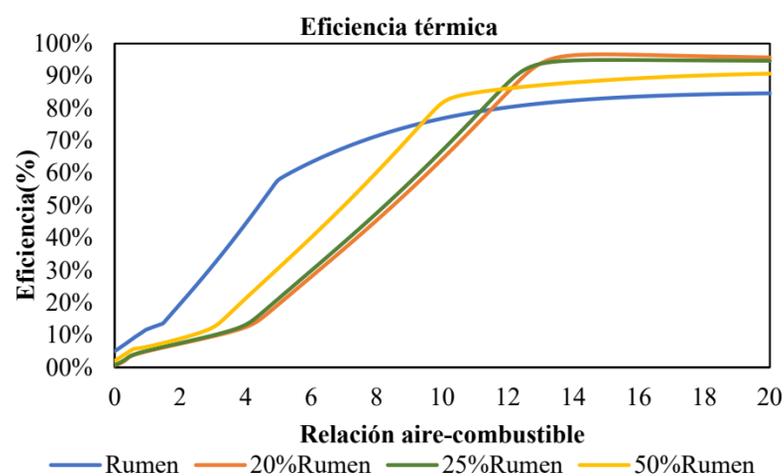


Fig. 6. Eficiencia térmica de la combustión del contenido ruminal a diferentes relaciones A/C.
Fuente: Elaboración propia.

Se puede notar el incremento de la eficiencia a mayores relaciones A/C. Sin embargo, para las mezclas con mayor contenido ruminal la eficiencia muestra un comportamiento asintótico para altas relaciones de aire. Por otro lado, se evidencia que las mezclas con mayor eficiencia de combustión son las de 20% y 25% con eficiencias cercanas al 95%, aunque cabe destacar que el rumen puro muestra mejores eficiencias para bajas relaciones A/C debido a la presencia de oxígeno en su composición.

CONCLUSIONES

El contenido ruminal bovino que se genera en las plantas de sacrificio representa un potencial energético importante y puede ser aprovechado para la generación de energía térmica por medio del proceso de combustión. Sin embargo, este presenta inconvenientes en cuanto a su

poder calorífico y propiedades físicas, por lo que una posible solución a este problema es la co-combustión de gas natural y contenido ruminal pulverizado en flujo arrastrado. Para esto se necesitan estudios de caracterización fisicoquímica y análisis termoquímico de la co-combustión, requeridos para el diseño de los sistemas.

La caracterización de la biomasa por medio de análisis elemental y próximo es de vital importancia para definir las tecnologías de aprovechamiento, así como también identificar si es necesario realizar pretratamientos. En cuanto a la cinética de secado, esta proporciona los parámetros para tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de secado para el material, identificando variables como tiempo de secado y humedad inicial. El análisis granulométrico ayuda a definir características de transporte del material y propiedades necesarias a la hora de definir un sistema de pulverizado y homogenización del material. Por último el modelado termoquímico de la combustión permite definir el potencial de aprovechamiento del material en combustión o co-combustión con gas natural.

Los resultados de las curvas de secado muestran valores de humedad inicial total de alrededor del 70%, lo que indica que es necesario disponer de un sistema de secado del material ruminal previo al proceso de combustión. Por otro lado, los análisis de densidad muestran que la biomasa presenta una baja densidad real y aparente y una alta porosidad, lo cual es importante para diseñar el sistema de arrastre de la biomasa pulverizada y para el almacenamiento de esta. Del análisis granulométrico se concluye que el contenido ruminal bovino posee alta heterogeneidad de tamaño de partículas, por lo que se debe diseñar un sistema de molienda y pulverización adecuado. En cuanto al análisis próximo y último se observó que la biomasa presenta un bajo poder calorífico, debido a su alto contenido de oxígeno presente, además se debe tener en cuenta el alto contenido de cenizas que puede generar oxidación e incrustaciones en los sistemas. Finalmente, en el modelo termoquímico de la combustión se encontró que la mezcla con 25% de contenido ruminal presentó mejores características de co-combustión que las otras evaluadas.

Es importante mencionar que el análisis de combustión fue realizado con base en el equilibrio químico, por lo que las estimaciones son ideales pero de utilidad para definir el potencial energético de la combustión. Por eso es necesario también estudiar el comportamiento fluido-dinámico del sistema para conocer otras variables de importancia en el diseño de éste.

AGRADECIMIENTOS

“Los autores agradecen al Programa Colombia científica como fuente de financiación, en el marco de las convocatorias Ecosistema científico, contrato No. FP44842- 218-2018.”

