



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 103 (2):
19-22; 2026



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Trabajo ya publicado

**Trabajo
presentado en
el XXXII ISSCT
Centennial
Congress, 24 al 28
de agosto de 2025,
Cali, Colombia,
traducido al
castellano.**

Fecha de
recepción:
08/06/2026

Fecha de
aceptación:
11/06/2026

Caracterización de las cenizas de gas de las chimeneas de Tucumán, Argentina

Cynthia Gutierrez, H. César Zalazar, Gimena del H. Zamora Rueda, Walter Morales, Marcos A. Golato y Marcelo Ruiz

Sección Ingeniería y Proyectos, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, Tucumán, Argentina. Email: cgutierrez@eeaoc.org.ar

RESUMEN

Durante el proceso de molienda de la caña de azúcar, el bagazo se separa y quema en calderas para generar vapor. La incineración genera un residuo conocido como ceniza de bagazo, que consta de dos fracciones: ceniza de fondo, que se deposita en la base de las calderas, y ceniza volante, que es arrastrada por los gases liberados a la atmósfera a través de la chimenea después de que las partículas se filtran con lavadores de gases. Los sistemas de depuración de gases capturan la ceniza suspendida presente en los gases de combustión mediante atomización continua de agua. Una vez capturada la ceniza, el agua se envía a un sistema de decantación para separarla y reutilizarla en los lavadores de gases. Este trabajo presenta un estudio experimental en el que se analizan los parámetros físicos, químicos y energéticos de la ceniza de los gases recolectados en 26 lavadores instalados en los ingenios azucareros de Tucumán, durante las cosechas de caña de azúcar del 2022 y 2023. Las muestras líquidas se evaporaron hasta sequedad a 105°C en un horno con circulación forzada de aire, obteniéndose así las cenizas. Posteriormente, las cenizas se caracterizaron físicamente mediante análisis de tamaño y densidad de partículas, análisis proximal por termogravimetría, caracterización energética mediante la determinación del poder calorífico superior en base seca y análisis de fusibilidad. Las cenizas recuperadas de los lavadores de gases de los ingenios azucareros de Tucumán presentaron una densidad promedio de 1.664,6 kg/m³ y un tamaño de partícula medio de 0,31 mm. Su composición estuvo dominada por un elevado contenido de cenizas (71,61 %), acompañado por 17,47 % de sólidos volátiles y 10,99 % de carbono fijo. Además, se determinaron contenidos de cloro, azufre y sílice de 0,51 %, 0,64 % y 30,05 %, respectivamente. El poder calorífico superior fue de 6.585 kJ/kg. En relación con su comportamiento térmico, las cenizas mostraron temperaturas de deformación inicial de 1.043 °C en atmósfera oxidante y 1.009 °C en atmósfera reductora, mientras que la temperatura de fluidización superó los 1.500 °C en ambos casos.

Palabras clave: cenizas, lavadores de gases, bagazo, efluentes, residuos

ABSTRACT

Characterization of gas ashes from chimneys of Tucumán, Argentina

During the sugarcane milling process, bagasse is separated and burnt in boilers for steam generation. The incineration generates a residue known as bagasse ash, consisting of two fractions: bottom ash, which settles at the bottom of the boilers, and fly ash, which is carried away by the gases released into the atmosphere through the chimney after the particles are filtered out with gas scrubbers. The gas scrubbing systems that capture the suspended ash present in the combustion gases using continuous water atomization. After the ash is captured, the water is sent to a decantation treatment system to separate the ash and reuse water in the gas scrubbers. This work presents an experimental study in which the physical, chemical and energetic parameters of the ash from gases collected in 26 scrubbers installed in sugar mills in Tucumán, during the 2022 and 2023 sugarcane harvests. The liquid samples were evaporated to dryness at 105°C

in an oven with forced air circulation, from where the ashes were obtained. Subsequently, the ashes were physically characterized by particle size and density analysis, proximal analysis by thermogravimetry, energetic characterization by determining high calorific value on a dry basis and fusibility analysis of the ashes. The ashes recovered from the gas scrubbers of sugar mills in Tucumán had an average density of 1.664,6 kg/m³ and a mean particle size of 0,31 mm. Their composition was mainly characterized by a high ash content (71,61%), together with 17,47% volatile matter and 10,99% fixed carbon. The concentrations of chlorine, sulfur, and silica were 0,51%, 0,64%, and 30,05%, respectively. The higher heating value of the material was 6.585 kJ/kg. Thermal behavior analysis showed initial deformation temperatures of 1.043 °C under oxidizing conditions and 1.009 °C under reducing conditions. In both atmospheres, fluidization temperatures were above 1.500 °C, indicating a high resistance of the ash to melting at elevated temperatures.

