



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 100 (1):
47-53; 2023



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Caracterización energética de bagazo de caña de azúcar en Tucumán, Argentina

Gimena del Huerto Zamora Rueda*, Marina G. Mistretta*, Cynthia E. Gutierrez*, Marcos A. Golato*, Dora Paz* y Marcelo Ruiz*

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. Email: mediciones@eeaoc.org.ar

RESUMEN

Uno de los subproductos más importantes de la industria sucro-alcoholera de Tucumán es el bagazo de caña de azúcar, que se utiliza como el principal combustible para la generación de energía térmica y eléctrica en los procesos de fabricación de azúcar y alcohol. El uso como combustible en calderas de vapor requiere una continua caracterización energética, debido principalmente a la variabilidad de las condiciones climáticas que afectan al suelo y al cultivo, como así también a la variedad de la caña y al sistema de cosecha de esta. El objetivo de este trabajo es caracterizar energéticamente las muestras de bagazo de variedad de caña de azúcar LCP-85-384, recolectada durante la zafra 2017 y el inicio de la zafra 2018, provenientes de ingenios azucareros tucumanos. Las metodologías siguieron las normas ASTM D 5142-02 (termogravimétricas), ASTM D 2015-96 (poder calorífico superior), ASTM E 776-87 y ASTM D 3177-02 (cloro y azufre, respectivamente). Los resultados promedio fueron: humedad 52,54% con coeficiente de variación (C.V.) de 5,30%; cenizas 5,77% en base seca (b.s.) con C.V. de 2,57%; sólidos volátiles 77,21% (b.s.) con C.V. de 2,25%; carbono fijo 16,65% (b.s.) con C.V. de 5,00%; poder calorífico superior 17.584 kJ/kg (b.s.) con C.V. de 2,77%; cloro 0,14% (b.s.) con C.V. de 2,10%; y azufre 0,16% (b.s.) con C.V. de 2,47%. Estos parámetros son útiles para el cálculo y rediseño de sistemas de generación de vapor.

Palabras clave: bagazo de caña de azúcar, biomasa, biocombustible, energía, industria azucarera.

ABSTRACT

Energy characterization of sugar cane bagasse in Tucumán, Argentina

The most important subproduct of the sugar-alcohol industry of Tucumán is sugarcane bagasse, which is used as the main fuel for the generation of thermal and electrical energy in the processes of sugar and alcohol manufacturing. Its use as fuel in steam boilers requires its continue energy characterization, mainly due to the variability of the climatic conditions that affect the soil and crops, as well as the variety of cane and harvesting system. The aim of this study is to characterize the energy content of the bagasse samples, of variety of sugarcane LCP85-384, collected from sugar mills in Tucumán during the 2017 and at the beginning of the 2018 harvest. The methodologies used follow the standards: ASTM D 5142-02 (thermogravimetric), ASTM D 2015-96 (higher calorific value), ASTM E 776-87 and ASTM D 3177-02 (chlorine and sulfur, respectively). The average results obtained were: a moisture of 52.54% with coefficient of variation (CV) of 5.30%; ashes 5.77% on dry basis (d.b.) with CV of 2.57%; volatile solids 77.21% (d.b.) with CV of 2.25%; fixed carbon 16.65% (d.b.) with CV of 5.00%; higher calorific value 17,584 kJ / kg (d.b.) with CV of 2.77%; chlorine 0.14% (d.b.) with CV of 2.10% and sulfur 0.16% (d.b.) with CV of 2.47%. These parameters are useful for the calculation and redesigning the steam generator systems.

Key words: sugarcane bagasse, biomass, biofuel, energy, sugar industry.

Corresponde a la versión completa de un trabajo técnico presentado en la International Society of Sugar Cane Technologists 2019.

Fecha de recepción:
01/12/2021

Fecha de aceptación:
12/12/2022

INTRODUCCION

La conversión de la biomasa sólida en energía puede realizarse mediante procesos termoquímicos como la gasificación, pirólisis y combustión (Nogués *et al.*, 2010). La producción de energía a partir de biomasa tiene un alto valor estratégico y económico, ya que la provincia de Tucumán presenta un importante polo agroindustrial y concentra la mayor producción de azúcar y bioetanol de caña de azúcar de la Argentina (CAA, 2021).

