



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 103 (2):
1-9; 2026



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

Artículo Científico

Evaluación del potencial de conversión térmica de biomásas agroindustriales de Tucumán

Zamora Rueda G. del H*, Gutierrez C.*, Armella, G.*, Golato M. A.*, Feijóo, E. A.* y Ruiz, M**.

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC; ** Director Asistente del área industrial, EEAOC.
Email: gzamora@eeaoc.org.ar

RESUMEN

La biomasa constituye una fuente renovable de energía con potencial para su aprovechamiento mediante procesos de conversión termoquímica. El objetivo de este trabajo fue clasificar diferentes biomásas agroindustriales de Tucumán según su composición elemental y evaluar su potencial de valorización termoquímica mediante los diagramas de Van Krevelen (H/C vs O/C) y ternario C-H-O. Se analizaron 25 muestras de bagazo de caña de azúcar, residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC), sorgo fibroso, chip de maderas autóctonas y chip de limonero, determinándose los contenidos de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y oxígeno (O), las relaciones molares H/C y O/C, y los poderes caloríficos superior e inferior. Los resultados mostraron que los chips de maderas autóctonas y de limonero presentaron los mayores contenidos de carbono, las menores relaciones O/C y los mayores valores de poder calorífico, evidenciando una mayor densidad energética. En el diagrama de Van Krevelen, todas las biomásas se ubicaron en la región característica de materiales lignocelulósicos, mientras que el diagrama ternario C-H-O permitió visualizar diferencias en su composición elemental. En conjunto con el análisis elemental y los parámetros energéticos, estos diagramas mostraron que las biomásas leñosas presentan características reportadas en la literatura como favorables para procesos de pirólisis orientados a la producción de biochar, mientras que el bagazo y el RAC evidenciaron una composición compatible con una mayor reactividad térmica, asociada a procesos de combustión y gasificación. El sorgo fibroso presentó un comportamiento intermedio, sugiriendo un potencial de aplicación en diferentes rutas de conversión termoquímica. Los resultados indican que el análisis conjunto de la composición elemental, las relaciones molares H/C y O/C, los diagramas de Van Krevelen y ternario C-H-O, y las propiedades energéticas constituye una herramienta útil para comparar biomásas y orientar la evaluación preliminar de alternativas de valorización termoquímica.

Palabras clave: biomasa lignocelulósica, conversión termoquímica, análisis elemental.

ABSTRACT

Evaluation of the Thermal Conversion Potential of Agro-industrial Biomasses from Tucumán

Biomass is a renewable energy source with significant potential for utilization through thermochemical conversion processes. The objective of this study was to classify different agro-industrial biomasses from Tucumán according to their elemental composition and to evaluate their thermochemical valorization potential using the Van Krevelen (H/C vs. O/C) and C-H-O ternary diagrams. Twenty-five samples each of sugarcane bagasse, sugarcane harvest residues (SHR), high-fiber sorghum, native wood chips, and lemon wood chips were analyzed to determine their carbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N), and oxygen (O) contents, H/C and O/C atomic ratios, and higher and lower heating values. The results showed that native wood chips and lemon wood chips exhibited the highest carbon contents, the lowest O/C ratios, and the highest heating values, indicating a greater energy density. In the Van Krevelen diagram, all biomasses were located within the characteristic region of lignocellulosic materials, while the C-H-O ternary diagram highlighted differences in their elemental composition. Together with elemental and energy analyses, these diagrams

Fecha de
recepción:
12/09/2025

Fecha de
aceptación:
14/07/2026

indicated that woody biomasses exhibit characteristics reported in the literature as favorable for pyrolysis processes aimed at biochar production, whereas sugarcane bagasse and SHR displayed a composition consistent with higher thermal reactivity, commonly associated with combustion and gasification processes. High-fiber sorghum showed an intermediate behavior, suggesting potential applicability across different thermochemical conversion pathways. The results indicate that the combined analysis of elemental composition, H/C and O/C atomic ratios, the Van Krevelen and C-H-O ternary diagrams, and energy properties provides a useful approach for comparing biomass feedstocks and supporting the preliminary assessment of thermochemical valorization alternatives.

Key words: lignocellulosic biomass, thermochemical conversion, elemental analysis.

INTRODUCCIÓN

La biomasa se define como un conjunto de sustancias orgánicas originadas a partir de compuestos de carbono generados por fotosíntesis. El aprovechamiento energético de este material puede enfocarse desde dos puntos de vista: el aprovechamiento directo de toda la biomasa y el aprovechamiento de los residuos generados por las actividades forestal y agrícola. Estos pueden transformarse a través de varios procesos, principalmente termoquímicos como combustión, pirólisis y gasificación, para la generación de energía (Nogués *et al.* 2010).

La clasificación de la biomasa resulta importante para evaluar las propiedades de esta como combustible y definir la ruta o proceso de conversión termoquímico más adecuado. Es por esto, que el diagrama de Van Krevelen y el diagrama ternario, permiten visualizar la composición elemental, la reactividad y el potencial de conversión energética de los combustibles.

