



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (1):
63-70; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Corresponde a un
trabajo técnico
presentado en el
XII Congreso de
Tecnicaña 2022

Fecha de
recepción:
05/04/2023

Fecha de
aceptación:
15/04/2024

Caracterización y clasificación del bagazo y RAC de caña de azúcar, según índices de comportamiento a partir de su composición química elemental

Gimena del H. Zamora Rueda*; Marcos A. Golato*; Walter D. Machado* y Dora Paz*

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. Email: gzamora@eeaac.org.ar

RESUMEN

En la actualidad existe una tendencia creciente del uso de energías renovables para la producción de energía limpia con el fin de mitigar los efectos del cambio climático. El objetivo de este estudio fue caracterizar físico, química y energéticamente el bagazo de caña de azúcar y el residuo agrícola de cosecha de caña de Tucumán, Argentina. Se realizó, además, una clasificación de estas biomásas por medio del diagrama de Van Krevelen y de un diagrama ternario C-H-O. Para ello se analizaron 20 muestras por duplicado de la zafra 2019, según normas estandarizadas. Se realizaron análisis inmediatos, composición química elemental, poder calorífico superior (PCS) y fusibilidad de cenizas, y se determinaron las relaciones molares, oxígeno/carbono (O/C) e hidrógeno/carbono (H/C) para la confección de los diagramas mencionados. El bagazo mostró menor porcentaje de cenizas (4,93% base seca) en relación al RAC (12,36%), mayor contenido de sólidos volátiles (77,93% base seca) y mayor PCS (17.893 kJ/kg base seca). Las relaciones molares resultaron en promedio de $O/C = 0,89$ $H/C = 1,83$ para bagazo y $O/C = 0,86$ y $H/C = 1,58$ para RAC. Estas relaciones se encuentran dentro de los valores observados en bibliografía para estas biomásas combustibles. Las biomásas estudiadas se ubican en la parte superior del diagrama, presentando mayores relaciones O/C y H/C que la madera. Se recomienda estudiar la cinética de los procesos de pirólisis y gasificación de estas biomásas.

Palabras clave: biomasa lignocelulósica, aprovechamiento energético, biocombustible, gasificación, pirólisis.

ABSTRACT

Tucumán sugar cane by-products: characterization and classification of bagasse and RAC according to oxygen and hydrogen indices

Currently, there is a growing trend of using renewable energies for the production of clean energy, in order to mitigate the effects of climate change. The objective of this study was to physically, chemically and energetically characterize sugarcane bagasse and agricultural sugarcane harvest residue, from Tucumán, Argentina. Furthermore, carry out a classification of these biomasses using the Van Krevelen diagram and a ternary C-H-O diagram. To do this, 20 duplicate samples from the 2019 harvest were analyzed, according to standardized norms. Immediate analyzes were carried out, elemental chemical composition, higher heating value (PCS), ash fusibility and the molar ratios, oxygen/carbon (O/C) and hydrogen/carbon (H/C) were determined to prepare the diagrams mentioned. The bagasse showed a lower percentage of ash (4.93% dry basis) in relation to the RAC (12.36%), a higher content of volatile solids (77.93% dry basis) and a higher PCS (17,893 kJ/kg dry basis). The molar ratios resulted in an average of $O/C = 0.89$ and $H/C = 1.83$ for bagasse and $O/C = 0.86$ and $H/C = 1.58$ for RAC. These relationships are within the values observed in the literature for these fuel biomasses. The biomasses studied are located at the top of the diagram, presenting higher O/C and H/C ratios than wood. It is recommended to study the kinetics of the pyrolysis and gasification processes of these biomasses.

Key words: lignocellulosic biomass, energy use, biofuel, gasification, pyrolysis.

INTRODUCCION

En la actualidad, los combustibles fósiles tienen un peso significativo en la matriz energética mundial. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), el 31,49% de la energía generada a nivel mundial proviene del petróleo; el 26,88% del carbón; el 22,84% del gas natural; el 4,95% de energía nuclear y el 13,84% restante, de fuentes de energías renovables (AIE, 2018). Por este motivo resulta necesario realizar grandes esfuerzos para contrarrestar la enorme dependencia de las fuentes de energías no renovables, grandes generadoras de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que deberán ser reemplazadas paulatinamente por fuentes de energías limpias y sustentables, con el objetivo de equilibrar la matriz energética actual. Una alternativa posible sería el reemplazo de combustibles fósiles por fuentes de energías renovables, entre las cuales se destacan las biomásas, ya sean de origen agrícola o industrial. La utilización, desarrollo y aprovechamiento energético de éstas deben ser planteados de manera estratégica, apuntando a una solución integral y tratando de disminuir el consumo intensivo de combustibles fósiles.

Se consideran biomasa “las sustancias orgánicas que tiene su origen en los compuestos de carbono formados en la fotosíntesis” (Nogués *et al.*, 2010).