El creciente interés por la biomasa ha generado una diversificación de la matriz energética mundial que ha llevado a tener, en 2019, el 14% de la energía consumida proveniente de fuentes renovables, según cifras informadas por la Agencia Internacional de Energía (AIE, 2019); mientras que a nivel nacional estas representaron el 12% para igual año, según Balance Energético Nacional (BEN, 2019). Estos incrementos fueron promovidos por políticas e incentivos para estimular el uso de la energía proveniente de fuentes no fósiles, los cuales se han convertido en prioridad si se tiene en cuenta no solo la dependencia de los combustibles fósiles en la matriz energética, sino también las consecuencias ambientales, sociales y económicas derivadas de utilizar estos últimos. Esta situación deriva en una paulatina extensión de la tecnología de valorización de la biomasa. Además, la industria ha creado una importante demanda de conocimientos sobre el modo de estimación del potencial de la biomasa disponible y las posibilidades de utilización de las distintas fuentes de biomasa (FAO, 2020).

Cabe destacar la importancia de la utilización de biomasa para su aprovechamiento energético, ya sea para producir calor, electricidad o combustible para transporte. En este sentido, Argentina cuenta con provincias con fuerte actividad forestal, agrícola e industrial, con una oferta directa de cultivos que suman 8.475.731 toneladas por año de biomasa, incluyendo forestaciones (38%), caña de azúcar (23%), frutos de carozo (3%) y cítricos (3%) (FAO, 2020). Para la oferta indirecta, casi el 80% proviene de ingenios azucareros y aserraderos. Sin embargo, gran parte de la biomasa es utilizada en los mismos establecimientos para generar energía térmica en las calderas de vapor y en la fabricación de papel. Otros beneficios de la biomasa son el uso de leña a nivel doméstico para la calefacción de hogares y la utilización de gas metano capturado de los rellenos sanitarios para la generación de energía eléctrica y biogás (Energía de la biomasa, 2008).

Uno de los supproductos más importantes de la

industria sucroalcoholera es el bagazo generado durante la molienda de la caña de azúcar para la obtención del jugo de caña. Es una biomasa ligno-celulósica constituida por fibra, sólidos insolubles, sólidos solubles y agua, y representa el 30% de los tallos verdes molidos provenientes de la cosecha de la caña de azúcar. El bagazo se utiliza en los generadores de vapor como materia prima energética, el cual es consumido para producir el vapor requerido por el proceso. Asimismo, utilizando la tecnología de cogeneración y el equipamiento correspondiente de manera eficiente, es posible producir excedentes de energía eléctrica para vender a la red de interconexión eléctrica nacional (Cárdenas, 2018).

El bagazo, además, en el mundo se ha convertido no solo en una importante fuente de energía para el proceso de cogeneración que comprende la producción simultánea de energía térmica útil, mecánica y eléctrica, sino también en materia prima para la producción de combustibles de segunda generación y de bioproductos (Khatrri and Pandit, 2022).

En Tucumán, donde se encuentran operativos 15 ingenios azucareros, todo el bagazo producido en esta industria es destinado a la producción de energía térmica y electricidad para consumo interno, y un porcentaje bajo para la venta a la red.

Durante la zafra 2017/2018 se produjeron en Tucumán 14.405.315 [t] de caña de azúcar, obteniéndose 4.321.594,5 [t] de bagazo, de las cuales 4.235.162,61 [t] estarían disponibles para ser aprovechadas energéticamente (Soria *et al.*, 2019).

Para utilizar la biomasa en procesos termoquímicos es necesario conocer algunos parámetros físicos, químicos y energéticos que definen el perfil de un combustible (Nogués *et al.*, 2010). La Tabla 1 describe los principales parámetros que deben tenerse en cuenta para que una biomasa sea considerada como posible combustible.

En Tucumán, la variedad de caña de azúcar más utilizada es la LCP 85-384, que presenta un elevado rendimiento cultural: alrededor de 94,3%, con una excelente capacidad de macollaje y buena longevidad de la cepa. Exhibe, además, un excelente comportamiento de acumulación de sacarosa y una buena resistencia de su jugo al deterioro por heladas. Tiene un porcentaje de fibra que oscila entre un 11% a 12%, por lo que goza de muy buena aceptación entre los productores cañeros tucumanos (Cuenya *et al.*, 2013). Esta variedad representó aproximadamente el 77% de la superficie implantada en las campañas 2016 y 2017 (Ostengo *et al.*, 2018).

