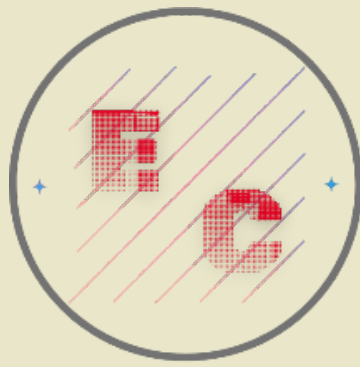




# REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS

Volumen 3, Número 1  
Enero-Marzo 2026

Edición Trimestral

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

ISSN: 3061-7812, [www.omniscens.com](http://www.omniscens.com)

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 1  
enero-marzo 2026

Publicación trimestral  
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

Contacto principal: [admin@omniscens.com](mailto:admin@omniscens.com)

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.



Copyright © 2026: Los autores

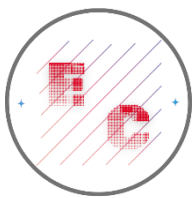


9773061781003

---

### Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 3, Núm. 1, enero-marzo 2026, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, [admin@omniscens.com](mailto:admin@omniscens.com), Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 enero 2026.



**Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias**

**Volumen 3, Número 1, 2026, enero-marzo**

**DOI:** <https://doi.org/10.71112/c21ngw16>

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN BRIQUETAS DE  
CARBÓN VEGETAL MEDIANTE SIMULACIÓN TERMODINÁMICA**

**SENSITIVITY ANALYSIS OF MOISTURE CONTENT IN CHARCOAL BRIQUETTES  
USING THERMODYNAMIC SIMULATION**

**Héctor F. Durán Calvetty**

**Nicómedes Saavedra Arancibia**

**Deyvi Bustamante Perez**

**Deyler Roca Malale**

**Victor Hinojosa Padilla**

**Bolivia**

**Análisis de sensibilidad del contenido de humedad en briquetas de carbón vegetal mediante simulación termodinámica**

**Sensitivity analysis of moisture content in charcoal briquettes using thermodynamic simulation**

Héctor F. Durán Calvetty

duran.hector@usfx.bo

<https://orcid.org/0009-0001-9257-9720>

Facultad de Ciencias y Tecnología,  
Universidad San Francisco Xavier (USFX),  
Sucre, Bolivia

Deyvi Bustamante Perez

bustamante.deyvi@usfx.bo

<https://orcid.org/0009-0008-6484-7362>

Facultad de Ciencias y Tecnología,  
Universidad San Francisco Xavier (USFX),  
Sucre, Bolivia

Victor Hinojosa Padilla

hinojosa.victor@usfx.bo

<https://orcid.org/0009-0008-4907-164X>

Facultad de Ciencias y Tecnología,  
Universidad San Francisco Xavier (USFX),  
Sucre, Bolivia

Nicómedes Saavedra Arancibia

saavedra.nicomedes@usfx.bo

<https://orcid.org/0009-0003-9354-1606>

Facultad de Ciencias y Tecnología,  
Universidad San Francisco Xavier (USFX),  
Sucre, Bolivia

Deyler Roca Malale

roca.deyler@usfx.bo

<https://orcid.org/0009-0000-7476-3674>

Facultad de Ciencias y Tecnología,  
Universidad San Francisco Xavier (USFX),  
Sucre, Bolivia