En Tucumán- Argentina, más del 90% de la caña de azúcar se cultiva en las regiones del Pedemonte, la Llanura Central o Deprimida y la Llanura Chaco-pampeana. Estas regiones, aunque se encuentran a corta distancia unas de otras, poseen características de suelo, clima y relieve muy contrastantes (Digonzelli *et al.*, 2015). La cosecha de la caña en la provincia de Tucumán se realiza normalmente entre los meses de mayo y noviembre. El tipo de cosecha es mecanizada en verde (93,2%) y mediante el uso de cosechadoras integrales (Digonzelli *et al.*, 2015). Según Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), durante la zafra azucarera 2019 la superficie neta cosechada de caña de azúcar fue de 275.290 ha, de las cuales se obtuvo un total de 15.150.000 t de caña de azúcar (EEAOC, 2019).

En la provincia de Tucumán se encuentran operativos 15 ingenios de caña de azúcar, que utilizan el bagazo como subproducto generado durante la molienda de la caña de azúcar para la obtención de biomasa combustible. La misma es del tipo lignocelulósica, constituida por fibra, sólidos insolubles, sólidos solubles y agua. Durante la zafra 2018/2019 se obtuvieron 4.235.162,61 t de bagazo disponible para energía (EEAOC, 2019).

Otro subproducto de la caña de azúcar para aprovechamiento energético es el residuo agrícola de la cosecha de caña de azúcar (RAC), biomasa que queda en campo posterior a la cosecha. Para determinar el RAC seco factible de ser recolectado se utilizó como base el coeficiente de biomasa residual promedio entre variedades de 151 kg RAC/t caña, determinado por Casen *et al.* (2015). El RAC seco hace referencia a la cantidad de residuo expresada en peso de materia seca por unidad de superficie que queda en campo. Si el valor de RAC factible de recolectar se corrige por el 15% de humedad, y luego a ese total se lo afecta por el 55%, que es el porcentaje factible de recolectar por la máquina, se puede estimar un valor del RAC disponible de 1,27 millones de

toneladas (Casen *et al.*, 2015).

Para poder caracterizar una biomasa como combustible es de vital importancia conocer parámetros físicos, químicos y energéticos. Los parámetros físicos, que son la densidad real y la aparente junto con la fusibilidad de cenizas, influyen en la selección y el diseño de los equipos, el manejo del material y la necesidad de pretratamiento. Los parámetros químicos comprenden el análisis inmediato (humedad, cenizas, sólidos volátiles y carbono fijo) y el análisis elemental (carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, azufre y cloro), los cuales determinan el comportamiento de la biomasa durante los procesos de transformación química y termoquímica. Por último, el poder calorífico es un parámetro energético que determina la energía química del combustible que puede ser transformada directamente en energía térmica mediante un proceso termoquímico de oxidación (combustión), el cual establece la cantidad de energía aprovechable (Nogués *et al.*, 2010).

El estudio de las relaciones molares, como el índice de oxígeno e hidrógeno elemental propuesto por Van Krevelen en 1950 para la clasificación y representación de los combustibles, ha cobrado cada vez más relevancia en el ámbito de la bioenergía (Cortés, 2006; Guachi Cabrera, 2019; Kumar *et al.*, 2019; Van Krevelen, 1950). Este diagrama es útil para definir la calidad de un material orgánico como posible combustible, y su clasificación en función de esa calidad en relación a su capacidad de reacción y el impacto que provoca en el medioambiente. El índice de oxígeno e hidrógeno elemental se construye ubicando en un par de ejes coordenados la relación molar O/C (oxígeno/carbono), también denominado índice de oxígeno, y la relación molar H/C (hidrógeno/carbono), también denominado índice de hidrógeno (Jenkins *et al.*, 1998). La relación O/C define el grado de reactividad que tendrá la biomasa durante su combustión, mientras que la relación H/C ayuda a elegir correctamente un combustible desde el punto de vista energético. Es importante considerar la relación O/C, ya que un mayor contenido de O en la biomasa permitirá una combustión más eficiente con menor consumo de aire para la combustión. Por su parte, relación H/C resulta de relevancia para la generación de energía y reducción de las emisiones de CO₂. Una mayor cantidad de C dará lugar a un mayor PCI y por lo tanto una mayor cantidad de CO₂ (Rojas González y Barraza Burgos, 2012).

En los diagramas ternarios puede representarse el proceso de conversión más conveniente en función de los contenidos de C-H-O obtenidos de un análisis elemental del combustible. Por ejemplo, la carbonización o pirólisis lenta mueve el producto hacia el carbono mediante la formación de residuo carbono sólido. La pirólisis rápida mueve los productos hacia el hidrógeno y los aleja del oxígeno, lo que implica un producto más rico en hidrocarburos. La gasificación con oxígeno mueve el producto gaseoso hacia la esquina del oxígeno, mientras que la gasificación con vapor aleja el proceso de la esquina del carbono. Un proceso de hidrogenación mueve los productos hacia el hidrógeno, provocando la formación de un gas combustible (Basu, 2013).