El diagrama de Van Krevelen es un gráfico bidimensional utilizado principalmente en geoquímica y ciencia de materiales para clasificar el querógeno, el carbón y la materia orgánica. Desde el punto de vista de la biomasa y la bioenergía, este diagrama es una herramienta fundamental para evaluar la calidad energética de los combustibles orgánicos y monitorear su transformación mediante procesos térmicos. En este diagrama se representan las relaciones molares H/C (hidrógeno/carbono) y O/C (oxígeno/carbono) (Van Krevelen, 1950; Jenkins *et al.*, 1998). Las relaciones H/C y O/C permiten estimar el grado de reactividad, es decir, la facilidad que tiene la muestra para reaccionar térmicamente (oxidarse, gasificarse o descomponerse). En el diagrama, valores altos de H/C y O/C suelen ser más reactivos, ya que contienen más grupos funcionales que pueden romperse y oxidarse. La relación O/C permite evaluar el grado de oxidación de la muestra, a mayor valor de O/C, mayor oxidación lo que facilita la combustión (Rojas González y Barraza, 2012; Martínez-Mendoza *et al.*, 2023). Mientras que la relación molar H/C, expresa el grado de hidrogenación y es clave para seleccionar el combustible desde el punto de vista ambiental. Un valor alto H/C, implica un menor contenido de carbono que se traduce en menores emisiones de CO₂ (Basu, 2018; Wang *et al.*, 2023). Un combustible fósil, formado geológicamente durante millones de años con elevado contenido de carbono, tiene un poder calorífico superior (PCS) alto,

mientras que las biomásas frescas, tienen un PCS bajo, debido a sus elevadas relaciones de H/C y O/C. En la actualidad, Wang *et al.* (2023), estudiaron el diagrama de Van Krevelen optimizado mediante inteligencia artificial (*machine learning*) para comparar por medio de representaciones visuales el impacto de las relaciones H/C y O/C de la materia prima y los productos obtenidos mediante seis técnicas de conversión térmica comúnmente utilizadas: torrefacción, carbonización hidrotermal, licuefacción hidrotermal, gasificación hidrotermal, pirólisis y gasificación. Esto ayuda a optimizar la selección de la materia prima y la elección de la técnica de conversión térmica.

El diagrama ternario, construido en base a los contenidos de carbono, hidrógeno y oxígeno (C-H-O), representa la composición de cada uno de los compuestos dentro del triángulo, donde cada vértice corresponde al 100% de la concentración de cada elemento. Este esquema permite analizar la composición de la biomasa para identificar las zonas de los diferentes procesos de conversión termoquímica (Saldarriaga Elorza, 2015; Basu, 2018). Por ejemplo, muestras cercanas al vértice de carbono, estarían en la zona de pirólisis lenta y torrefacción, mientras que las muestras cercanas al oxígeno estarían en la zona de combustión y gasificación. Por último, muestras cercanas al vértice de hidrógeno, estarían en la zona del proceso de hidrogenación (Basu, 2018).

En el trabajo titulado caracterización y clasificación del bagazo y RAC de caña de azúcar, según índices de comportamiento a partir de su composición química elemental (Zamora Rueda *et al.*, 2024), se informaron resultados de análisis físico-químicos y energéticos de estas biomásas. El bagazo y el RAC fueron esquematizados, en el diagrama de Van Krevelen, presentando valores similares de H/C y de O/C (bagazo 1,83 y 0,89 vs RAC 1,58 y 0,86), y en el diagrama ternario, con valores de C-H-O de 42,74 - 6,51 - 50,49 respectivamente para bagazo y de 43,46 - 5,72 - 49,92 para RAC. Asimismo, se realizó la caracterización de muestras de poda de limón de Tucumán (Díaz *et al.*, 2017) y de sorgo fibroso de Tucumán (Cruz *et al.*, 2024).

El objetivo de este trabajo fue clasificar diferentes biomásas de Tucumán, bagazo, RAC, sorgo fibroso, chip de maderas autóctonas y chip de limonero, según su composición elemental y analizar su potencial de conversión termoquímica mediante los diagramas de Van Krevelen y ternario C-H-O.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras: para cada tipo de biomasa se analizaron 25 muestras independientes. Las muestras de bagazo de caña de azúcar provinieron de 13 ingenios tucumanos; para el RAC de las tres zonas agroecológicas del área cañera de Tucumán (chaco pampeana, pedemonte, llanura deprimida) de la variedad LCP85-384; para sorgo fibroso tipo híbrido proveniente de diferentes parcelas experimentales de la EEOC, chip de maderas autóctonas (comercial) y chip de limonero, este último proveniente de la extracción de plantas de fincas productivas de Tucumán. Cada muestra fue analizada por duplicado. Todas las determinaciones se realizaron en el laboratorio en condiciones ambientales controladas, evitando vibraciones y manteniendo la temperatura y la humedad relativa dentro de los rangos adecuados para el correcto funcionamiento de los equipos, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

Contenido de humedad y cenizas: inicialmente, para la determinación del contenido de humedad, se utilizaron 100 g de cada muestra, analizándose por duplicado. Las mismas se secaron en estufa a 105°C hasta peso constante, determinándose el contenido de humedad, expresado en [% p/p], en base húmeda, según norma ASTM D5142-02 (ASTM International, 2002). Posteriormente, las muestras secas se pulverizaron en un molino marca FRISTCHER, modelo Pulverisette 19, utilizando una malla de tamizado de 1 mm. Para la determinación del contenido de cenizas se emplearon 2 g de muestra seca y molida, realizándose las determinaciones por duplicado en un equipo termogravimétrico LECO, modelo TGA701 y expresándose los resultados en [% p/p] base seca (b.s.) según norma ASTM D5142-02 (ASTM International, 2002).

Análisis de composición elemental: a las muestras secas y molidas se les determinaron los contenidos de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N), expresados en [%p/p] en base seca, utilizando un analizador elemental LECO, modelo CHON628, según norma ASTM D 3176-15 (ASTM International, 2015) y ASTM D 5373-02 (ASTM International, 2002). Para las determinaciones de CHN se emplearon 0,10 g de muestras secas y molidas, realizándose previamente la calibración del equipo mediante un patrón certificado de EDTA. La determinación de O, se efectuó utilizando 1 mg de muestra, calibrando el equipo con un patrón certificado Carbon Black. Todas las determinaciones se realizaron por duplicado y los resultados se expresaron como el valor promedio de ambas.