Key words: ashes, scrubber, bagasse, effluents, waste.

INTRODUCCIÓN

La ceniza de bagazo de caña de azúcar es un residuo que se forma durante la combustión del bagazo en las calderas de los ingenios azucareros. Se clasifica en ceniza de fondo, que se recoge directamente de las parrillas, y ceniza volante, que es arrastrada por los gases de combustión. Para controlar las emisiones, los ingenios azucareros del noroeste de Argentina utilizan sistemas de lavado de gases por vía húmeda, diseñados para capturar las partículas suspendidas en el aire.

El efluente generado, que contiene cenizas y otros contaminantes, se somete a un proceso de sedimentación antes de su disposición final para prevenir la contaminación ambiental (Agencia Nacional del Agua, 2009; Vizueta Méndez y Martínez Lozano, 2013). Este equipo garantiza una alta eficiencia en la eliminación de partículas, destacándose por su sencillo diseño técnico y su rentabilidad tanto en inversión como en operación (Aso *et al.*, 2009).

Este estudio presenta una evaluación experimental de los parámetros físicos, químicos y energéticos de las cenizas de los gases recogidos en los lavadores instalados en los ingenios azucareros de Tucumán durante las zafas de caña de azúcar de 2022 y 2023.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales de la EEAOC.

Durante la zafa de la caña de azúcar de los años 2022-2023, se recolectaron 100 muestras de agua de lavado de gases en la salida de 26 lavadores instalados antes de las chimeneas de las calderas bagaceras de los ingenios azucareros de Tucumán. Las muestras líquidas se evaporaron hasta sequedad en estufa a 105°C con circulación de aire forzado, donde posteriormente se obtuvieron las cenizas. A estas cenizas se les realizó una caracterización por su tamaño de partícula (Dp) y densidad (D); se analizaron mediante análisis termogravimétrico (TGA); se determinó el poder calorífico superior (PCS); y

se analizó su fusibilidad de cenizas para caracterizar su comportamiento de fusión.

Para el análisis del tamaño de partícula de las cenizas se siguió la norma ASTM C136-01, mientras que la determinación de la densidad se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM D854-02.

En el TGA, se determinaron los sólidos volátiles (SV), el carbono fijo (CF) y las cenizas (CZ) mediante un analizador termogravimétrico LECO (modelo TGA701, LECO Corporation, Estados Unidos), aplicando la metodología modificada ASTM D5142-02. Para la determinación del PCS, se utilizó la metodología descrita en la norma ASTM D2015-96.

El análisis de fusibilidad de las cenizas se realizó utilizando un analizador de la marca LECO (Modelo AF700, LECO Corporation, Estados Unidos), con un sistema de reconocimiento de imágenes, siguiendo la metodología ASTM D1857-03 que identifica cuatro temperaturas: la inicial de deformación (TD), de ablandamiento (TS), de semiesfera (TH) y de fluidización (TF), bajo dos atmósferas diferentes: oxidante (CO₂ y O₂) y reductora (CO₂ y CO).

La determinación del cloro total (Cl) se realizó siguiendo la metodología propuesta en la norma ASTM E776-87 modificada (Gutierrez *et al.*, 2016), y la determinación del azufre total (S) se realizó utilizando la norma ASTM D3177-02 modificada (Mistretta *et al.*, 2019).

El contenido total de sílice (SiO₂) se determinó utilizando el método gravimétrico descrito en la norma ASTM E887-88 (Gutierrez *et al.*, 2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta los valores promedio y el coeficiente de variación de la densidad, la distribución del tamaño de partícula, el análisis inmediato, la caracterización energética y los contenidos de Cl, S y SiO₂ del lote de muestras analizadas de las cenizas recuperadas del agua del lavador después del secado en el horno.

La Tabla 2 resume los resultados promedio y el coeficiente de variación del análisis de fusibilidad de las cenizas, realizado tanto en atmósfera oxidante como en atmósfera reductora.