El objetivo de este estudio fue mostrar los resultados de las características físicas, químicas y energéticas del bagazo y el RAC de caña de azúcar de Tucumán,

Argentina, con especial interés en las determinaciones de las relaciones O/C y H/C y su clasificación por medio de diagramas que ayuden a interpretar rápidamente la calidad combustible, y el proceso termoquímico más adecuado para su aprovechamiento en comparación con otros tipos de combustibles sólidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las biomásas en estudio fueron bagazo de caña de azúcar proveniente de diferentes ingenios tucumanos y RAC, recolectados en campo en las diferentes zonas agroecológicas de Tucumán, Argentina. Se recolectaron 20 muestras por cada biomasa analizada y fueron procesadas y caracterizadas en el Laboratorio de Evaluaciones Energéticas de Biomasa (LEEB), pertenecientes a la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la EEAOC. Todas las determinaciones analíticas se realizaron por duplicado.

Inicialmente las muestras se secaron en estufa a 105°C hasta peso constante y se picaron en un molino marca FRISTCHER, modelo Pulverisette 19, con malla de tamizado de 1 mm. En la Tabla 1 se muestran las técnicas utilizadas y las normas de referencia.

Para el cálculo de PCI en base húmeda (b.h.) se utilizó la Ecuación 1 (Feijóo *et al.*, 2015).

Para la clasificación de las biomásas en estudio como combustibles para calderas, según los índices de oxígeno e hidrógeno, se utilizó primeramente el diagrama de Van Krevelen y luego un diagrama ternario C-H-O. Para la construcción del primer diagrama se determinaron las relaciones molares O/C y H/C para cada una de las biomásas analizadas, siguiendo la metodología de refe-

rencia (Cortés, 2006; Jenkins *et al.*, 1998). Las fracciones molares de los elementos se determinaron tomando las fracciones másicas de C, H, y O, obtenidas del análisis de composición elemental, y se relacionaron con los correspondientes pesos moleculares de los elementos analizados. El diagrama ternario es una herramienta complementaria al diagrama de Van Krevelen, donde las tres esquinas del triángulo representan al carbono, al oxígeno y al hidrógeno puros, es decir, 100% de concentración. Los puntos dentro del triángulo representan una mezcla ternaria de estos tres elementos. El lado opuesto a un vértice del triángulo representa una concentración 0% de ese componente. De este modo, la composición elemental de un combustible queda definida por un punto sobre el área del triángulo. Una biomasa combustible está más cerca de los rincones del hidrógeno y del oxígeno, lo que significa que la biomasa contiene más hidrógeno y más oxígeno que el carbón mineral (Basu, 2013).

La Figura 1 muestra la secuencia seguida para el análisis y determinación de los parámetros encontrados en el presente estudio, según lo indicado en Tabla 1.

Ecuación 1

$$PCI = PCS \times (1 - w) - 2442 \times [9 \times H \times (1 - CZ) \times (1 - w) + w] \quad Ec.(1)$$

Dónde:

PCI: poder calorífico inferior en base húmeda [kJ/kg]

PCS: poder calorífico superior [kJ/kg]

H: contenido de hidrógeno, en composición centesimal.

w: contenido de humedad, en composición centesimal.

CZ: contenido de cenizas en composición centesimal.

Tabla 1. Parámetros analizados en las muestras de biomásas ensayadas en el estudio. Elaboración propia.

Análisis	Equipo	Procedimiento utilizado
Análisis inmediato	Humedad (w)	Estufa ORL, con circulación de aire forzada ASTM D5142-02 modificada
	Cenizas (CZ), Sólidos volátiles (SV) Carbono fijo (CF) en base seca (b.s.)	Analizador termogravimétrico automatizado y con atmósfera controlada, marca LECO, modelo TGA701. ASTM D5142-02 modificada
Análisis energético	Poder calorífico superior (PCS) en b.s.	Bomba Calorimétrica automatizada, marca IKA, modelo C500. ASTM D240-00 y ASTM D2015-96.
	Poder calorífico inferior (PCI) en base húmeda (b.h.)	Cálculo mediante W, CZ, PCS y contenido de hidrógeno. Feijóo <i>et al.</i> , 2015
Análisis elemental	Cloro (Cl) en b.s.	Bomba Calorimétrica automatizada, marca IKA, modelo C500. ASTM E 776-87 modificada.
	Carbono (C), Nitrógeno (N), Hidrógeno (H), Oxígeno (O) y Azufre (S) en b.s.	Analizador de composición elemental, marca LECO, modelo CHONS 628 ASTM D 3176-15 y ASTM D5373-02
Análisis de temperatura de fusibilidad de ceniza	Temperaturas de inicio de deformación (DT), ablandamiento (ST), semiesfera (HT) y de fluidización (FT). Analizador de fusibilidad de cenizas con atmósferas controladas (oxidantes y reductoras), marca LECO, modelo AF 700. ASTM D1857-94	