REFERENCE

- [1] T. Nussbaumer, “Combustion and Co-Combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction,” *Energy Fuels*, vol. 17, no. 6, pp. 1510–1521, 2003. <https://doi.org/10.1021/ef030031q>
- [2] V. Strezov & T. J. Evans, *Biomass Processing Technologies*. BR, USA: CRC Press, 2014.
- [3] N. Suksam & J. Charoensuk, “Development of Pulverized Biomass Combustion for Industrial Boiler: A Study on Bluff Body Effect,” *BioResources*, vol. 14, no. 3, pp. 6146–6167, 2019. Available: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_14_3_6146_Suksam_Pulverized_Biomass_Combustion_Boiler
- [4] F. A. El-Yassin, J. P. Fontenot & H. Chester-Jones, “Fermentation Characteristics and Nutritional Value of Ruminant Contents and Blood Ensiled with Untreated or Sodium Hydroxide-Treated Wheat Straw,” *Anim Sci J*, vol. 69, no. 4, pp. 1751–1759, 1991. <https://doi.org/10.2527/1991.6941751x>
- [5] L. Rosendahl, *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*. Sawston, USA: Woodhead Publishing, 2013.
- [6] A. Evald & J. Witt, *Biomass CHP Best Practice Guide. Performance comparison and recommendations for future CHP systems utilising biomass fuels*. Arbaz: EBC, 2006.
- [7] M. Winkler, C. Meunier, O. Henriot, J. Mahillon, M. E. Suárez-Ojeda, G. Del Moro, M. De Sanctis, C. Di Iaconie & D. G. Weissbrodt, “An integrative review of granular sludge for the biological removal of nutrients and recalcitrant organic matter from wastewater,” *Chem Eng J*, vol. 336, pp. 489–502, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.026>
- [8] R. Van den Broek, A. Faaij & W. Ad Van, “Biomass Combustion for Power Generation,” *Biomass Bioenergy*, vol. 11, no. 4, pp. 271–281, 1996. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(96\)00033-5](https://doi.org/10.1016/0961-9534(96)00033-5)

- [9] M. Ríos, “Aprovechamiento del contenido ruminal bovino para ceba cunícola, como estrategia para disminuir la contaminación generada por el matadero en San Alberto,” *Prospectiva*, vol. 10, no. 2, pp. 56–63, 2012. <https://doi.org/10.15665/rp.v10i2.234>
- [10] S. E. Ramos, “Evaluación de la producción de biol a partir de rumen bovino del camal frigorífico municipal de Riobamba,” *Trabajo de grado*, dpto cienc quím, ESPOCH, RIO, EC, 2019. Disponible en <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/11159>
- [11] *ASTM C136-01*, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, *American Society for Testing and Materials*, ASTM, West Conshohocken, USA, 2003. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- [12] *ASTM D7582*, Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis, *American Society for Testing and Materials*, ASTM, West Conshohocken, USA, 2012. <https://doi.org/10.1520/D7582-15>
- [13] *ASTM D3176*, Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke, *American Society for Testing and Materials*, ASTM, West Conshohocken, USA, 2009. <https://doi.org/10.1520/D3176-15>
- [14] J. Gil, Guevara & J. García, *Análisis y simulación de procesos en ingeniería química*. BO, CO: UNAL, 2011.
- [15] J. Mesa y L. Romero, “Análisis del potencial de la conversión termoquímica de biomasa residual agrícola en el departamento de Córdoba con miras a la obtención de biocombustibles,” *tesis licenciatura*, dpto Ing Mec, UPB, MON, CO, 2009.
- [16] W. Lin, P. A. Jensen & A. D. Jensen, “Biomass Suspension Combustion: Effect of Two-Stage Combustion on NOx Emissions in a Laboratory-Scale Swirl Burner,” *Energy Fuels*, vol. 23, no. 3, pp. 1398–1405, 2009. <https://doi.org/10.1021/ef8004866>
- [17] F. Liu, H. Guo, G. J. Smallwood & Ö.L. Gülder, “Numerical study of the superadiabatic flame temperature phenomenon in hydrocarbon premixed flames,” *Proc Combust Inst*, vol. 29, pp. 1543–1550, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80189-4](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80189-4)
- [18] *ASTM D-2234*, Standard Practice for Collection of a Gross Sample of Coal, *American Society for Testing and Materials*, ASTM, West Conshohocken, USA, 2020. https://doi.org/10.1520/D2234_D2234M-20
- [19] NTC 5167, Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo, *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*, ICONTEC, BO, CO, 2011. Recuperado de <https://www.cali.gov.co/dagma/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=31838#:~:text=Esta%20norma%20establece%20los%20requisitos,enmiendas%20o%20acondicionadores%20de%20suelo>

Jesús David Rhenals-Julio. Ingeniero Mecánico de la Universidad de Córdoba (Montería, Colombia).

Jorge Mario Mendoza Fandiño. Doctor en Ingeniería Mecánico de la Universidad de Córdoba (Montería, Colombia).

Taylor de Jesús de la Vega González. Ingeniero Mecánico de la Universidad de Córdoba (Montería, Colombia).

Stiven Javier Sofan German. Ingeniero Mecánico de la Universidad de Córdoba (Montería, Colombia).