Tabla 1. Parámetros físicos, químicos y energéticos de una biomasa combustible. Adaptado (Nogués *et al.*, 2010).

| | | |
|-------------------------------|---|--|
| Parámetros físicos | Densidad aparente | Influyen en la selección y el diseño de los equipos de manejo del material y la necesidad de pre-tratamiento. |
| | Densidad específica, tamaño y forma de la partícula | |
| | Temperatura de fusión de cenizas | |
| Parámetros químicos | Análisis elemental | Determinan el comportamiento de la biomasa durante los procesos de transformación químicas y termoquímica. |
| | Análisis inmediato | |
| | Análisis de metales en cenizas | |
| Parámetros energéticos | Poder calorífico (PCS) | Determinan la cantidad de energía aprovechable por unidad de materia (PCS) y por grado de aumento de temperatura (Cp). |
| | Calor específico (Cp) | |

El objetivo del presente trabajo es actualizar y ampliar la información de los resultados físicos, químicos y energéticos del bagazo de caña de azúcar proveniente de ingenios tucumanos para la variedad LCP 85-384 en la zafra 2018.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron, por duplicado, 40 muestras de bagazo de las variedades LCP85-384, provenientes de diferentes ingenios azucareros de Tucumán, para la zafra 2018. Se evaluaron los parámetros físicos, químicos y energéticos que se detallan en la Tabla 2, donde también se indican los equipos y procedimientos utilizados. El estudio fue realizado en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI), de la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEOC), de la provincia de Tucumán.

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

Ecuación 1

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

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.

En la determinación del análisis de metales en las cenizas se efectuó una digestión de las mismas por vía seca (cenizas carbonatadas) para el análisis de los contenidos de calcio (Ca), hierro (Fe), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na) (Feng *et al.*, 1999). Las determinaciones de los contenidos de aluminio (Al), silicio (Si) y titanio (Ti) se realizaron por vía húmeda mediante digestión ácida, según Mendoza *et al.* (2014). Los valores informados se expresaron en porcentajes de los correspondientes óxidos mayoritarios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 ofrece los resultados del análisis termo gravimétrico realizado en muestras de bagazo. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje. Se indican el valor medio, la desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación porcentual (CV [%]). Los valores medios obtenidos fueron: $w = 52,54\% \pm 2,78\%$; $CZ = 5,57\% \pm 0,15\%$; $SV = 77,21\% \pm 1,74\%$ y $CF = 16,65\% \pm 0,83\%$. Estos resultados muestran una mayor variabilidad en las determinaciones de w y CF en relación a las determinaciones de SV y CZ. Los valores promedio indicados se encuentran en igual orden de magnitud que los informados por Bizzo *et al.* (2014), Cruz *et al.* (2016) y Valle *et al.* (2018) para bagazos de caña de azúcar, según se observa en la Tabla 4.

La Tabla 5 sintetiza los resultados hallados para %Cl total, %S total y PCS, expresado en base seca; y PCI expresado en base húmeda, con sus respectivos valores de desviación estándar (DE) y del coeficiente de variación porcentual (CV). Estos resultados coinciden con las investigaciones de numerosos autores (Bizzo *et al.*, 2014; Cruz

Tabla 2. Parámetros analizados en las muestras de bagazo recolectadas en ingenios azucareros tucumanos.

| Análisis | Equipo | Procedimiento utilizado |
|--|--|--------------------------------------|
| Contenido de humedad (w) | Estufa ORL, con circulación de aire forzada. | ASTM D5142-02 modificada |
| Contenido de cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV) y carbono fijo (CF) en base seca (b.s.) | Analizador termogravimétrico automatizado (TGA) y con atmósfera controlada, marca LECO, modelo TGA701. | ASTM D5142-02 modificada |
| Contenido de azufre (S) en b.s. | Bomba Calorimétrica automatizada, marca IKA, modelo C500. | ASTM D3177-02 |
| Contenido de cloro (Cl) en b.s. | Bomba Calorimétrica automatizada, marca IKA, modelo C500. | ASTM E 776-87 modificada |
| Poder calorífico superior (PCS) en b.s. | Bomba Calorimétrica automatizada, marca IKA, modelo C500. | ASTM D240, ASTM D2015-96 y ASTM E711 |
| Poder calorífico inferior (PCI) | Cálculo mediante W, PCS y contenido de hidrógeno. | (Feijóo <i>et al.</i> , 2015) |
| Composición elemental: carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H) y oxígeno (O) en b.s. | Analizador de composición elemental, marca LECO, modelo CHON 628. | ASTM D 3176 |
| Fusibilidad de cenizas: determinación de 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 |
| Análisis de metales en cenizas (Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na, K, S y P). | Espectrómetro de absorción atómica, marca PerkinElmer, modelo AAnalyst 100. | ASTM D 3682-01 modificada |