## RESUMEN

El contenido de humedad es un factor crítico que determina el desempeño energético de biocombustibles sólidos densificados; en briquetas de carbón vegetal, variaciones moderadas reducen el poder calorífico inferior (PCI) y aumentan el consumo específico. Este estudio cuantifica la sensibilidad de la humedad, entre 5% y 23%, sobre el PCI y el consumo de briquetas mediante simulación termodinámica validada con datos experimentales. Se analizaron briquetas elaboradas con menudos y finos residuales del Chaco boliviano, cuyo PCI base fue 38,10 MJ/kg a una humedad de 8,87%. Para cada escenario de humedad, representativo de condiciones reales de secado, almacenamiento y manejo, se determinó el PCI efectivo y el consumo requerido para cubrir una demanda térmica equivalente a generación de vapor industrial, usando TermoGraf v5.7 y verificando los resultados con balances de energía calculados manualmente, con un error relativo menor al 2%. La simulación mostró una disminución no lineal del PCI desde 38,63 hasta 30,55 MJ/kg cuando la humedad aumentó de 5% a 23%, lo que implica una reducción de alrededor de 20,9%; de forma consistente, el consumo de combustible se incrementó de 8,88 a 11,21 kg/h, es decir, un aumento cercano a 26,2%. Se concluye que mantener la humedad por debajo de 10 % es una estrategia operativa esencial para maximizar la eficiencia energética en aplicaciones térmicas industriales.

**Palabras clave:** briquetas de carbón vegetal; contenido de humedad; poder calorífico inferior; biocombustibles sólidos; simulación termodinámica

## ABSTRACT

Moisture content is a critical factor determining the energy performance of densified solid biofuels. In charcoal briquettes, even moderate variations reduce the lower heating value (LHV) and increase specific fuel consumption. This study quantifies the sensitivity of moisture content, between 5% and 23%, on the LHV and fuel consumption of briquettes using thermodynamic

simulation validated with experimental data. Briquettes made from residual trimmings and fines from the Bolivian Chaco region were analyzed. Their base LHV was 38,10 MJ/kg at a moisture content of 8,87%. For each moisture scenario, representative of real-world drying, storage, and handling conditions, the effective LHV and the fuel consumption required to meet a thermal demand equivalent to industrial steam generation were determined using TermoGraf v5.7. The results were verified with manually calculated energy balances, achieving a relative error of less than 2%. The simulation showed a non-linear decrease in LHV from 38,63 to 30,55 MJ/kg when humidity increased from 5% to 23%, implying a reduction of approximately 20,9%. Consistently, fuel consumption increased from 8,88 to 11,21 kg/h, an increase of nearly 26,2%. It is concluded that maintaining humidity below 10% is an essential operational strategy for maximizing energy efficiency in industrial thermal applications.

**Keywords:** charcoal briquettes; moisture content; lower heating value; solid biofuels; thermodynamic simulation

Recibido: 4 marzo 2026 | Aceptado: 20 marzo 2026 | Publicado: 21 marzo 2026

## 1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia sistemas energéticos más sostenibles ha impulsado el uso de biocombustibles sólidos en aplicaciones térmicas como alternativa para reducir la dependencia de combustibles fósiles. En Bolivia y otros contextos, la valorización de residuos mediante briquetas se ha analizado como una opción económicamente viable y con beneficios sociales y ambientales, especialmente cuando se integra a estrategias de economía circular (Ferronato et al., 2022; Baltrocchi et al., 2023). En este marco, la densificación en forma de briquetas mejora la homogeneidad física, la logística y el manejo del combustible, facilitando una combustión más estable en calderas y hornos (Tumuluru et al., 2011).

En regiones productoras de carbón vegetal del Chaco boliviano, como parte de la ecorregión del Gran Chaco, la generación de menudos y finos durante el procesamiento, el transporte y el manejo constituye un residuo con alto potencial de valorización energética mediante briquetado (Rueda et al., 2015). Diversos estudios demuestran que estos residuos carbonosos pueden transformarse en briquetas con propiedades energéticas y de combustión adecuadas, siempre que se controlen variables de formulación y calidad del producto (Ajimotokan et al., 2019; Nonsawang et al., 2024; Gebreyes et al., 2024). No obstante, el desempeño energético depende de manera crítica de las propiedades fisicoquímicas del combustible, entre las cuales el contenido de humedad destaca por su alta incidencia (Abdel Aal et al., 2023).

Desde el punto de vista termodinámico, la humedad introduce una demanda térmica adicional porque parte del calor liberado se destina al calentamiento y a la evaporación del agua, lo que reduce el poder calorífico inferior en base tal como se recibe y la eficiencia global del proceso (International Standard 18125 [ISO], 2017; Dula & Kraszkievicz, 2025). En sistemas de combustión, esta penalización se asocia principalmente a las pérdidas por calor sensible y, sobre todo, por calor latente del vapor de agua, fenómeno que se incrementa a medida que aumenta la fracción de agua en el combustible (Hebenstreit et al., 2011).