Tabla 1. Valores promedio de densidad, distribución del tamaño de partícula, análisis inmediato, caracterización energética, contenidos de Cl, S y SiO₂ determinados en las cenizas de los lavadores estudiados. D: densidad; Dp: análisis del tamaño de partícula de las cenizas; SV: sólidos volátiles; CF: carbono fijo; CZ: ceniza; PCS: poder calorífico superior; Cl: cloro total; S: azufre total; SiO₂: sílice total; % CV: coeficiente de variación; b.s.: base seca.

| Prueba | D [kg/m ³] | Dp [mm] | SV [%] bs. | CF [%] bs. | CZ [%] bs. | PCS [kJ/kg] bs. | Cl [%] bs. | S [%] bs. | SiO ₂ [%] bs. |
|-----------------|------------------------|---------|------------|------------|------------|-----------------|------------|-----------|--------------------------|
| Promedio | 1.664,6 | 0,31 | 17,47 | 10,99 | 71,61 | 6.585 | 0,51 | 0,64 | 30,05 |
| % CV | 0,27 | 0,40 | 0,71 | 1,01 | 0,23 | 0,61 | 1,03 | 0,92 | 0,45 |

Tabla 2. Resultados de las temperaturas de fusibilidad de las cenizas en atmósferas oxidante y reductora para el material recuperado del agua de lavado de gases. TD: temperatura de deformación inicial; TS: temperatura de ablandamiento; TH: temperatura semiesfera; TF: temperatura de fluidización. % CV: coeficiente de variación.

| Prueba | Atmósfera oxidante | | | | Atmósfera reductora | | | |
|-----------------|--------------------|---------|---------|---------|---------------------|---------|---------|---------|
| | TD [°C] | TS [°C] | TH [°C] | TF [°C] | TD [°C] | TS [°C] | TH [°C] | TF [°C] |
| Promedio | 1.043 | 1.245 | 1.378 | >1.500 | 1.009 | 1.256 | 1.378 | >1.500 |
| % CV | 0,07 | 0,09 | 0,07 | - | 0,13 | 0,10 | 0,07 | - |

En la Figura 1 se puede observar una comparación de los valores promedio de la densidad, la distribución del tamaño de partícula, el análisis inmediato de la caracterización energética; los contenidos de Cl, S y SiO₂ de las cenizas obtenidas a la salida de los filtros lavadores estudiados para las zafas 2022 y 2023.

En la Figura 2 se muestra una comparación de los valores promedio del análisis de fusibilidad de las cenizas para las muestras de cenizas recuperadas del lavador de gases para las cosechas de caña de azúcar de 2022 y 2023.