Tabla 3. Resultados de las determinaciones termo gravimétricas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Elaboración propia.

| Bagazo | n | Valor medio ± DE | CV [%] |
|-------------|----|------------------|--------|
| W [%] | 40 | 52,54 ± 2,78 | 5,30 |
| CZ [%] b.s. | 40 | 5,77 ± 0,15 | 2,57 |
| SV [%] b.s. | 40 | 77,21 ± 1,74 | 2,25 |
| CF [%] b.s. | 40 | 16,65 ± 0,83 | 5,00 |

Tabla 4. Comparación de los resultados del TGA para las muestras de bagazo analizadas en relación a las obtenidas por otros autores. Elaboración propia.

| Parámetros | LEMI | Bizzo <i>et al.</i> (2014) | Cruz <i>et al.</i> (2016) | Valle <i>et al.</i> (2018) |
|-------------|-------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| W [%] | 52,54 | - | 50,55 | 53,58 |
| CZ [%] b.s. | 5,77 | 5,13 | 2,49 | 4,22 |
| SV [%] b.s. | 77,21 | 80,81 | 79,56 | 73,77 |
| CF [%] b.s. | 16,65 | 19,18 | 17,95 | 22,01 |

et al., 2016; Gutierrez *et al.*, 2016; Mistretta *et al.*, 2019; Quinteros Vaca, 2019; Zamora, 2020; Golato, 2021) para la biomasa analizada, según se muestra en la Tabla 6.

La Tabla 7 muestra la composición elemental del bagazo de caña de azúcar ensayado. En la Tabla 8 se indican, además, los respectivos valores de DE y CV. Los datos se encuentran expresados en base seca y se hallan en el mismo orden de magnitud que los informados por Bizzo *et al.* (2014), Quinteros Vaca (2019) y Zavala Inga y Petrell Huamán (2020).

En la Tabla 9 se exponen los resultados del análisis de fusibilidad de las cenizas para los bagazos ensayados en atmósfera oxidante (AO) y en atmósfera reductora (AR). Se indican, además, los respectivos valores de DE y CV. Se encontró que la temperatura inicial de deformación (DT) es similar tanto en AR como en AO. La temperatura de ablandamiento (ST) resultó en un 6,57 % mayor en AR; y la temperatura semiesfera (HT), un 3,2% mayor en igual atmósfera. La temperatura de fluidización (FT) resultó superior a la temperatura máxima de referencia indicada en

Tabla 5. Resultados de contenido de %Cl y %S, PCS y PCI de muestras de bagazo de Tucumán. Elaboración propia.

| Bagazo | n | Valor medio ± DE | CV [%] |
|------------------|----|------------------|--------|
| Cl [%] b.s. | 40 | 0,14 ± 0,03 | 2,10 |
| S [%] b.s. | 40 | 0,16 ± 0,04 | 2,47 |
| PCS [kJ/kg] b.s. | 40 | 17,584 ± 486,90 | 2,77 |
| PCI [kJ/kg] b.h. | 40 | 6,538 ± 506,68 | 7,70 |

Tabla 6. Tabla comparativa de los resultados de %Cl, %S y PCS para muestras de bagazo analizadas en LEMI con otros autores. Elaboración propia.

| Parámetros | LEMI | Bizzo <i>et al.</i> (2014) | Cruz <i>et al.</i> (2016) | Zamora (2020) | Golato (2021) | Quinteros Vaca (2019) |
|------------------|-------|----------------------------|---------------------------|---------------|---------------|-----------------------|
| Cl [%] | 0,14 | 0,10 | - | 0,09 | 0,12 | - |
| S [%] b.s. | 0,16 | 0,12 | - | 0,07 | 0,22 | 0,17 |
| PCS [MJ/kg] b.s. | 17,58 | 17,72 | 17,55 | 17,89 | 17,50 | 17,37 |