En la práctica, el efecto anterior se traduce en un mayor consumo específico de combustible para satisfacer una misma demanda térmica y, por tanto, en impactos directos sobre costos de operación, logística de abastecimiento y estabilidad de la combustión (Anisimov et al., 2016; Hebenstreit et al., 2011). Por ello, el control de humedad se considera un requisito operativo relevante en cadenas de suministro de biocombustibles sólidos densificados, tanto por eficiencia energética como por desempeño del equipo de combustión (Abdel Aal et al., 2023; International Standard 18125 [ISO], 2017).

Aunque la influencia de la humedad sobre el poder calorífico de biocombustibles sólidos es ampliamente reconocida, gran parte de la literatura en briquetas se concentra en caracterizaciones de propiedades físicas y energéticas del material y con menor frecuencia traduce cambios de humedad en indicadores operativos como consumo o eficiencia mediante modelos termodinámicos verificados (Ajimotokan et al., 2019; Abdel Aal et al., 2023). En este contexto, el presente trabajo analiza la sensibilidad del contenido de humedad, entre 5% y 23%, sobre el poder calorífico inferior y el consumo de briquetas de carbón vegetal mediante simulación termodinámica validada con cálculo manual, aportando criterios técnicos aplicables a la operación industrial y a la gestión energética.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Combustible y caracterización**

El combustible evaluado consistió en briquetas de carbón vegetal elaboradas con menudos y finos residuales generados durante la producción y comercialización de carbón vegetal en el Chaco boliviano. En la condición base, el material presentó un contenido de humedad de 8,87%, una densidad aparente de 1240 kg/m<sup>3</sup> y un poder calorífico inferior de 38,10 MJ/kg, valores obtenidos mediante ensayos experimentales de laboratorio. Las briquetas se fabricaron incorporando almidón de yuca como aglomerante en una proporción de 5 % en masa y se compactaron a una presión de 10 MPa. Para fortalecer la trazabilidad metrológica de esta caracterización, es recomendable reportar explícitamente los métodos de ensayo empleados en la determinación de humedad por secado en estufa según ISO 18134, determinación del poder calorífico por calorimetría conforme a ISO 18125 y determinación de densidad en briquetas conforme a ISO 18847 (International Standard 18125 [ISO], 2017; International Standard 18134 [ISO], 2023).



Con el fin de cuantificar el efecto de la humedad, se definieron escenarios con contenidos entre 5% y 23%, rango representativo de condiciones reales de secado, almacenamiento y manejo del combustible sólido densificado.

## 2.2 Metodología de simulación y validación

La simulación termodinámica se ejecutó con el software TermoGraf v5.7, utilizando el módulo “Combustión con aire” para estimar el consumo de briquetas necesario para cubrir una demanda térmica industrial. La demanda se definió como la generación de 120 kg/h de vapor a 3,5 bar con temperatura de salida de 150°C, condición que representa vapor ligeramente sobrecalentado respecto a la temperatura de saturación a esa presión. Se adoptó una eficiencia térmica global de 0,80 para vincular el calor útil requerido por el proceso con el calor aportado por el combustible (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2006).

El modelo de combustión consideró aire seco con fracción molar de 0,21 de oxígeno y 0,79 de nitrógeno, y una temperatura de referencia de 25°C. Para cuantificar el calor útil asociado a la producción de vapor se empleó un enfoque basado en entalpías, tomando como estado de entrada agua de alimentación a 25°C y como estado de salida vapor a 3,5 bar con 150°C, condición que corresponde a vapor ligeramente sobrecalentado respecto a la temperatura de saturación a 3,5 bar, que es 138,86°C. Las propiedades termodinámicas del sistema agua-vapor se obtuvieron de tablas consistentes. En particular, a 0,35 MPa la entalpía del vapor saturado es 2732,0 kJ/kg, mientras que la entalpía del vapor a 150°C y presión cercana a 0,35 MPa se estimó por interpolación entre tablas de vapor sobrecalentado a 300 kPa y 400 kPa, con valores de 2761,0 kJ/kg y 2752,8 kJ/kg, respectivamente. Con ello, el requerimiento de calor útil se calculó mediante:

$$\dot{Q}_{util} = \dot{m}_{vapor} * (h_{salida} - h_{entrada}) \quad ECU. (1)$$

Donde  $\dot{m}_{vapor}$  es el caudal másico de vapor,  $h_{entrada}$  es la entalpía del agua a 25°C y  $h_{salida}$  es la entalpía del vapor a 3,5 bar y 150°C. Las propiedades del sistema agua-vapor se obtuvieron

de tablas termodinámicas consistentes, de modo que el salto de entalpía incorpora de forma consistente el calentamiento del agua hasta la saturación, la vaporización a 3,5 bar y el sobrecalentamiento hasta 150°C. El calor aportado por el combustible se estimó aplicando la eficiencia global:

$$\dot{Q}_{combustible} = \frac{\dot{Q}_{util}}{\eta} \quad ECU. (2)$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia térmica global adoptada. Para cada escenario de humedad, entre 5 % y 23%, se determinó en TermoGraf v5.7 el poder calorífico inferior efectivo,  $PCI_{efectivo}$ , y el consumo másico de briquetas requerido para cubrir la demanda se calculó como:

$$\dot{m}_{briquetas} = \frac{\dot{Q}_{combustible}}{PCI_{efectivo}} \quad ECU. (3)$$

En todos los escenarios se mantuvieron constantes las condiciones del caso base y se varió únicamente el contenido de humedad del combustible. Se asumió combustión completa de las briquetas bajo las condiciones operativas definidas en el módulo de combustión, por lo que las variaciones del consumo se atribuyen exclusivamente a los cambios del poder calorífico inferior efectivo, inducidos por la humedad.

La validación de la simulación se realizó mediante cálculos manuales independientes basados en balances de energía, replicando las mismas condiciones de vapor, la misma temperatura de referencia y las mismas propiedades termodinámicas del agua-vapor. El criterio de consistencia se evaluó mediante el error relativo para cada magnitud comparada,  $X$ , que en este estudio corresponde a  $PCI_{efectivo}$  y  $\dot{m}_{briquetas}$ .

$$\varepsilon_{relativo} = \left| \frac{X_{simulado} - X_{manual}}{X_{simulado}} \right| * 100 \quad ECU. (4)$$

Los resultados de la simulación fueron validados mediante cálculos manuales basados en balances de masa y energía, aceptándose diferencias relativas inferiores al 2% como criterio de consistencia entre ambos enfoques.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Variación del poder calorífico inferior en función del contenido de humedad

El análisis de sensibilidad mostró una disminución progresiva del poder calorífico inferior, PCI, de las briquetas de carbón vegetal conforme aumentó el contenido de humedad. En el intervalo evaluado, entre 5% y 23%, el PCI disminuyó de 38,63 MJ/kg a 30,55 MJ/kg, lo que equivale a una pérdida absoluta de 8,08 MJ/kg y a una reducción relativa de 21% respecto a la condición de 5% de humedad. En el punto de referencia experimental, con humedad de 8,87%, el PCI fue 38,10 MJ/kg, lo que representa una reducción de 1,4% frente a 5%. A partir de 12 % de humedad, la reducción acumulada alcanzó 4,5%, y por encima de 18% la pérdida superó 11,5%, evidenciando una penalización energética cada vez más relevante para condiciones típicas de almacenamiento y manejo.

Este comportamiento confirma el efecto termodinámico asociado al agua contenida en el combustible, dado que una fracción creciente de la energía liberada durante la combustión se destina al calentamiento y a la evaporación del agua, lo que reduce el contenido energético útil disponible en el proceso.