Análisis energéticos: para la determinación de PCS se utilizó aproximadamente 1g de muestra seca y molida. Cada muestra fue analizada por duplicado y los resultados se expresaron como un promedio de ambas determinaciones. Para este análisis, se utilizó una bomba calorimétrica, marca Parr, modelo 6200, que fue calibrada con un patrón certificado de ácido benzoico de acuerdo a las especificaciones del fabricante y según norma ASTM D2015-96 (ASTM International, 1996).

La determinación del poder calorífico inferior (PCI) de las biomásas en estudio, se realizó mediante cálculo utilizando la Ecuación 1, propuesta por Feijóo *et al.* (2015).

$$PCI [kJ/kg] = PCS \times (1 - w) - 2442 \times [9 \times H \times (1 - Cz) \times (1 - w) + w] (1)$$

Donde:

PCI: poder calorífico inferior, en kJ/kg, en base húmeda

PCS: poder calorífico superior determinado en bomba calorimétrica, en kJ/kg, en base seca.

w: contenido de humedad del combustible en base húmeda.

H: contenido de hidrógeno en el combustible en base seca y libre de cenizas.

Cz: contenido de cenizas del combustible en base seca.

Tratamiento de los datos: para cada tipo de biomasa se calcularon los valores promedio de las determinaciones realizadas y su correspondiente coeficiente de variación (C.V.), expresado en porcentaje, como medida de la variabilidad de los resultados. El coeficiente de variación se calculó como la relación entre la desviación estándar (DE) y la media, multiplicada por 100 ($CV = DE/media \times 100$).

Diagrama de Van Krevelen y Diagrama Ternario (C-H-O): para la construcción del diagrama de Van Krevelen, se determinaron las relaciones molares H/C y O/C para cada una de las biomásas analizadas, siguiendo la metodología propuesta por los autores (Van Krevelen, 1950; Jenkins *et al.*, 1998). El diagrama ternario, se construyó en base a los valores porcentuales peso/peso (% p/p) base seca de los contenidos de carbono, hidrógeno y oxígeno obtenidos del equipo de composición elemental y se siguió la metodología propuesta por Basu (2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de humedad, cenizas, análisis de composición elemental y análisis energético

La Tabla 1 presenta los valores promedio del contenido de humedad y cenizas, la composición elemental, las relaciones molares (H/C y O/C), así como el poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), junto con sus respectivos coeficientes de variación porcentual (C.V.%). Asimismo, se incluyen comparaciones con resultados reportados por Vassilev *et al.* (2010), Saldarriaga Elorza (2015), Guachi Cabrera (2019), Nunes *et al.* (2020), Rutiga-Quinones *et al.* (2020), Martínez-Mendoza *et al.* (2023), Shin *et al.* (2023), Yoshimoto *et al.* (2023),

Las biomásas estudiadas presentaron diferencias significativas en su contenido de humedad. El chip de limonero registró el menor valor (12,00%), seguido del RAC (12,86%) y del chip de maderas autóctonas (15,37%), mientras que el bagazo (51,58%) y el sorgo fibroso (61,35%) mostraron contenidos considerablemente más elevados. Estos resultados indican que las tres primeras biomásas requerirían una menor demanda energética para su acondicionamiento previo a procesos termoquímicos.

Respecto al contenido de cenizas, el RAC presentó el valor más elevado (14,40%), seguido por el bagazo (8,99%), mientras que el sorgo fibroso (2,45%), el chip de maderas autóctonas (2,98%) y el chip de limonero (3,52%) mostraron concentraciones significativamente menores.

El contenido de carbono varió entre 42,81% y 46,99%. El mayor valor correspondió al chip de maderas autóctonas (46,99%), seguido por el chip de limonero (45,68%) y el sorgo fibroso (44,07%). El bagazo y el RAC registraron contenidos similares de carbono (42,88 y 42,81% respectivamente).

Los mayores contenidos de hidrógeno se observaron en el chip de limonero (6,67%) y chip de maderas autóctonas (6,65%), mientras que el RAC presentó el menor valor (5,79%).

El contenido de nitrógeno fue bajo en todas las biomásas (<0,70%), destacándose el RAC con el valor más elevado (0,65%).

El contenido de oxígeno varió entre 46,29% y 50,99%, registrándose el menor valor en el chip de maderas autóctonas. Esta característica se asocia con una mayor densidad energética de la biomasa, ya que menores concentraciones de oxígeno suelen correlacionarse con mayores valores de poder calorífico.

Los mayores valores de poder calorífico superior (PCS) se obtuvieron para el chip de maderas autóctonas (19.447 kJ/kg), seguido por el chip de limonero (18.337 kJ/kg) y el bagazo (17.401 kJ/kg). El sorgo fibroso presentó un PCS intermedio (17.154 kJ/kg), mientras que el RAC

mostró el valor más bajo (15.730 kJ/kg) en correlación con su alto contenido de cenizas.

Para el poder calorífico inferior (PCI), se observa una marcada correlación inversa con el contenido de humedad y cenizas, con máximos en el chip de maderas autóctonas (14.883 kJ/kg) y el chip de limonero (14.599 kJ/kg), mientras que el RAC, aún con un contenido relativamente alto de cenizas presentó un PCI de 12.449 kJ/kg debido a su baja humedad. En cuanto al bagazo y el sorgo fibroso, de mayores humedades, se obtuvieron valores de PCI de 6.533 y 4.596 kJ/kg respectivamente. Relacionando los valores de PCI, con los PCS y contenidos de humedad y cenizas, puede inferirse que para los rangos estudiados, la influencia del aumento de humedad es mayor que la influencia del aumento de cenizas, en la caída del PCI.