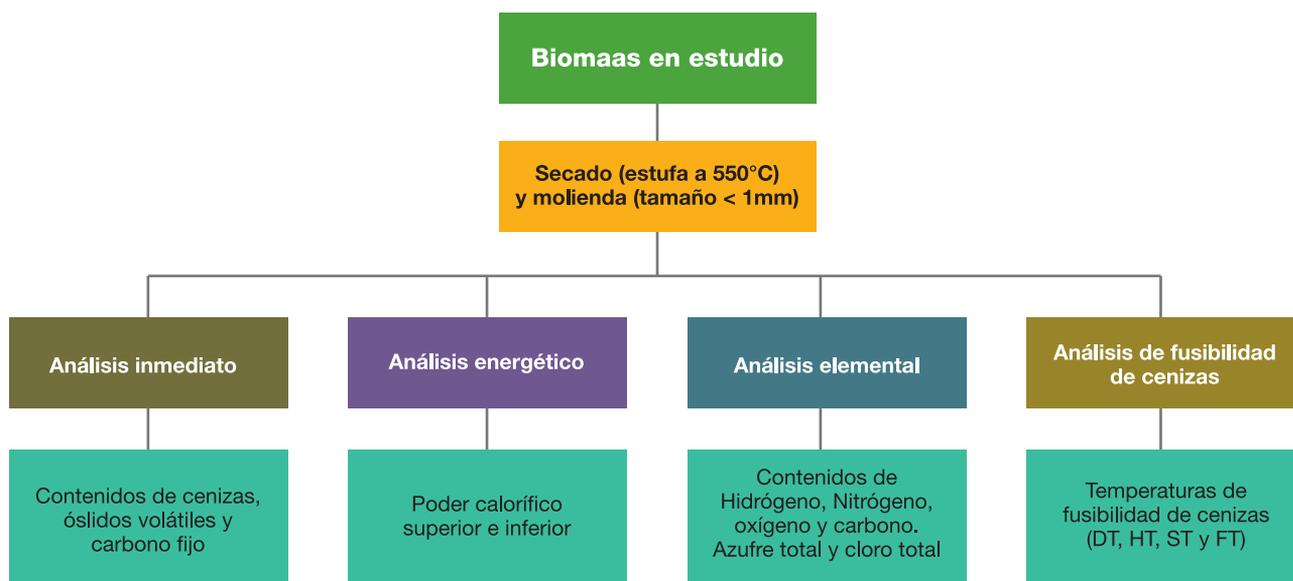


Figura 1. Diagrama de secuencia de los parámetros analizados en el presente estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 informa los resultados promedio de los análisis inmediatos, elementales, energéticos y los índices de oxígeno e hidrógeno elemental para las muestras de bagazo y RAC de Tucumán. Además, en la Tabla se muestra una comparación de los resultados de las biomasa en estudio respecto de los otros valores encontrados en bibliografía. Se puede observar que de las biomasa analizadas, la que presentó mayor contenido promedio de humedad (w) fue el bagazo (51,79%), seguido por el RAC (15,78%). Cabe destacar que la humedad de un combustible es importante no tan solo desde el punto de vista logístico para aquellas biomasa que deban ser transportadas a granel, sino también debido a la influencia negativa que genera en el proceso de combustión de las mismas. El RAC presentó mayores contenidos de CZ (promedio 12,36%) en relación al bagazo (promedio 4,93%). Un elevado contenido de cenizas influye en la calidad de la combustión (menor PCS) y en la cantidad de paradas de la caldera para su limpieza, ya que habrá una mayor proporción de material inorgánico que habrá que retirar del hogar. Con respecto al contenido de sólidos volátiles (SV), el bagazo presentó la mayor cantidad promedio del mismo (77,93%), mientras que en el RAC fue 9,35% menor (70,64%). En relación al carbono fijo (CF), el bagazo presentó un valor medio de 17,14%, muy cercano al obtenido en RAC (17,00%). En cuanto a los análisis energéticos, el mayor PCS se obtuvo para el bagazo (17.893 kJ/kg) y un menor valor para el RAC (16.668 kJ/kg), debido principalmente al mayor contenido de material inerte (cenizas) que acompaña a esta última biomasa durante el proceso de combustión; esto disminuye la cantidad de energía desarrollada por unidad de masa. El mayor PCI fue obtenido para el RAC (12.726 kJ/kg), seguido del bagazo (6706 kJ/kg). Esto se debe principalmente al elevado contenido de humedad que acompaña a este último, que provoca una disminución de la cantidad de energía química disponible. Los resultados consignados coinciden con los observados en bibliografía y valores encontrados en la región en

zafras anteriores (Bizzo *et al.*, 2014; Cruz *et al.*, 2016; Zamora Rueda *et al.*, 2019).