**Tabla 1**

*PCI de briquetas de carbón vegetal en función del contenido de humedad*

| Humedad (%) | PCI (MJ/kg) | Reducción relativa PCI (%)<br>* |
|-------------|-------------|---------------------------------|
| 5,00        | 38,63       | 0,0                             |
| 8,87        | 38,10       | 1,4                             |
| 12,00       | 36,89       | 4,5                             |
| 15,00       | 35,55       | 8,0                             |
| 18,00       | 34,19       | 11,5                            |
| 20,00       | 32,98       | 14,6                            |
| 23,00       | 30,55       | 20,9                            |

\* Porcentaje de reducción respecto al valor a 5% de humedad

### 3.2 Efecto del contenido de humedad sobre el consumo de briquetas

Como consecuencia directa de la reducción del PCI, el consumo másico de briquetas requerido para satisfacer una demanda térmica constante aumentó de forma sostenida a medida que se incrementó la humedad. Para una humedad de 5%, el consumo estimado fue 8,88 kg/h, mientras que para 23 % se requirieron 11,21 kg/h, lo que representa un aumento absoluto de 2,33 kg/h y un incremento relativo de 26,2% respecto al caso de 5%. En escenarios intermedios, con humedad de 12 % el consumo fue 9,67 kg/h, equivalente a un incremento de 8,9%, y con 20% de humedad el consumo alcanzó 10,81 kg/h, con un incremento de 21,7%.

Dado que la demanda térmica y la eficiencia global se mantuvieron constantes en todos los escenarios, el incremento del consumo es consistente con la relación inversa entre consumo requerido y poder calorífico disponible, por lo que el aumento de humedad se traduce directamente en mayor requerimiento de combustible para entregar la misma energía útil.

**Tabla 2**

*Consumo de briquetas requerido para demanda térmica constante según contenido de humedad*

| Humedad (%) | Consumo de briquetas (kg/h) | Aumento relativo consumo (%) * |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 5,00        | 8,88                        | 0,0                            |
| 8,87        | 9,36                        | 5,4                            |
| 12,00       | 9,67                        | 8,9                            |
| 15,00       | 10,04                       | 13,1                           |
| 18,00       | 10,43                       | 17,1                           |
| 20,00       | 10,81                       | 21,7                           |
| 23,00       | 11,21                       | 26,2                           |

\* Porcentaje de aumento respecto al consumo a 5% de humedad

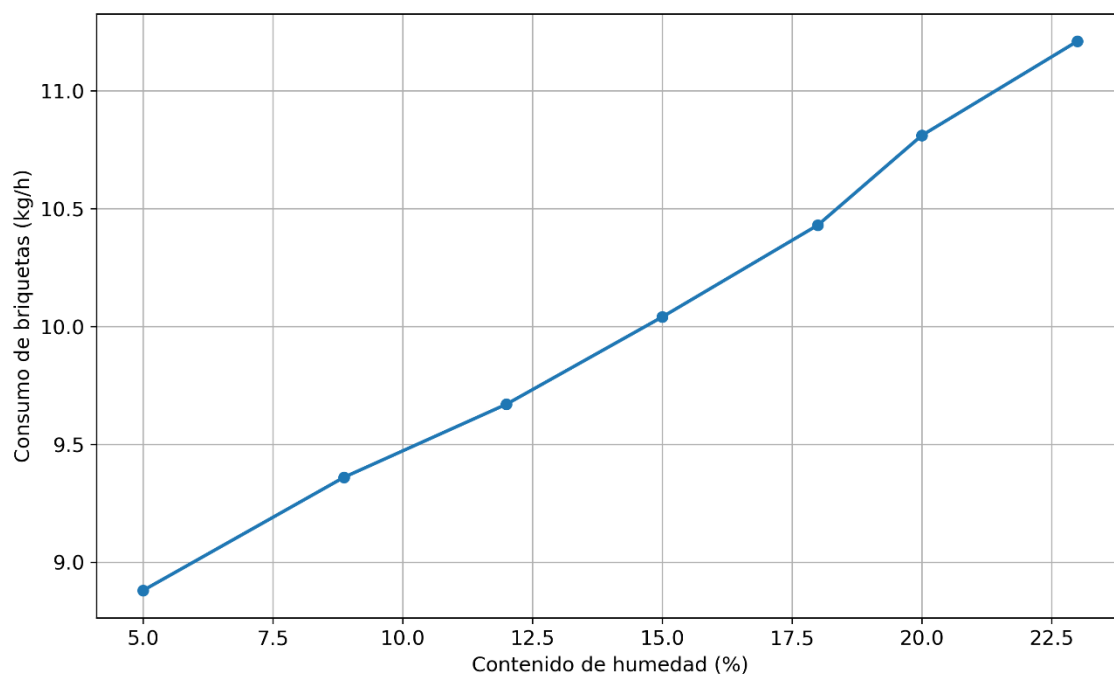
### 3.3 Análisis gráfico del comportamiento del consumo