En lo referido a las relaciones H/C variaron entre 1,61 y 1,83, mientras que las relaciones O/C oscilaron entre 0,74 y 0,89. El chip de maderas autóctonas presentó la menor relación O/C (0,74), seguido por el chip de limonero (0,78), indicando un mayor grado de carbonización y una mejor calidad energética. Por el contrario, el bagazo y el RAC presentaron las relaciones O/C más elevadas (>0,85).

Tabla 1. Comparación de las propiedades físico- químicas, energéticas y relaciones molares para las biomásas estudiadas con valores reportados por otros autores. Los resultados de este trabajo se expresaron como valor promedio y con el coeficiente de variación (CV%)

	Bagazo		RAC		Sorgo fibroso		Chip de maderas autóctonas		Chip de limonero	
	Este trabajo	Nunes <i>et al.</i> (2020)	Este trabajo	Martínez-Mendoza <i>et al.</i> (2023)	Este trabajo	Yoshimoto <i>et al.</i> (2023)	Este trabajo	Shin <i>et al.</i> (2023)	Este trabajo	Rutiaga Quiñones <i>et al.</i> (2020)
Humedad (%p/p) base húmeda	51,58 (2,54%)	-	12,86 (2,90%)	6,8	61,35 (2,04%)	-	15,37 (1,05%)	-	12,00 (1,60%)	-
Ceniza (% p/p) base seca	8,99 (2,20%)	15,0	14,40 (2,80%)	17,1	2,45 (1,54%)	5,27	2,98 (1,26%)	0,77	3,52 (1,84%)	3,29
Análisis elemental (%p/p, base seca)										
Carbono	42,88 (3,19%)	47,12	42,81 (3,97%)	39,90	44,07 (2,28%)	43,50	46,99 (3,77%)	43,97	45,68 (2,73%)	49,84
Hidrógeno	6,53 (1,98%)	6,21	5,79 (1,22%)	5,70	6,49 (1,55%)	6,48	6,65 (2,20%)	6,05	6,67 (2,25%)	5,86
Nitrógeno	0,19 (2,77%)	0,13	0,65 (2,42%)	0,60	0,23 (3,25%)	0,45	0,07 (3,05%)	0,10	0,23 (3,16%)	1,32
Oxígeno	50,39 (3,02%)	46,54	50,99 (3,22%)	36,50	49,34 (3,50%)	44,40	46,29 (3,92%)	30,19	47,42 (2,82%)	42,99
Análisis energético (kJ/kg)										
PCS base seca	17.401 (1,5%)	17.440	15.730 (1,70%)	16.555	17.154 (1,17%)		19.447 (0,80%)	19.929	18.337 (0,50%)	18.220
PCI base húmeda	6.533 (4,19%)		12.449 (1,94%)		4.596 (5,80%)		14.883 (0,93%)	18.338	14.599 (0,64%)	
Relaciones molares		Guachi Cabrera (2019)		Vassilev <i>et al.</i> (2010)		Vassilev <i>et al.</i> (2010)		Saldarriaga Elorza (2015)		
H/C	1,83	1,9	1,61	1,47	1,77	1,56	1,70	1,8	1,75	
O/C	0,88	0,90	0,89	0,67	0,84	0,68	0,74	0,80	0,78	

Las diferencias observadas entre las biomásas reflejan variaciones en su composición y permiten inferir su comportamiento durante los procesos de conversión termoquímica.

El elevado contenido de humedad del bagazo y del sorgo fibroso coincide con lo reportado para materiales lignocelulósicos frescos y constituye una limitante para su transformación energética, debido a que una fracción importante de la energía liberada se consume en la evaporación del agua. En contraste, el RAC y los chips de maderas autóctonas y limonero presentan niveles de humedad considerablemente inferiores, favoreciendo su transformación energética.

El contenido de cenizas constituye uno de los parámetros más importantes para evaluar la aptitud de una biomasa como combustible sólido. El elevado valor registrado para el RAC (14,40%) podría generar problemas operativos asociados a la formación de escorias, incrustaciones y deposiciones en equipos de combustión. Por el contrario, los bajos contenidos de cenizas observados en el sorgo fibroso y en ambas biomásas leñosas sugieren una mejor calidad combustible y una mayor estabilidad operativa.

La composición elemental mostró que los chips de maderas autóctonas y limonero poseen los mayores contenidos de carbono y los menores contenidos relativos de oxígeno. Esta característica se relaciona directamente con una mayor densidad energética, lo cual explica los elevados valores de PCS obtenidos para estas biomásas. El contenido de carbono y la reducción del oxígeno favorecen la producción de combustibles sólidos con mejores propiedades energéticas y mayor estabilidad térmica.

Los valores de PCS obtenidos para el chip de maderas autóctonas y el chip de limonero son comparables a los reportados para otras biomásas leñosas utilizadas en procesos de combustión, gasificación y pirólisis. En contraste, el menor PCS del RAC puede atribuirse principalmente a su elevado contenido de cenizas, ya que la fracción mineral no contribuye a la generación de energía durante la combustión.

Las relaciones molares H/C y O/C permiten evaluar la calidad energética de las biomásas mediante diagramas de Van Krevelen. Los menores valores de O/C

observados para el chip de maderas autóctonas y el chip de limonero indican una composición más cercana a combustibles sólidos de mayor rango energético, lo que sugiere una mayor aptitud para procesos de pirólisis orientados a la producción de biochar de alta calidad. Por el contrario, las mayores relaciones O/C registradas para el bagazo y el RAC evidencian una composición más oxidada y una menor densidad energética. Sin embargo, estas biomásas continúan siendo materias primas atractivas para procesos de conversión termoquímica, tales como combustión, gasificación y pirólisis rápida.