Tabla 7. Resultados del análisis de composición elemental de bagazo de caña de azúcar de ingenios tucumanos. Elaboración propia.

| Bagazo | n | Valor medio ± DE | CV [%] |
|------------|----|------------------|--------|
| O [%] b.s. | 40 | 41,20 ± 0,09 | 0,21 |
| C [%] b.s. | 40 | 43,90 ± 0,11 | 0,25 |
| H [%] b.s. | 40 | 5,80 ± 0,016 | 0,27 |
| N [%] b.s. | 40 | 0,40 ± 0,001 | 0,25 |

Tabla 8. Tabla comparativa de los resultados del análisis de composición elemental para muestras de bagazo analizadas en LEMI con otros autores. Elaboración propia.

| Parámetros | LEMI | Bizzo <i>et al.</i> (2014) | Quinteros Vaca (2019) | Zavala Inga y Petrell Huamán (2020) |
|------------|-------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| O [%] b.s. | 41,20 | 50,90 | 46,30 | 41,07 |
| C [%] b.s. | 43,90 | 42,61 | 44,39 | 45,13 |
| H [%] b.s. | 5,80 | 5,92 | 8,85 | 6,37 |
| N [%] b.s. | 0,40 | 0,63 | 0,23 | 0,21 |

el equipo analizador utilizado (1455°C). Este hecho podría deberse a la presencia de componentes inorgánicos de características refractarias en la constitución elemental de las cenizas, que posteriormente se oxidan durante la combustión formando sales de elevado punto de fusión, según lo informado por Fernández Llorente and Carrasco García (2005). Estos resultados se encuentran en correspondencia con los observados por Peralta *et al.* (2014) y Golato *et al.* (2021), como se evidencia en la Tabla 10.

La Tabla 11 muestra los resultados promedio del análisis de metales de las cenizas de bagazo. Se indican, además, los respectivos valores de DE y CV. Puede observarse que las cenizas se encuentran constituidas mayormente por 54,25% ± 8,66% de sílice (SiO₂), seguidas por 7,84% ± 2,26% de alúmina (Al₂O₃) y 5,29% ± 7,20% de óxido de potasio (K₂O). Estos podrían inferir ciertas características y comportamientos indeseables en las cenizas, según lo indicado por Golato (2021), sobre todo en este

Tabla 9. Resultados del análisis de fusibilidad de cenizas de bagazo de caña de azúcar de ingenios tucumanos. Elaboración propia.

| Parámetros | Atmósfera reductora (AR) | | Atmósfera oxidante (AO) | |
|------------|--------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | Valor medio ± DE | [%] CV | Valor medio ± DE | [%] CV |
| DT (°C) | 1.062 ± 2,85 | 0,27 | 1.066 ± 2,70 | 0,25 |
| ST (°C) | 1.280 ± 2,80 | 0,22 | 1.201 ± 2,85 | 0,24 |
| HT (°C) | 1.358 ± 3,40 | 0,25 | 1.315 ± 2,90 | 0,22 |
| FT (°C) | >1.455,0 | - | >1.455,0 | - |

Tabla 10. Comparación de la fusibilidad de cenizas de bagazo en relación con otros autores. Elaboración propia.

| Bagazo | Resultados del estudio | | Peralta <i>et al.</i> (2014) | | Golato <i>et al.</i> (2021) | |
|---------|------------------------|--------|------------------------------|--------|-----------------------------|-------|
| | AR | AO | AR | AO | AR | AO |
| DT (°C) | 1.062 | 1.066 | 1.081 | 1.110 | 1.081 | 1.110 |
| ST (°C) | 1.280 | 1.201 | 1.236 | 1.235 | 1.237 | 1.235 |
| HT (°C) | 1.358 | 1.315 | 1.385 | 1.334 | 1.385 | 1.352 |
| FT (°C) | >1.455 | >1.455 | >1.455 | >1.455 | 1.453 | 1.440 |

último componente que facilita la formación de eutécticos de bajo punto de fusión (Golato *et al.*, 2021). También se observa una elevada variabilidad en los parámetros analizados, debido principalmente a los diferentes tipos de suelo (zonas agroecológicas), ajustes de los sistemas de cosecha y tipos de riego, etc. Estos resultados son similares a los informados por Cavalcanti *et al.* (2020) y Serker *et al.* (2021) como se expone en la Tabla 12.