Los resultados del análisis de la composición elemental de las biomasa arrojaron que el bagazo presentó menores valores del contenido de carbono, lo cual desde el punto de vista ambiental se traduce en menores emisiones de CO₂ a la atmósfera. Asimismo, el bagazo presentó menores contenidos de cloro y azufre, por lo que los gases producto de la combustión tendrían contenidos más bajos de cloruro de hidrógeno y de óxido de azufre. Estos resultados son semejantes a los informados por Bizzo *et al.* (2014), Cruz *et al.* (2016) y Zamora *et al.* (2019). En cuanto a los resultados de las relaciones molares para las biomasa estudiadas, los valores para bagazo fueron de O/C = 0,89 y H/C = 1,83. Para RAC fueron de O/C = 0,86 y H = 1,58. Estos resultados coinciden con los observados por Guachi Cabrera (2019), que indicó valores promedio para bagazo de O/C = 0,90 y H/C = 1,90. Asimismo, Kumar *et al.* (2019) informaron valores promedio de O/C = 0,75 y H/C = 1,60 para igual biomasa. No se encontraron relaciones molares para RAC. Además, Kumar *et al.* (2019) estudiaron la relación H/C para diferentes tipos de biomasa para ser aprovechada en procesos de pirólisis. Estos autores indicaron que el bagazo de caña de azúcar se encuentra en una zona apropiada para el desarrollo de este proceso termoquímico, ya que posee valores adecuados de H/C y cuenta con una estructura lignocelulósica conveniente. Los resultados obtenidos de SV (ver Tabla 2) son representativos al tipo de biomasa lignocelulósicas evaluadas, donde poseen en promedio alrededor de 70% de SV, resultando aptas para los procesos termoquímicos. Es importante destacar que la cantidad de materia volatilizada durante un proceso termoquímico está relacionada con el contenido elemental de C, H y O; cuanto mayor sea la relación H/C, mayor será el contenido de volátiles; y éste disminuirá cuando mayor sea la relación O/C. Asimismo, la cantidad de volátiles (SV) influye en la degradación térmica del combustible y en el desempeño de un determinado proceso termoquímico, ya sea combustión, gasificación y/o pirólisis (Guachi Cabrera, 2019; Kumar *et al.*, 2019).

Tabla 2. Resultados del análisis inmediato, elemental, energéticos y relaciones molares para bagazo y RAC de Tucumán y comparados con otros autores. Elaboración propia.

Análisis inmediato	Bagazo			RAC		
	Este trabajo	Bizzo <i>et al.</i> (2014)	Zamora <i>et al.</i> (2019)	Este trabajo	Bizzo <i>et al.</i> (2014)	Zamora <i>et al.</i> (2019)
w (% base húmeda)	51,79		52,54	15,78	7,50	16,20
CZ(% base seca)	4,93	5,13	5,77	12,36	82,25	12,51
SV (% base seca)	77,93	80,81	77,21	70,64	10,10	70,81
CF (% base seca)	17,14	19,18	16,65	17,00		16,69
Análisis elemental (% base seca)						
C	42,74	42,61	43,90	43,46	42,50	43,96
H	6,51	5,92	5,80	5,72	6,02	5,41
N	0,19	0,63	0,40	0,69	0,60	0,10
O	50,49	50,90	41,20	49,92	50,20	50,46
S	0,19	0,24	0,16	0,25	0,24	0,07
Cl	0,09	0,10	0,14	0,18	0,44	-
Análisis energético (kJ/kg)						
PCS (base seca)	17.893	1.772	17.584	16.668	17.100	16.419
PCI (base húmeda)	6.706		6.538	12.726	-	-
Índice de hidrógeno y oxígeno		Guachi Cabrera, 2019	Kumar <i>et al.</i> (2019)			
H/C	1,83	1,90	1,60	1,58	-	-
O/C	0,89	0,90	0,75	0,86	-	-

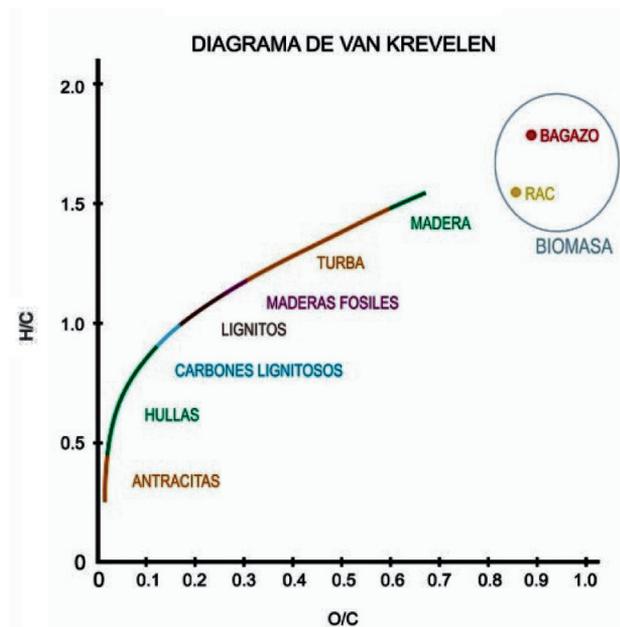
La Figura 2 muestra en el diagrama de Van Krevelen una comparación entre diferentes combustibles sólidos y el grupo de biomazas en estudio. En el diagrama se puede observar cómo los combustibles evaluados quedan representados en una región típica para los combustibles lignocelulósicos, los cuales poseen elevadas relaciones de O/C y H/C. Las biomazas estudiadas se ubican en la parte superior del diagrama, presentando mayores relaciones O/C y H/C, por arriba de la madera (0,89 y 1,83 vs. 0,65 y 1,50, respectivamente). Desde el punto de vista ambiental, una menor cantidad de C da lugar a menores emisiones de CO₂, por lo que la combustión del bagazo tendría menor impacto en el medioambiente en comparación con el RAC. Asimismo, la presencia de un mayor contenido de H en la biomasa implica una mayor formación de agua durante la combustión, por lo que a menores valores de H, mayor será el PCI del combustible. Este hecho se refleja en los resultados mostrados en Tabla 2.