En términos generales, los resultados permiten establecer que los chips de maderas autóctonas y limonero presentan el mayor potencial para aplicaciones termoquímicas, debido a su combinación de bajo contenido de cenizas, elevados contenidos de carbono y mayores valores de poder calorífico. El sorgo fibroso constituye una alternativa promisoriosa, aunque requiere acondicionamiento previo por su elevada humedad. Por su parte, el RAC presenta limitaciones asociadas a su alto contenido de cenizas y baja densidad, aspectos que deben considerarse en estrategias de valorización energética y mezclas con combustibles.

Diagrama de Van Krevelen (H/C vs O/C)

La Figura 1 presenta la ubicación de las biomásas analizadas en el diagrama de Van Krevelen, junto con combustibles fósiles de referencia (turba, lignito, carbón y antracita) y muestras de madera reportadas por Cortés (2006). Las biomásas estudiadas se ubicaron en la región superior derecha del diagrama, con relaciones molares comprendidas entre 0,74–0,88 para O/C y 1,61–1,83 para H/C, características típicas de materiales lignocelulósicos. En contraste, los combustibles fósiles se localizaron en la región inferior izquierda, presentando menores relaciones O/C (<0,50) y H/C (<1,00), asociadas a mayores grados de carbonización y poderes caloríficos superiores generalmente mayores a 28.000 kJ/kg.

Entre las biomásas evaluadas, el chip de maderas autóctonas y el chip de limonero presentaron las menores relaciones O/C, ubicándose más próximos a la región ocupada por los combustibles fósiles. Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos en el

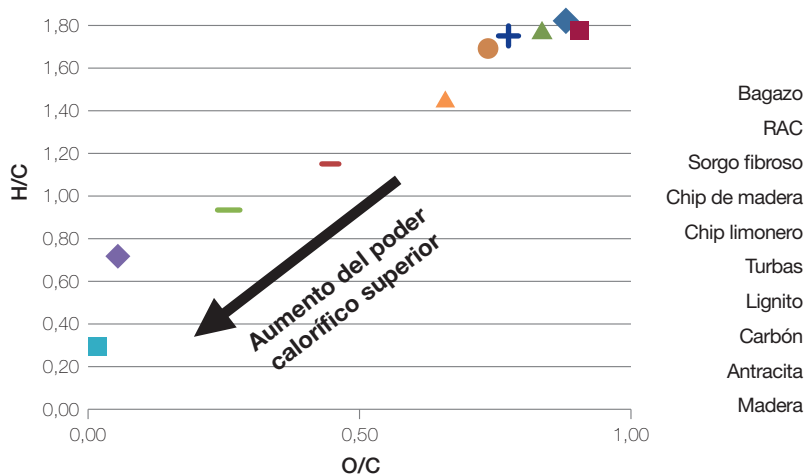


Figura 1. Diagrama de Van Krevelen de biomásas estudiadas y combustibles fósiles informados por Cortés (2006).

análisis elemental y energético, donde ambas biomásas exhibieron los mayores contenidos de carbono y los mayores valores de PCS. Por el contrario, el bagazo, el RAC y el sorgo fibroso mostraron las mayores relaciones O/C, evidenciando una composición más oxidada y una menor densidad energética.

La distribución observada coincide con lo informado por Vassilev *et al.* (2010), Guachi Cabrera (2019) y Saldarriaga Elorza (2015), quienes reportaron que las biomásas lignocelulósicas y residuos agroindustriales se concentran en la región superior del diagrama debido a sus elevados contenidos relativos de hidrógeno y oxígeno. Asimismo, Martínez-Mendoza *et al.* (2023) y Rojas González y Barraza (2012) señalaron que la relación O/C constituye un indicador del grado de oxidación de la biomasa, siendo las muestras con mayores valores de O/C generalmente más reactivas durante los procesos de combustión y gasificación.

Por otra parte, Wang *et al.* (2023) destacaron que la relación H/C influye significativamente sobre la distribución de productos obtenidos durante los procesos termoquímicos. Biomásas con menores relaciones H/C tienden a producir mayores rendimientos de biochar, mientras que materiales con mayores valores de H/C favorecen la formación de bio-oil y gases combustibles durante la pirólisis y la gasificación.

La tendencia observada desde las biomásas hacia los combustibles fósiles sugiere una correspondencia entre la disminución de las relaciones O/C y H/C y el incremento del poder calorífico superior. En consecuencia, procesos de mejora termoquímica como la torrefacción o la carbonización podrían incrementar la densidad ener-

gética de estas biomásas, desplazándolas hacia regiones más próximas a las ocupadas por combustibles fósiles de mayor calidad.

Diagrama ternario (C-H-O)

La Figura 2 presenta el diagrama ternario C-H-O de las biomásas evaluadas en este estudio junto con combustibles fósiles de referencia (antracita, lignito y turba) reportados por Cortés (2006). Las muestras analizadas se agruparon en una región intermedia del triángulo, caracterizada por contenidos de carbono entre 42% y 47%, hidrógeno entre 5,8% y 6,7% y oxígeno entre 46% y 51%. Esta distribución es representativa de biomásas lignocelulósicas con elevados contenidos de oxígeno y bajos grados de carbonización, diferenciándose claramente de los combustibles fósiles, los cuales se localizan próximos al vértice de carbono debido a su mayor concentración de este elemento y, consecuentemente, a su mayor densidad energética (Cortés, 2006).