La Figura 1 presenta la relación entre el contenido de humedad y el consumo de briquetas, mostrando una tendencia creciente de carácter no lineal. En particular, a partir de contenidos cercanos a 10% -12%, se aprecia que el incremento de consumo comienza a ser

operacionalmente relevante, ya que en ese intervalo el consumo alcanza 9,36-9,67 kg/h, lo que representa aumentos de 5,4%-8,9% respecto al caso de 5%. Esta tendencia respalda la identificación de un umbral técnico práctico en torno a ese rango, a partir del cual la penalización energética por humedad se vuelve más significativa para el desempeño del sistema térmico bajo demanda constante.

### Figura 1

*Influencia del contenido de humedad sobre el consumo de briquetas de carbón vegetal*



## 4. DISCUSIÓN

Los resultados confirman que el contenido de humedad del combustible influye de manera determinante en el desempeño energético de las briquetas de carbón vegetal. Cuando la humedad aumentó desde 5% hasta 23%, el poder calorífico inferior disminuyó desde 38,63 MJ/kg hasta 30,55 MJ/kg, lo que implica una pérdida absoluta de 8,08 MJ/kg y una reducción relativa de 20,9%. En paralelo, el consumo másico requerido para sostener una demanda térmica constante aumentó desde 8,88 kg/h hasta 11,21 kg/h, equivalente a un incremento de

2,33 kg/h y un aumento relativo de 26,2%. Este comportamiento es consistente con la penalización termodinámica asociada al agua contenida en el combustible, ya que una fracción creciente de la energía liberada durante la combustión se destina al calentamiento y a la evaporación de dicha humedad, reduciendo la energía útil disponible y forzando un mayor consumo para entregar la misma carga térmica.

En la literatura, Abdel Aal et al. (2023), a partir de ensayos con briquetas elaboradas con residuos de poda, evidenciaron que el incremento del contenido de humedad disminuye el valor calorífico y altera propiedades relevantes del combustible densificado. Aunque los valores absolutos de energía reportados en su estudio difieren de los correspondientes a briquetas de carbón vegetal, la tendencia observada coincide con los resultados del presente trabajo y refuerza la necesidad de controlar la humedad como variable crítica de calidad. De manera concordante, Saeed et al. (2021) evaluaron briquetas de cascarilla de arroz y concluyeron que la humedad afecta directamente el desempeño energético y las propiedades del producto, identificando rangos operativos recomendables cercanos a 8-12 %; este intervalo es coherente con el cambio de comportamiento observado en la curva de consumo y respalda la recomendación de operar por debajo de 10% cuando se busca maximizar la eficiencia y minimizar el consumo.

La dimensión operativa del problema también ha sido discutida en estudios centrados en desempeño físico-mecánico y energético. Dragusanu et al. (2022), evaluaron briquetas de residuos de paja y destacaron la conveniencia de mantener humedades bajas para preservar propiedades caloríficas y operativas, un criterio que se alinea con tus resultados, ya que a partir de 10%-12% el consumo alcanza 9,36-9,67 kg/h, con incrementos de 5,4%-8,9% frente al caso de 5%, y por encima de 15% el deterioro se vuelve más marcado, con consumo de 10,04 kg/h y aumento de 13,1%.