Con respecto al índice de oxígeno O/C, se encontró en promedio una mayor relación para el bagazo (0,89) respecto al RAC (0,86). Es importante indicar que si bien un mayor índice de oxígeno implicaría un menor PCS, debido al menor contenido de C, la mayor concentración de oxígeno mejora la reactividad del combustible, permitiendo una combustión más eficiente. Esto se vio reflejado en los resultados de PCS obtenidos para el bagazo (17.893 kJ/kg) en comparación con el RAC (16.663 kJ/kg). La mayor reactividad del bagazo se estimó en aproximadamente 3,37% respecto al RAC. Estos resultados verifican que las biomazas ensayadas son aptas para ser utilizadas en procesos de conversión termoquímica como la gasificación y la pirólisis. Los resultados coinciden con los observados por Guachi Cabrera (2019) y Kumar *et al.* (2019) para biomazas del tipo lignocelulósicas.

En la Figura 3 muestra el diagrama ternario C, H, O para las biomazas en estudio. Las mismas se encuentran dentro del rango propuesto por Basu (2013) y Salda-

riaga Elorza (2015). Las biomazas de estudio representadas en el diagrama ternario se reflejan casi superpuestas debido a que los valores entre ellas son semejantes: para el bagazo, 42,74% C; 6,51% H y 50,49% O; mientras que para RAC, 43,46% C; 5,72% H y 49,92% O.

Basándonos en las composiciones elementales encontradas para el bagazo y RAC de nuestra región y considerando las propiedades generales de los procesos de combustión, gasificación y pirólisis, pueden establecerse algunas inferencias para aprovechar estos combustibles. La combustión suele ser más adecuada para combustibles


Figura 2. Comparación en un diagrama de Van Krevelen entre las biomazas en estudio en relación a otros combustibles sólidos. Elaboración propia.