Las biomásas leñosas, representadas por el chip de maderas autóctonas y el chip de limonero, se ubicaron más próximas al vértice de carbono en comparación con las restantes muestras. Esta posición coincide con los resultados obtenidos en el análisis elemental y energético, donde ambas biomásas presentaron los mayores contenidos de carbono y los mayores valores de PCS. Según Basu (2018), materiales con estas características suelen exhibir un comportamiento favorable para procesos de pirólisis lenta orientados a la producción de biochar, debido a su mayor estabilidad térmica y capacidad para generar biocarbones con elevado contenido energético. Asimismo, Ippolito *et al.* (2020) reportaron que diferen-

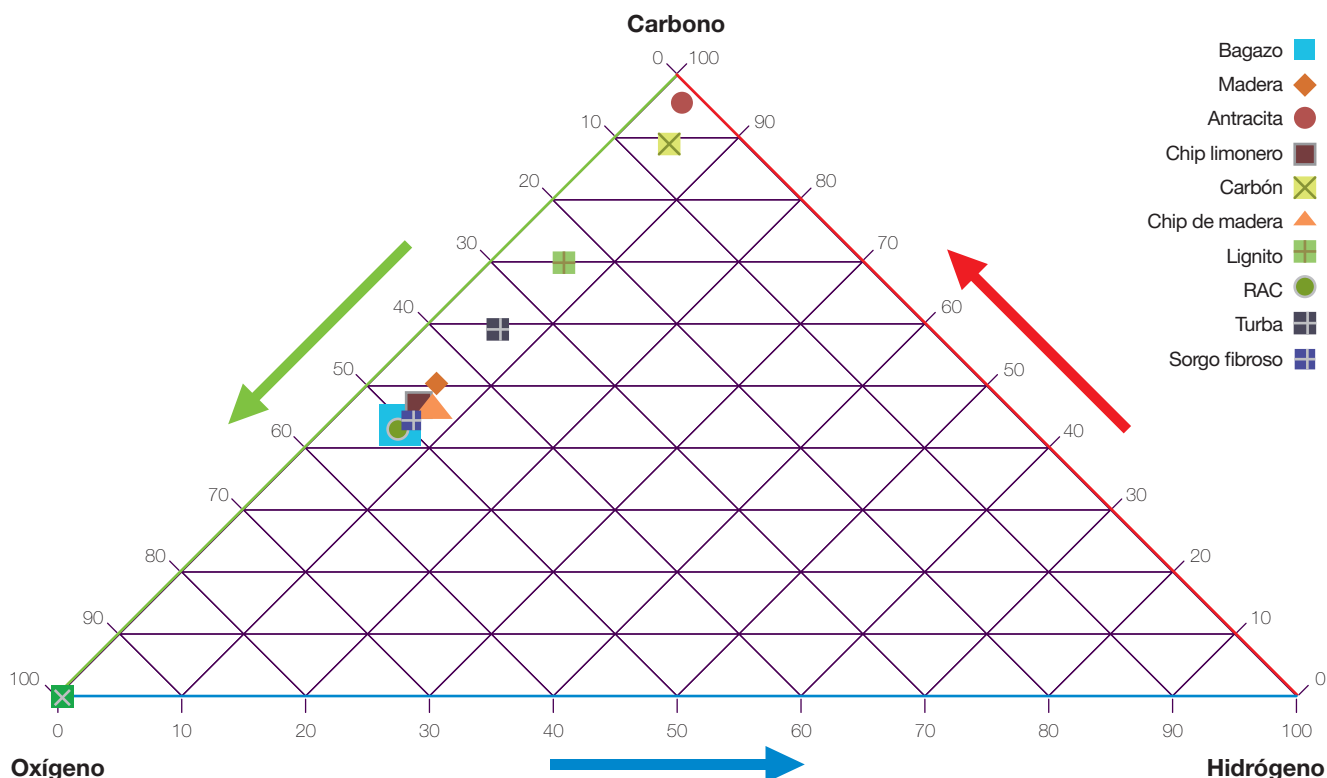


Figura 2. Diagrama ternario C-H-O para las biomásas en estudio y otros combustibles de referencia.

tes especies leñosas producen biochars de alta calidad energética cuando son sometidas a procesos de pirólisis lenta.

El sorgo fibroso ocupó una posición intermedia dentro del conjunto de biomásas evaluadas, con una composición elemental de 44,07% de carbono, 6,49% de hidrógeno y 49,34% de oxígeno. Su ubicación en el diagrama sugiere un comportamiento versátil frente a diferentes rutas de conversión termoquímica. Basu (2018) indica que materiales con composiciones similares pueden ser empleados eficientemente en procesos de pirólisis rápida para la obtención de bio-oil. Estos resultados coinciden con los reportados por Ajikashile *et al.* (2023), quienes observaron rendimientos favorables de bio-oil a partir de biomásas de sorgo. Asimismo, Cruz *et al.* (2024) señalaron que el sorgo fibroso constituye una alternativa viable para su utilización como combustible complementario en mezclas con bagazo y RAC en sistemas de combustión industrial.

Por su parte, el bagazo y el RAC se ubicaron más próximos al vértice de oxígeno, presentando contenidos cercanos al 50% de este elemento. Esta posición refleja una composición más oxidada y una mayor reactividad térmica en comparación con las biomásas leñosas. Basu (2018) señala que materiales con elevados contenidos de oxígeno suelen presentar un comportamiento favorable en procesos de combustión y gasificación debido a su mayor facilidad de ignición y conversión. De manera similar, Vassilev *et al.* (2010) y Wang *et al.* (2023) reportaron que biomásas con contenidos de oxígeno comprendidos entre 45% y 55% presentan una elevada reactividad y una buena aptitud para procesos de combustión y gasificación.