Tabla 11. Resultados de los análisis de metales de cenizas de bagazo de caña de azúcar de ingenios de Tucumán. Elaboración propia.

| ÓXIDO | n | Valor medio \pm DE | CV [%] |
|---------------------------------|----|----------------------|--------|
| %SiO ₂ | 40 | 54,25 \pm 8,66 | 16% |
| %Al ₂ O ₃ | 40 | 7,84 \pm 2,26 | 29% |
| %TiO ₂ | 40 | 0,34 \pm 0,08 | 24% |
| %Fe ₂ O ₃ | 40 | 1,19 \pm 0,79 | 66% |
| %CaO | 40 | 1,60 \pm 1,90 | 56% |
| %MgO | 40 | 0,65 \pm 0,58 | 89% |
| %Na ₂ O | 40 | 0,37 \pm 0,22 | 59% |
| %K ₂ O | 40 | 5,29 \pm 7,20 | 136% |
| %SO ₃ | 40 | 0,45 \pm 0,10 | 22% |
| %P ₂ O ₅ | 40 | 0,01 \pm 0,00 | 0% |

Tabla 12. Comparación de análisis de metales en cenizas de bagazo en relación a otros autores. Elaboración propia.

| ÓXIDO | n | Cavalcanti <i>et al.</i> (2016) | Serker <i>et al.</i> (2021) |
|---------------------------------|----|---------------------------------|-----------------------------|
| %SiO ₂ | 40 | 73,00 | 51,66 |
| %Al ₂ O ₃ | 40 | 5,00 | 9,92 |
| %TiO ₂ | 40 | - | 0,74 |
| %Fe ₂ O ₃ | 40 | 2,50 | 2,32 |
| %CaO | 40 | 6,20 | 2,59 |
| %MgO | 40 | 2,10 | 1,44 |
| %Na ₂ O | 40 | 0,30 | 1,23 |
| %K ₂ O | 40 | 3,90 | 2,10 |
| %SO ₃ | 40 | - | - |
| %P ₂ O ₅ | 40 | 1,00 | 0,90 |

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos y energéticos realizados en muestras de bagazo de caña de azúcar de la variedad LCP85-384, recolectadas en ingenios azucareros de Tucumán-Argentina, fueron: w = 52,54% \pm 2,78%; CZ = 5,77% \pm 0,15%; SV = 77,21% \pm 1,78%; CF = 16,67% \pm 0,83%. Asimismo, los contenidos de cloro y azufre fueron: Cl = 0,14% \pm 0,03% y S = 0,16% \pm 0,04%, respectivamente. El valor de PCS promedio fue 17.584 [kJ/kg] \pm 486,90 [kJ/kg] y PCI de 6.538 [kJ/kg] \pm 506,68 [kJ/kg]. Estos valores se encuentran en igual orden de magnitud que los encontrados en bibliografía especializada para bagazos de caña de azúcar.

Los valores promedio de composición elemental encontrados en las muestras de bagazo analizadas fueron: C = 43,89% \pm 0,11%; H = 5,31% \pm 0,016%; O = 49,42% \pm 0,09%; y N = 0,48% \pm 0,001%. El análisis de fusibilidad de cenizas arrojó valores promedio de: DT = 1.064°C, ST

= 1.240,5°C, HT = 1.336,5°C y FT mayor a 1.455°C considerando AO y AR.

Además, se encontró que los principales componentes mayoritarios de las cenizas de bagazo de nuestra provincia tienen, en promedio, una concentración de: SiO₂ = 54,25% \pm 8,66%; Al₂O₃ = 7,84% \pm 2,26%; TiO₂ = 0,34% \pm 0,08%; Fe₂O₃ = 1,19% \pm 0,79%; CaO = 1,60% \pm 1,90%; MgO = 0,65% \pm 0,58%; Na₂O = 0,37% \pm 0,22%; K₂O = 5,29% \pm 7,20%; SO₃ = 0,45% \pm 0,10% y P₂O₅ = 0,01% \pm 0,00%.