En términos de cadena de suministro, Leoni et al. (2021), enfatizaron que la humedad es una de las fuentes principales de variabilidad en combustibles sólidos y que su control es crucial para asegurar desempeño consistente y reducir incertidumbre en la conversión energética. Este enfoque respalda el valor práctico de tu metodología, ya que al integrar simulación termodinámica con validación manual se logra traducir una propiedad del combustible en impactos operacionales cuantificables, específicamente consumo requerido bajo demanda térmica constante.

Finalmente, en el plano normativo y de estandarización, el marco de especificaciones y clases de biocombustibles sólidos puede usarse como referencia para criterios de calidad, aunque es importante distinguir que el carbón vegetal se trata en la serie ISO 17225 bajo los requisitos generales y clasificación correspondiente (Kofman, 2021). En revisiones técnicas de estándares, como la presentada por Kofman (2021), se resume que la clasificación por humedad en combustibles sólidos densificados parte de clases exigentes como M10, lo cual es consistente con tu recomendación operativa de mantener la humedad por debajo de 10% para minimizar pérdidas energéticas y evitar incrementos significativos del consumo.

## 5. CONCLUSIONES

La humedad del combustible afecta significativamente el desempeño energético de las briquetas de carbón vegetal. En el rango evaluado, al pasar de 5% a 23% de humedad, el PCI se redujo de 38,63 MJ/kg a 30,55 MJ/kg, lo que representa una pérdida de 8,08 MJ/kg y una disminución relativa de 20,9%; de forma consistente, el consumo másico requerido para una demanda térmica constante aumentó de 8,88 kg/h a 11,21 kg/h, equivalente a un incremento de 2,33 kg/h y de 26,2%.

Se establece un criterio técnico-operativo en torno a 10% de humedad, por debajo del cual la reducción del PCI se mantiene por debajo de 5% respecto al caso de 5% de humedad y

las variaciones de consumo permanecen limitadas. La simulación termodinámica validada se confirma como herramienta para evaluar escenarios de manejo y almacenamiento, por lo que se recomienda aplicar controles de humedad a lo largo de la cadena de valor para maximizar la eficiencia energética del biocombustible.

### **Declaración de conflicto de interés**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés relacionado con esta investigación.

### **Declaración de contribución a la autoría**

**Héctor Fernando Durán-Calvetty:** Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Visualización, Escritura-borrador original, Redacción-revisión y edición.

**Nicómedes Saavedra-Arancibia:** Conceptualización, Metodología, Visualización, Escritura-borrador original, Redacción-revisión y edición.

**Deyvi Bustamante-Perez:** Curación de datos, Análisis formal, Conceptualización.

**Deyler Roca-Malale:** Curación de datos, Conceptualización, Análisis formal.

**Victor Hinojosa-Padilla:** Curación de datos, Análisis formal, Conceptualización.

### **Declaración de uso de inteligencia artificial**

Los autores declaran que utilizaron inteligencia artificial como apoyo para la elaboración de este artículo y que dicha herramienta no sustituye de ninguna manera el proceso intelectual. Tras rigurosas revisiones con diferentes herramientas, en las que se comprobó la inexistencia de plagio, tal como consta en las evidencias, los autores manifiestan y reconocen que este trabajo es producto de un esfuerzo intelectual propio, que no ha sido escrito ni publicado previamente en ninguna plataforma electrónica ni mediante herramientas de inteligencia artificial.