En conjunto, la distribución observada en el diagrama ternario C-H-O confirma las tendencias identificadas en el análisis elemental, energético y en el diagrama de Van Krevelen. Las biomásas leñosas mostraron una composición más favorable para procesos orientados a la producción de biochar de alta calidad mediante pirólisis lenta, mientras que el bagazo y el RAC presentaron características más adecuadas para combustión y gasificación. El sorgo fibroso exhibió un comportamiento intermedio, evidenciando potencial para aplicaciones energéticas diversas, incluyendo combustión, pirólisis rápida y producción de bio-oil.

Tanto el diagrama de Van Krevelen como el diagrama ternario C-H-O son herramientas de *screening* para evaluar el potencial de valorización de las biomásas y las posibles rutas de conversión termoquímica, ya que se basan en la composición elemental, la cual se relaciona con el poder calorífico, el grado de carbonización, la reactividad térmica y el rendimiento esperado de biochar, bio-oil y gases. En este sentido, estos diagramas no permiten determinar de manera directa qué tecnología debe utilizarse, sino clasificar la biomasa y analizar su potencial para distintas rutas de conversión a partir de propiedades fisicoquímicas ampliamente conocidas.

CONCLUSIONES

La caracterización físico-química, energética y elemental de las biomásas agroindustriales evaluadas per-

mitió identificar diferencias relevantes en sus propiedades con potencial influencia sobre su comportamiento durante procesos de conversión termoquímica. La interpretación conjunta del análisis elemental, los diagramas de Van Krevelen y ternario C-H-O, y los parámetros energéticos constituyó una herramienta útil para comparar las biomásas y evaluar su potencial de valorización energética.

Las biomásas leñosas presentaron mayores contenidos de carbono y mayores valores de poder calorífico, características asociadas en la literatura con una mayor estabilidad térmica y un potencial favorable para procesos de pirólisis orientados a la producción de biochar. Por su parte, el bagazo y el RAC mostraron mayores contenidos de oxígeno y una composición compatible con una mayor reactividad térmica, lo que sugiere un potencial para procesos de combustión y gasificación. El sorgo fibroso presentó un comportamiento intermedio, evidenciando características que podrían favorecer su utilización en diferentes rutas de conversión termoquímica.

En conjunto, la composición elemental, las relaciones molares H/C y O/C, los diagramas de Van Krevelen y ternario C-H-O, y las propiedades energéticas constituyen indicadores complementarios para evaluar el potencial termoquímico de diferentes biomásas. Si bien estos parámetros no permiten definir por sí solos la tecnología de conversión más adecuada, proporcionan una base técnica para orientar la selección de alternativas de valorización energética, la cual debe complementarse con estudios específicos de conversión y análisis de rendimiento de cada proceso.

En este sentido, este trabajo aporta información de interés para la planificación de estrategias de aprovechamiento energético de recursos biomásicos regionales, contribuyendo al desarrollo de sistemas de bioenergía y economía circular basados en residuos agroindustriales de Tucumán.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Ing. Agr. Eduardo Romero y al Ing. Agr. Sergio Casen, de la Sección Agronomía de Caña de Azúcar por su colaboración en el muestreo de RAC y sorgo fibroso de los diferentes campos cañeros y lotes de ensayos de la provincia de Tucumán.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- ASTM International. 1996.** Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by Adiabatic Bomb Calorimeter. ASTM D2015-96. West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials, ASTM International. 2002.** Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures. ASTM D5142-02. West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials, ASTM International. 2002.** Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and