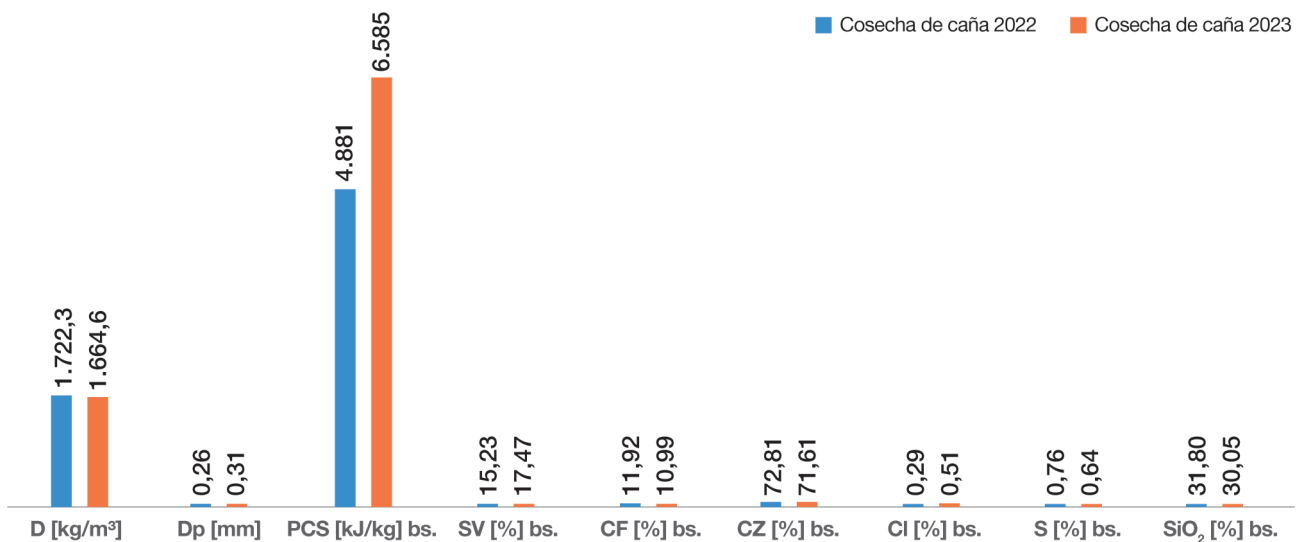


Figura 1. Valores promedio de la densidad, distribución del tamaño de partícula, PCS, análisis inmediato, contenidos de Cl, S y SiO₂ de las cenizas del agua de lavado de los lavadores, para las cosechas de caña de azúcar del 2022-2023.

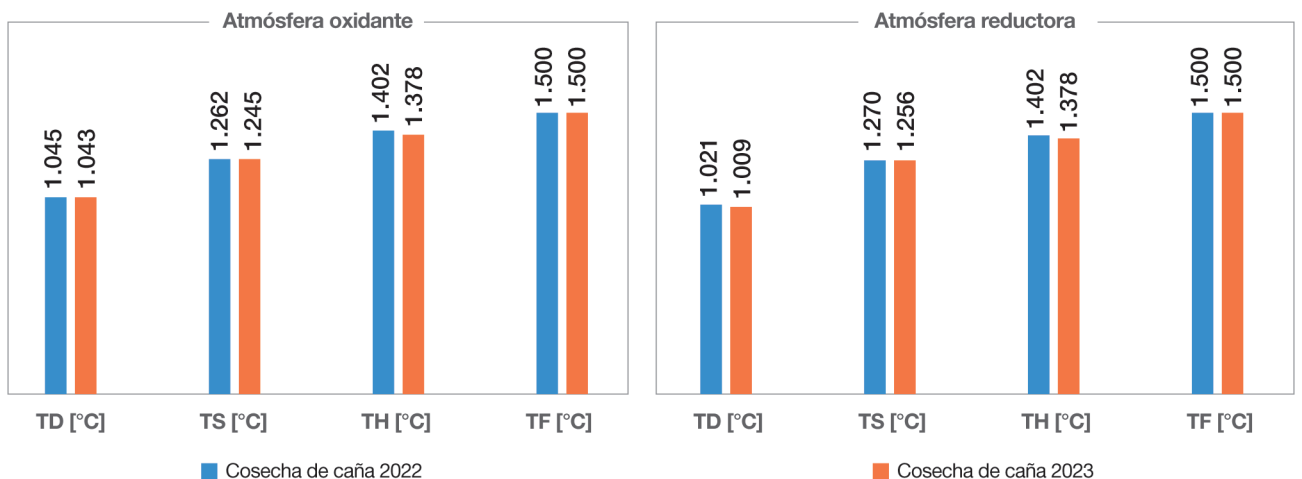


Figura 2. Valores promedio de las temperaturas de fusibilidad de las cenizas en atmósfera oxidante y reductora, para las cenizas recuperadas del lavador de gases, para las cosechas de caña de azúcar de 2022 y 2023.

CONCLUSIONES

Los parámetros termogravimétricos, energéticos y de fusibilidad de las cenizas obtenidas del material recuperado del agua de lavado de gases muestran tendencias similares a las citadas por Gutierrez *et al.* (2022). El alto contenido de material inorgánico en las cenizas afecta negativamente al PCS, reduciendo su viabilidad para la recuperación de energía.

La temperatura de deformación inicial de las cenizas en atmósfera oxidante fue de 1.043°C, superior a la observada en atmósfera reductora de 1.009°C, una diferencia que podría asociarse con la presencia de altas concentraciones de metales y otras sales en la composición de las cenizas, que forman compuestos con un alto punto de fusión durante la combustión (Golato *et al.*, 2021).