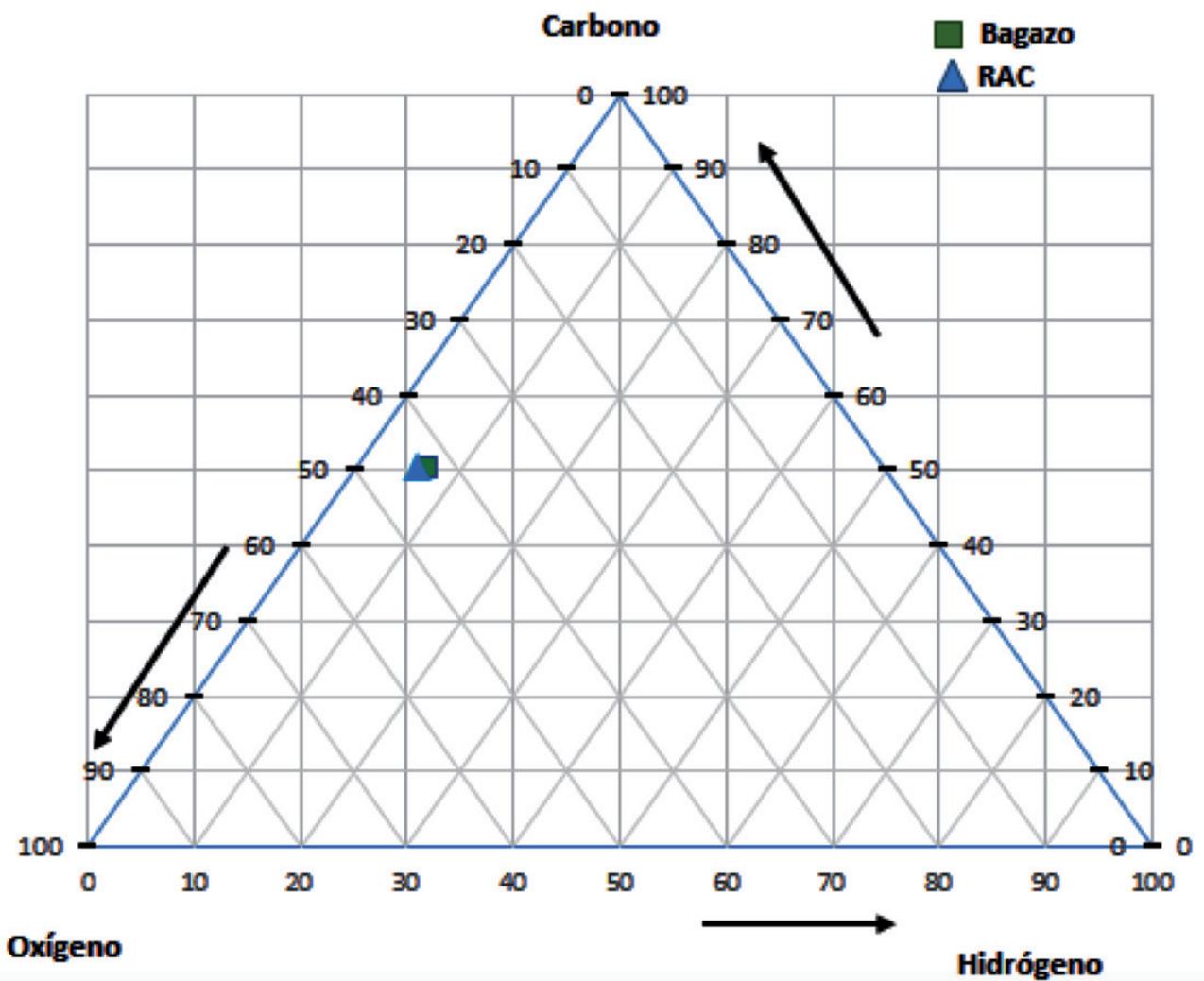


Figura 3. Diagrama ternario C-H-O de biomasa en estudio. Elaboración propia.

que contienen principalmente carbono e hidrógeno y a la vez tienen un bajo contenido de oxígeno. Dado que tanto el bagazo como el RAC tienen contenidos relativamente altos de oxígeno en comparación con el carbono e hidrógeno, la combustión podría no ser la opción más eficiente para aprovechar completamente estos combustibles. Sin embargo, la combustión directa aún puede ser útil para la generación de calor en aplicaciones donde se requiera una fuente de calor directa, como calefacción o procesos industriales. Las biomásas de estudio se encuentran relativamente más cercanas al vértice correspondiente al carbono, por lo que un proceso de pirólisis lenta sería un camino conveniente para la producción de biocarbono.

La gasificación y la pirólisis son opciones viables para aprovechar el bagazo y el RAC como combustibles. La gasificación puede convertir la biomasa en una mezcla de gases sintéticos útiles debido al contenido de carbono y oxígeno en ambos combustibles, lo que los hace adecuados para la generación de energía y la producción de combustibles líquidos sintéticos. Por otro lado, la pirólisis, que descompone la biomasa en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada de este, puede producir una variedad de productos como bio-aceites y biochar, también

gracias al contenido significativo de carbono.

La Tabla 3 muestra los resultados de las temperaturas de fusibilidad de las cenizas de bagazo y RAC analizadas. Además, se exhibe una comparación de los resultados respecto a valores informados para zafras anteriores. El bagazo presentó los mayores valores de DT y HT (1120,46°C y 1286,45°C, respectivamente); en relación al RAC (1096,20°C y 1224,55°C, respectivamente). Las temperaturas FT encontradas durante los ensayos resultaron mayores a 1500,00°C, siendo esta última la máxima temperatura de trabajo configurada en el equipo analizador por seguridad del mismo. Para evitar los problemas asociados a la fusión de los depósitos formados en las distintas superficies de una caldera de vapor, se elige como temperatura límite a DT, a partir de la cual se producen fenómenos de ensuciamiento y escoriificación (Nogués *et al.*, 2010). Los resultados de fusibilidad de cenizas obtenidos para bagazo y RAC resultaron óptimos para el uso de estos como combustible en calderas de vapor bagaceras. Puede observarse que las temperaturas características se encuentran en el mismo orden de magnitud que las observadas anteriormente por los autores (Golato *et al.*, 2021; Peralta *et al.*, 2014)

Tabla 3. Resultados de temperatura de fusibilidad de cenizas, en atmósfera reductora, para bagazo y RAC de Tucumán, comparadas con zafras anteriores. Elaboración propia.

Análisis de temperatura de fusibilidad de cenizas (°C)	Bagazo			RAC		
	Este trabajo	Peralta <i>et al.</i> (2014)	Golato <i>et al.</i> (2021)	Este trabajo	Peralta <i>et al.</i> (2014)	Golato <i>et al.</i> (2021)
Temperatura DT	1.120,46	1.081,10	1.081,16	1.096,20	1.054,40	1.054,60
Temperatura ST	1.286,45	1.236,60	1.236,64	1.224,55	1.263,00	1.263,22
Temperatura HT	1.395,35	1.385,40	1.385,45	1.361,00	1.374,40	1.375,22
Temperatura FT	>1.500,00	>1.500,00	1.455,88	>1.500,00	>1.500,00	1.436,70

CONCLUSIONES

Los resultados determinados para el bagazo y RAC de caña de azúcar de este estudio se encontraron dentro de los valores normales para este tipo de biomasa. Los resultados de los análisis fisicoquímicos y energéticos fueron representativos de las biomásas combustibles analizadas para las condiciones de las muestras al momento de los ensayos. Pudo observarse que el bagazo de caña de azúcar presentó un contenido de humedad de 51,96%, el cual influyó negativamente en el PCI del combustible (6706 [kJ/kg]), resultando una disminución de un 62,52% en relación al PCS de la biomasa (17.893 kJ/kg). Esto indicaría la necesidad de realizar un secado previo del material para un mejor aprovechamiento energético.

La clasificación obtenida por medio del diagrama de Van Krevelen coincide con lo observado por otros autores para biomásas lignocelulósicas. Se encontraron relaciones promedio en bagazo de 0,89 y 1,83 para O/C y H/C, respectivamente; en RAC las relaciones fueron de 1,58 y 0,86. Estos resultados indicarían que el bagazo, al tener una mayor relación H/C respecto al RAC (1,83), ofrecería un mejor comportamiento energético y una mayor contribución a las emisiones de CO₂.