## REFERENCIAS

- Abdel Aal, A. M. K., Ibrahim, O. H. M., Al-Farga, A., & El Saeidy, E. A. (2023). Impact of biomass moisture content on the physical properties of briquettes produced from recycled *Ficus nitida* pruning residuals. *Sustainability*, 15(15), 11762. <https://doi.org/10.3390/su151511762>
- Ajimotokan, H. A., Ehindero, A. O., Ajao, K. S., Adeleke, A. A., Ikubanni, P. P., & Shuaib-Babata, Y. L. (2019). Combustion characteristics of fuel briquettes made from charcoal particles and sawdust agglomerates. *Scientific African*, 6, e00202. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00202>
- Baltrocchi, A. P. D., Ferronato, N., Calle Mendoza, I. J., Gorritty Portillo, M. A., Romagnoli, F., & Torretta, V. (2023). Socio-economic analysis of waste-based briquettes production and consumption in Bolivia. *Sustainable Production and Consumption*, 37, 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.03.004>
- Dragusanu, V., Lunguleasa, A., & Spirchez, C. (2022). Evaluation of the physical, mechanical, and calorific properties of briquettes with or without a hollow made of wheat (*Triticum aestivum* L.) straw waste. *Applied Sciences*, 12(23), 11936. <https://doi.org/10.3390/app122311936>
- Dula, M., & Kraszkiewicz, A. (2025). Theory and practice of burning solid biofuels in low-power heating devices. *Energies*, 18(1), 182. <https://doi.org/10.3390/en18010182>
- Durán Calvetty, H. F. (2025). *Evaluación de la calidad y rendimiento de briquetas elaboradas a partir de menudos y finos de carbón vegetal provenientes del Chaco boliviano en Sucre, Bolivia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Siglo XX].
- Ferronato, N., Calle Mendoza, I. J., Ruiz Mayta, J. G., Gorritty Portillo, M. A., Conti, F., & Torretta, V. (2022). Biomass and cardboard waste-based briquettes for heating and

- cooking: Thermal efficiency and emissions analysis. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134111>
- Gebreyes, E. F., Teferi, S. T., & Adem, K. D. (2024). A case study of bio-charcoal made from khat residue for Hawassa City, Ethiopia. *PLOS ONE*, 19(11), e0313952. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313952>
- Hebenstreit, B., Schnetzinger, R., Ohnmacht, R., Höftberger, E., & Haslinger, W. (2011). Efficiency optimization of biomass boilers by a combined condensation heat pump system.
- International Organization for Standardization. (2017). *Solid biofuels—Determination of calorific value (ISO 18125:2017)*. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/845d7dc1-7df3-4abd-9051-d8e842811a5e/iso-18125-2017>
- International Organization for Standardization. (2023). *Solid biofuels—Determination of moisture content—Part 3: Moisture in general analysis sample (ISO 18134-3:2023)*. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:18134:-3:ed-2:v1:en>
- Kofman, P. D. (2021). *Review of worldwide standards for solid biofuels* (Revised April 2021). <https://www.coford.ie/media/coford/content/publications/2022/3ReviewofWorldwideStandardsforSolidBiofuelsRevisedApril2021291021310322.pdf>
- Leoni, E., Mancini, M., Aminti, G., & Picchi, G. (2021). Wood fuel procurement to bioenergy facilities: Analysis of moisture content variability and optimal sampling strategy. *Processes*, 9(2), 359. <https://doi.org/10.3390/pr9020359>
- National Renewable Energy Laboratory. (2006). *Consider installing high-pressure boilers with backpressure turbine-generators* (DOE/GO-102006-2267). <https://doi.org/10.2172/875766>
- Nonsawang, S., Juntahum, S., Sanchumpu, P., Suaili, W., Senawong, K., & Laloon, K. (2024). Unlocking renewable fuel: Charcoal briquettes production from agro-industrial waste with

- cassava industrial binders. *Energy Reports*, 12, 4966–4982. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.10.053>
- Rueda, C. V., Baldi, G., Gasparri, I., & Jobbágy, E. G. (2015). Charcoal production in the Argentine Dry Chaco: Where, how and who? *Energy for Sustainable Development*, 27, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.04.006>
- Saeed, A. A. H., Yub Harun, N., Bilad, M. R., Afzal, M. T., Parvez, A. M., Roslan, F. A. S., Abdul Rahim, S., Vinayagam, V. D., & Afolabi, H. K. (2021). Moisture content impact on properties of briquette produced from rice husk waste. *Sustainability*, 13(6), 3069. <https://doi.org/10.3390/su13063069>
- Tumuluru, J. S., Wright, C., Kenny, K., & Hess, J. (2011). A review on biomass densification for energy applications.