Aunque el PCS del material recuperado es bajo debido a la alta concentración de CZ, lo que dificulta su aprovechamiento energético, se sugiere realizar un análisis más detallado del contenido inorgánico. Este análisis adicional permitiría determinar su potencial uso como componente en morteros, sirviendo así como un sustituto viable para su reutilización.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Agencia Nacional de Aguas, 2009.** Conservación y reutilización del agua en la agroindustria azucarera y energética. Federación de Industrias del Estado de São Paulo; Unión de la Industria de la Caña de Azúcar; Centro de Tecnología de la Caña de Azúcar. Brasilia, Brasil. págs.: 107-204. Consultado el 10 de mayo de 2024.
- Aso, G.; Golato, M. and W. Morales. 2009.** Depurador de gases de combustión en la industria azucarera: Impacto del mantenimiento en la eficiencia operativa. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 30(3): 35-38.
- ASTM C 136-01. 2001.** Método de ensayo estándar para Tamiz Análisis de partículas finas y gruesas Áridos. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, Estados Unidos Estados.
- ASTM D 854-02. 2002.** Métodos de ensayo estándar para Especifico Gravedad del suelo Sólidos por agua Picnómetro. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, Estados Unidos Estados .
- ASTM D 1857-03. 2003.** Método de ensayo estándar para Fusibilidad del carbón y del coque Ash. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, Estados Unidos Estados .
- ASTM D 2015-96. 1996.** Método de ensayo estándar para Bruto Calorífico Valor del carbón y el coque por el Adiabático Bomba Calorímetro. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, Estados Unidos Estados.
- ASTM D 3177-02. 2002.** Métodos de ensayo estándar para el azufre total en el Análisis Muestra de carbón y coque. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, Estados Unidos Estados.
- ASTM D 5142-02. 2002.** Métodos de ensayo estándar para Próximo Análisis de la Análisis Muestra de carbón y coque mediante procedimientos instrumentales. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, Estados Unidos Estados.
- ASTM E 776-87. 1987.** Método de ensayo estándar para Formas de cloro en combustible derivado de residuos. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, Estados Unidos Estados.
- ASTM E 887-88. 1988.** Método de ensayo estándar para Sílice en combustible derivado de residuos (RDF) y cenizas de RDF. International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, Estados Unidos Estados.
- Golato, MA, Morales, WD, Méndez, HS, Feijoo, EA y D. Paz, D. 2012 .** Monitoreo de Emisiones de Material Particulado de Chimeneas de Generadores de Vapor en la Industria Azucarera de Tucumán, Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 89(1): 11-19.
- Golato, M., Zamora Rueda, G., Gutierrez, C., Mistretta, G., Paz, D. y M. Ruiz. 2021.** Características de fusibilidad de cenizas de bagazo y residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán – Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 98(2): 21-27.
- Gutierrez, CE; Mistretta, G.; Zamora Rueda, G.; Peralta, Florida; Golato, MA; Coronel, M.; Ruiz, M.; Paz, D.; y G.J. Cárdenas. 2016.** Contenido total de cloro en los residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 93 (2): 15-19.
- Gutierrez, CE; Mistretta, G.; Zamora Rueda, G.; Peralta, Florida; Golato, MA; Juárez, G.; Ruiz, M.; Paz, D.; y G.J. Cárdenas. 2018.** Contenido total de sílice en las cenizas de los residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán, Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 95 (1): 21-26.
- Mistretta, G.; Gutiérrez, C.; Zamora Rueda, G.; Peralta, F.; Golato, MA; Paz, D.; Cárdenas, G.; y M. Ruiz. 2019.** Contenido total de azufre en residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar en Tucumán, Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 96 (1): 49-54.
- Gutierrez, CE; Zalazar, HC; Morales, WD; Golato, MA; y M. Ruiz. 2022.** Caracterización de las aguas de lavado y las cenizas de los gases de chimenea de los ingenios azucareros de Tucumán, Argentina. *XXII Reunión Técnica Nacional sobre la Caña de Azúcar*. Tucumán, Argentina.
- Vizueta Méndez, JA, y E. Martínez Lozano. 2013.** Implementación de un nuevo sistema de tratamiento de agua con cenizas de los depuradores de gases de combustión de las calderas del ingenio azucarero San Carlos. Consultado el 15 de enero de 2024.
- https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/24603/1/FIMCP_Implementacion%20de%20un%20nuevo%20sisema%20de%20tratamiento%20de%20agua_FIMCP.pdf