Los resultados de este trabajo muestran las características del bagazo de caña de azúcar utilizado como combustible en los generadores de vapor de nuestra región y pueden servir de referencia para estudios de diseño y modificaciones de calderas bagaceras, aprovechamiento y mejoras energéticas en plantas de producción de vapor. También, para la resolución de balances de masa y energía en estudios de eficiencia energética en los procesos de la fabricación de azúcar de caña.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Farm. Gabriela Juárez, responsable del Laboratorio de Metales de la Sección Química de los Productos Agroindustriales (EEAOC), por su colaboración en el análisis de los contenidos de metales en las cenizas de bagazo en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Agencia Internacional de Energía (AIE). Informe balance energético- Estadísticas. 2019.** [En línea] Disponible en <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD> (consultado 7 enero 2022).
- Balance energético nacional (BEN). 2019.** [En línea] Disponible en <http://www.argentina.gov.ar/economia/energia/hidrocarburos/balances-energeticos> (consultado 7 enero 2022).
- 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.
- Cárdenas, G. J. 2018.** Caminos de la Biomasa (3ª Nota) La mirada de la EEAOC. [En línea]. Disponible en <http://www.eeaoc.org.ar/publicaciones/categoria/14/850/02-AA-39-2.html> (consultado 27 agosto 2019).
- Cavalcanti, E. J. C.; M. Carvalho and D. R. S. da Silva. 2020.** Energy, exergy and exergo environmental analysis of a sugarcane bagasse power cogeneration system. *Energy Conversion and Management* 222: 113-232, ISSN 0196-8904. [En línea] Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420307767> (consultado 10 enero 2022).
- Centro Azucarero Argentino (CAA). 2021.** Proceso productivo. Azúcar: fuente natural de energía de fácil y rápida asimilación. [En línea] Disponible en: <http://>