- Coke. ASTM D5373-02. West Conshohocken, PA, USA
- American Society for Testing and Materials, ASTM International. 2015.** Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke. ASTM D3176-15. West Conshohocken, PA, USA.
- Ajikashile, J. O. ; A. Muhammad-Jamal; G. Kofi Parku; A. Funke and A. Kruse. 2023.** A study on the fast pyrolysis of millet and sorghum straws sourced from arid and semi-arid regions of Nigeria in a twin-screw mixing reactor, *Materials Science for Energy Technologies* (6): 338-398. [En línea] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299123000174> (consultado 22/10/2025).
- Basu, P. 2018.** Biomass, Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Academic Press of Elsevier. Oxford, UK, pp. 64-68.
- Cortés, V. 2006.** Carbón. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) Universidad de Sevilla. España- Sevilla. [En línea] Disponible en: <http://www.factoria3.com/documentos/CARBON.pdf> (consultado el 04 de julio 2025).
- Cruz, M.C.; M.A Golato; G. del H. Zamora Rueda; C.E. Gutiérrez; S. D. Casen y R.M. Ruiz. 2024.** Valoración del sorgo fibroso para su aprovechamiento como combustible alternativo en calderas bagaceras de Tucumán, Argentina. Libro De Resúmenes de XXIII Reunión Nacional de Técnicos de la caña de azúcar.: 252-256. [En línea] Disponible en: <https://www.eeaoc.gob.ar/wp-content/uploads/2024/07/LIBRO-DE-RESUMENES-SATCA-2024-FINAL-1.pdf> (consultado 16/10/2025).
- Díaz, G. F.; G. Zamora Rueda; M. G. Mistretta; C. E. Gutiérrez; F. L. Peralta; M. Golato y D. Paz. 2017.** Estudio preliminar de la caracterización energética de la poda de limón en la provincia de Tucumán. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* Tomo 94 (2): 71-74.
- Feijóo, E. A.; M. A. Golato; F. J. Franck Colombres; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2015.** Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar de Tucumán. *Rev. Ind. Y Agríc. de Tucumán* 92 (2): 23-32.
- Guachi Cabrera, P. E. 2019.** Obtención de carbón mediante carbonización hidrotermal utilizando bagazo de caña. Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación para la obtención del título de Ingeniera Química. Universidad Central de Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Quito- Ecuador. [En línea]. Disponible en: <http://200.12.169.19/bitstream/25000/17962/1/TUCE-0017-IQU-031.pdf> (consultado 04/07/ 2025)
- Ippolito, J.A.; L. Cui; C. Kammann; N. Wrage Mönnig; J. M. Estavillo; T. Fuertes Mendizabal; M. L. Cayuela; G. Sigua; · J. Novak; · K. Spokas and N. Borchard. 2020.** Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar* (2): 421-438. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x> [En línea] Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42773-020-00067-x> (consultado 22/10/ 2025)
- Jenkins, B.M.; L.L. Baxter; Jr.T.R. Miles and T. R. Miles. 1998.** Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54:17-46. [En línea] DOI 10.1016/S0378-3820(97)00059-3. Disponible en: <http://gekgasifier.pbworks.com/f/biomass%2520fuel%2520properties%2520Miles.pdf> (consultado 04 /05/2022).
- Martínez- Mendoza, K.L.; J. Guerrero-Perez; J. Barraza-Burgosa, C. R. Forero; O. Williams; E. Lester y N. Gil. 2023.** Thermochemical behavior of agricultural and industrial sugarcane residues for bioenergy applications. *BIOENGINEERED* 14(1), 2283264. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2283264> (consultado 14/07/2025).
- Nogués, F. S.; D. García Galindo y A. Rezeau. 2010.** Energías Renovables. Energía de la biomasa (Vol. 1). Prensa Universitaria de Zaragoza. 1 ed., Zaragoza. España, pp.21-41; 140-150.
- Nunes, L. J. R.; L. M. E. F. Loureiro; Sá, L. C. R. and Silva, H. F. C. 2020.** Sugarcane Industry Waste Recovery: A Case Study Using Thermochemical Conversion Technologies to Increase Sustainability. *Applied Sciences*, 10 (18): 6481. [En línea] Disponible en <https://doi.org/10.3390/app10186481> (consultado 14/07/2025)
- Rojas-González, A. F. y J.M. Barraza-Burgos. 2012.** Efecto de la relación atómica oxígeno/ carbono del carbón sobre la reactividad en la combustión de carbonizados. *Ingeniería y Universidad* 17 (1): 41-57. [En línea] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47728625003> (consultado 04/07/ 2025)
- Rutiaga-Quinones, J. G.; L. F. Pintor-Ibarra; R. Orihuela-Equihua; N. González-Ortega; M. A. Ramírez-Ramírez; A. Carrillo-Parra; N. Carrillo-Ávila; M. A. Navarrete-García; F. Ruiz-Aquino; J. R. Rangel-Méndez; J. Hernández-Solís and C. Luján-Álvarez. 2020.** Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioRes.* 15(4): 8529-8553. [En línea]. Disponible en: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2020/09/BioRes_15_4_8529_RutiagaQ_POGACCNRRL_Charac_Mexican_Biomass_Waste_Energy_Use_17805.pdf (consultado 14/07/2025).
- Saldarriaga Elorza, J. F. 2015.** Avances en el modelado de la combustión de biomasa en spouted bed cónico. Tesis doctoral para la obtención del título de doctor en ingeniería química. Universidad del País Vasco. Facultad de Ciencia y Tecnología- Departamento de Ingeniería Química. Leioa, España. [En línea] Disponible en: <https://addi.ehu.es/handle/10810/15799> (consultado 04/07/2025).
- Shin, T.-S.; Yoo, S.-Y.; Kang, I.-K.; Kim, N.; Kim, S.; Lim, H.-B.; Choe, K.; Lee, J.-C.; Yang, H.-I. 2023.** Analysis of Hydrothermal Solid Fuel Characteristics Using Waste Wood and Verification of Scalability through a Pilot Plant. *Processes* 10 (11): 2315. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr10112315> (consultado 14/07/2025).
- Van Krevelen, D. W. 1950.** Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal. *Fuel* 29:269-84.
- Vassilev, S. V; D. Baxter; L. K. Andersen and C. G. Vassileva. 2010.** An overview of the chemical

composition of biomass. Fuel 89: 913–933. [En línea] Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236109004967> (consultado 17/07/2025)

Wang, S.; Y. Wang; Z. Shi; K. Sun; Y. Wen ; L. Niedzwiecki; R. Pan; Y. Xu; I. N. Zaini; K. Jagodzińska; C. Aragon-Briceno; C. Tang; T. Onsree; N. Tippayawong; H. Pawlak-Kruczek; P. G. Jönsson; W. Yang; J. Jiang ;S. Kawi and Chi-Hwa Wang. 2023. Van Krevelen diagrams based on machine learning visualize feedstock-product relationships in thermal conversion processes. Communications Chemistry 6: 273. <https://doi.org/10.1038/s42004-023-01077-z> . [En Línea] Disponible en: Van Krevelen diagrams based on machine learning

visualize feedstock-product relationships in thermal conversion processes | Communications Chemistry (consultado 27/10/2025).

Yoshimoto, S.; N. Luthfi; K. Nakano; T. Fukushima and K. Takisawa. 2023. Effects of potassium on hydrothermal carbonization of sorghum bagasse. Bioresource and Bioprocess 10: 24. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00645-4> (consultado 14/07/2025).

Zamora Rueda G. del H.; M. A Golato; W. D. Machado y D. Paz. 2024. Caracterización y clasificación del bagazo y RAC de caña de azúcar, según índices de comportamiento a partir de su composición química elemental. Rev. Ind. Y Agríc. de Tucumán, 101 (1): 63-70.