El bagazo y el RAC tienen composiciones elementales que sugieren diferentes enfoques para ser aprovechados como combustibles. La pirólisis lenta podría ser más conveniente tanto para el bagazo como para el RAC debido a su mayor cercanía al vértice del carbono. Dado que ambos tienen un contenido relativamente alto de oxígeno, la combustión directa puede no ser la opción más eficiente pero aún útil para la generación de calor. La gasificación parece ser una opción adecuada para ambos combustibles, ya que pueden convertirse en una mezcla de gases sintéticos útiles. La pirólisis también es viable, porque podría producir bio-aceites, biochar y otros productos útiles debido a la proporción significativa de carbono en ambos combustibles.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Agencia Internacional de Energía (AIE). 2018.** Informe balance energético- Estadísticas. 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD> (consultado 1 marzo 2022)
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 1987.** Standard Test Method for Forms of Chlorine in Refuse-Derived Fuel E776-87, United States.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 1994.** Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash, D1857-94, United States.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 1996.** Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by Adiabatic Bomb Calorimeter D2015-96, United States.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2000.** Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter D240-00, United States.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2002.** Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures D 5142-02^a, United States.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2015.** Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke D3176-15, United States.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2002.** Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke D5373-02, United States.
- Basu, P. 2013.** Biomass, Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Academic Press of Elsevier. Oxford, UK, pp. 38-41.
- Bizzo, W. A.; P.C. Lenço; D.J. Carvalho and J. P. Soto Veiga. 2014.** The generation of residual biomass during the production of bioethanol from sugarcane, its characterization and its use in energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29: 589-603. [En línea] DOI 10.1016/j.rser.2013.08.056. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113005960> (consultado 1 marzo 2022)
- Casen, S.; E. Romero; F. Leggio; A. Torres Bugeau; D. Perez; V. Paredes y E. Feijóo. 2015.** Manejo de los residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar: disponibilidad potencial y alternativa de enfiado. *Rev. Avance Agroindustrial* 36 (4): 20-26.
- 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 6 de abril 2022)
- Cruz, C.; G. del H. Zamora Rueda; M. Golato y D. Paz. 2016.** Experiencias entre laboratorios caracterización de biomásas regionales. Argentina (Tucumán) y Brasil (Itajubá). *Rev. Avance Agroindustrial* 37 (4): 34-39.

- Digonzelli, P. A.; E. R. Romero y J. Scandaliaris. 2015.** Guía Técnica del Cañero. 1 ed. – Tucumán, Argentina: Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, 2015. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán- Argentina, pp. 21-31.
- EEAOC. 2019.** Informe estimación para la zafra 2019. Sensores y Remotos y SIG. Estimación de superficie cosechable y producción de materia prima y azúcar para la zafra 2019. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán- Argentina. [En línea]. Disponible en: <http://www.eeaoc.org.ar/upload/publicaciones/archivos/964/20190522171148000000.pdf> (consultado 13 de abril 2022)
- 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. Agríc. Tucumán* 92 (2): 23-32.
- Golato, M. A.; G. Zamora Rueda; C. Gutiérrez; M. G. Mistretta; D. Paz y M. Ruiz. 2021.** Características de la fusibilidad de cenizas de bagazo y de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán - Argentina. *Rev. Ind. Agríc. Tucumán* 98 (2): 21-27.
- Guachi Cabrera, P. E. 2019.** Obtención de carbón mediante carbonización hidrotermal utilizando bagazo de caña. Trabajo de Titulación para la obtención del título de Ingeniera Química inédita. Universidad Central de Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Quito- Ecuador. [En línea]. Disponible en: <http://200.12.169.19/bitstream/25000/17962/1/T-UC-0017-IQU-031.pdf> (consultado 4 de mayo 2022)
- Jenkins, B. M.; L. L. Baxter; T. R. Miles Jr. 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 4 de mayo 2022)
- Kumar, M.; S. N. Upadhyay and P. K. Mishra. 2019.** A comparative study of thermochemical characteristics of lignocellulosic biomasses. *Bioresource Technology Reports* (8): 100186.
- 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.
- Peralta, L.; G. del H. Zamora Rueda; G. Mistretta; H. Zalazar; M. V. Bravo; E.A. Feijóo; M. Golato, D. Paz y G. Cárdenas. 2014.** Determinación del punto de fusión de cenizas de bagazo y RAC de Tucumán. En: XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES) y la "VI Conferencia Regional Latinoamericana de la ISES", Oberá- Misiones- Argentina, pp. 63-69.
- 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 4 de mayo 2022)
- 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 10 enero 2024).
- Van Krevelen, D. W. 1950.** Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal. *Fuel* (29): 269-84.
- Zamora Rueda, G. del H.; G. Mistretta; C. Gutiérrez; M. Golato; D. Paz and G. J. Cárdenas. 2019.** Energy characterization of sugarcane bagasse in Tucumán, Argentina. En: XXX ISSCT Congress, Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT), Tucumán- Argentina, pp.1000-1004.