- centroazucarero.com.ar/azucar/ (consultado 6 enero 2022).
- Cuenya, M. I.; E. R. Chavanne; M. A. Ahmed; C. Díaz Romero; M.B. García Modesto; A. Espinosa; S. Ostengo y D. Costilla. 2013.** Manual del Cañero. 2013. Variedades para el área cañera de Tucumán. 1ª Edición, Tucumán- Argentina. Cap.13. [En línea] Disponible en <http://www.eeaoc.org.ar/upload/publicaciones/archivos/54/20120305133216000000.pdf> (consultado 27 agosto 2019).
- Cruz, M. C.; G. Zamora Rueda; M. A. Golato y D. Paz. 2016.** Caracterización de biomasa regionales: experiencias en interlaboratorio de Tucumán (Argentina) e Itajubá (Brasil). Avance Agroind. 37 (4): 34-39.
- Energía de la biomasa. Secretaría de Energía. 2008.** [En línea]. Disponible en http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf (consultado 6 enero 2022).
- FAO- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2020.** Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina. Colección Documentos Técnicos 19. Buenos Aires. [En línea] Disponible en http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/19-Actualizacion-balance-biomasa.pdf (consultado 6 enero 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. y Agríc. de Tucumán 92 (2): 23-32.
- Fernández Llorente, M. J. and J. E. Carrasco García. 2005.** Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion. Fuel 84: 1893-1900.
- Feng, W.; S. Wu; A. Wharmby and A. Wittmeier. 1999.** Microwave digestion of plant and grain standard reference materials in nitric and hydrofluoric acid for multi-elemental determination by inductively coupled plasma mass spectrometry. J. Anal. At. Spectrom. 14: 939 - 946.
- Golato, M. A., 2021.** Estudio de la variación de la temperatura de fusión de cenizas de calderas de biomasa en función de sus componentes ácidos y básicos. Tesis de Maestría en Ingeniería Bioenergética. Facultad Regional Tucumán. Universidad Tecnológica Nacional. [En línea] Disponible en <https://ria.utn.edu.ar/xmlui/handle/20.500.12272/6079> (consultado 30 de mayo 2022).
- Golato, M.; G. Zamora Rueda, C. Gutierrez, 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. y Agríc. de Tucumán 98 (2): 21-27. ISSN 0370-5404.
- Gutierrez, C.; G. Mistretta; G. Zamora Rueda; F. Peralta; M. A. Golato; M. Coronel; M. Ruiz; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2016.** Contenido de cloro total en residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 93 (2): 19-25. ISSN 0370-5404.
- Khatri, P. and A. B. Pandit. 2022.** Systematic review of life cycle assessments applied to sugarcane bagasse utilization alternatives. Biomass and Bioenergy (158). Matunga, Mumbai, India. [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106365> (consultado 10 enero 2022).
- Mendoza, B.; L. P. M. Parre; L. da Álamo y V. Rodriguez. 2014.** Evaluación de dos métodos de digestión ácida en el análisis de tejido foliar de caña (*Saccharum officinarum* L.). Ciencia y Tecnología 7 (2): 9-20.
- Mistretta, G.; C. Gutierrez; G. Zamora Rueda; F. Peralta; M.A. Golato; D. Paz; G. J. Cárdenas y M. Ruiz. 2019.** Contenido de azufre total del residuo agrícola de la cosecha de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 96 (1): 49-54. ISSN 0370-5404.
- Nogués, F. S; D. García Galindo y A. Rezeau. 2010.** Energías Renovables. Energía de la Biomasa. 1ª Edición, Volumen 1 Prensa Universitaria de Zaragoza, Zaragoza- España.
- Ostengo, S.; M. A. Espinosa; J. V. Díaz; E. R. Chavanne; D. D. Costilla y M. I. Cuenya. 2018.** Relevamiento de la distribución de variedades y de otras tecnologías aplicadas en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2016/2017. Avance Agroind. 39 (4): 22- 27.
- Peralta, F. L.; G. Zamora Rueda; G. Mistretta; H. Zalazar; M. V. Bravo; E. A. Feijóo; M. A. Golato; D. Paz y G. J. 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. VI LatinAmerica Regional Conference. ASADES. Libro de actas 2(08), pp.63-69. ISBN 978-987-29873-0-5.
- Quinteros Vaca, O. 2019.** Caracterización del bagazo de caña de azúcar de variedades del ingenio azucarero Tababuela para bioenergía. Tesis de grado. Universidad Técnica Del Norte Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales Carrera de Ingeniería en Energías Renovables. Ibarra- Ecuador. [En línea] Disponible en <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10478/2/03%20IER%20006%20TRABAJO%20GRADO.pdf> (consultado 10 enero 2022).
- Serker, N. K.; R. U. Hafiz; A. H. M. Ahashanur Rahman and Md. Ashikuzzaman. 2021.** Suitability of using sugarcane bagasse ash as partial replacement of cement in concrete. 5th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE 2020). CUET, Chattogram, Bangladesh. [En línea] Disponible en <http://www.researchgate.net/publication/349832430> (consultado 10 enero 2022).
- Soria, F.; C. Fandos; P. Scandaliaris y J. Carreras Baldres. 2019.** Relevamiento satelital. Principales cultivos de la provincia de Tucumán. Período 2017-2018. [En línea] Disponible en <http://www.eeaoc.org.ar/upload/contenido/pdf/20190320144235000000.pdf> (consultado 27 agosto 2019).
- Valle, N.; A. C. Del Río; G. Grellet; E. David; L. López y H. S. Méndez. 2018.** Caracterización energética de vinaza y bagazo para su empleo en conjunto como combustible. En VI Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (CAIM) 2018. Tucumán- Argentina. ISBN 978-987-46987-0-4. [En línea] Disponible en <https://caim2018.com.ar/gestor/wp-content/>

uploads/2018/10/280.pdf (consultado 10 enero 2022).

WISDOM Tucumán. 2016. Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa Metodología WISDOM Provincia de Tucumán. Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG). [En línea] Disponible en http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/WISDOM_Tucuman_baja.pdf (consultado 27 agosto 2019).

Zavala Inga, C. H. y V. H. Petrell Huamán. 2020. Estimación del potencial energético del gas pobre obtenido de la gasificación del bagazo de caña

de azúcar en el Perú. ECIPeru 17 (1): 40- 52. [En línea] Disponible en <https://revistaeciperu.com/wp-content/uploads/2020/03/reciperu202040Zavala.pdf>(Consultado 10 Enero 2022).

Zamora Rueda, G. del H. 2020. Caracterización de biomasa lignocelulósicos de Tucumán- Argentina por medio de los índices de hidrógeno y oxígeno elemental. Tesis de Maestría en Ingeniería Bioenergética. Facultad Regional Tucumán. Universidad Tecnológica Nacional. [En línea] Disponible en <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/6076> (consultado 30 de mayo 2022).