



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 103 (2):
23-28; 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:
11/06/2026

Fecha de
aceptación:
19/06/2026

Evaluación del sorgo fibroso como combustible alternativo en calderas de bagazo en Tucumán, Argentina

M. Carolina Cruz, Marcos A. Golato, Gimena del H. Zamora Rueda, Sergio Casen y Marcelo Ruiz

Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). C.P. 4101- Las Talitas- Tucumán. www.eeaoc.org.ar - Tel. 0381-4521000. E-mail: ccruz@eeaoc.org.ar

RESUMEN

Para optimizar la matriz energética en los ingenios azucareros, es fundamental analizar la viabilidad técnica de incorporar nuevas fuentes de biomasa en los sistemas de combustión. A fin de evaluar el sorgo fibroso como combustible alternativo en calderas de bagazo y compararlo con biomásas típicas de la región, se analizaron 15 muestras de un híbrido comercial tipo Silero (alto contenido de fibra), 15 muestras de bagazo de ingenios azucareros y 15 muestras de residuo agrícola de la cosecha (RAC). La caracterización del sorgo fibroso revela parámetros energéticos similares a los del bagazo y el RAC. El sorgo presenta un alto riesgo de escoriación (*slagging*), ya que su índice característico $R_{B/A}$ fue mayor que 0,75. Todas las biomásas presentarían riesgo de sinterización (IS), dado que el índice se encuentra por debajo de 2. Todos los materiales superarían visiblemente el valor umbral para el índice de ensuciamiento (AI), lo que indica un riesgo de ensuciamiento, aunque el sorgo mostraría un menor impacto en comparación con el bagazo ($15,87 < 36,27$). Los análisis de fusibilidad de las cenizas del sorgo indicaron puntos de fusión bajos en comparación con el bagazo, probablemente debido al mayor contenido de K_2O (27,10%), por lo que su uso como combustible alternativo solo podría realizarse en mezclas con bagazo. Se encontraron comportamientos aceptables para mezclas de 20% de sorgo / 80% de bagazo; con estas proporciones se lograrían temperaturas de fusibilidad de cenizas más convenientes para evitar inconvenientes en el interior de la caldera y el haz tubular.

Palabras clave: cultivos energéticos, biocombustibles, composición química de cenizas.

ABSTRACT

Evaluation of fibrous sorghum for as an alternative fuel in bagasse boilers in Tucumán, Argentina

To optimize the energy matrix in sugar mills, analyzing the technical feasibility of incorporating new biomass sources into combustion systems is essential. In order to evaluate fibrous sorghum as an alternative fuel in bagasse boilers and compare it with typical biomasses from the region, 15 samples of a commercial Silage-type hybrid (high fiber content), 15 samples of sugarcane bagasse, and 15 samples of agricultural harvesting residue (RAC) were analyzed. The characterization of fibrous sorghum reveals energy parameters similar to those of bagasse and RAC. Sorghum presents a high risk of slagging, as its characteristic $R_{B/A}$ ratio was higher than 0.75. All biomasses would present a risk of sintering (IS) given that the index is below 2. All materials would visibly exceed the threshold value for the fouling index or alkali index (AI), indicating a fouling risk, although sorghum would show a lower impact compared to bagasse ($15.87 < 36.27$). Ash fusibility analyses of sorghum indicated low melting points compared to bagasse, likely due to the higher K_2O content (27.10%); therefore, its use as an alternative fuel could only be carried out in blends with bagasse. Acceptable behaviors were found for blends of 20% sorghum / 80% bagasse; these proportions would achieve more convenient ash fusibility temperatures to

avoid issues inside the boiler and the tube bundle.

Key words: energy crops, sorghum, biofuels, ashes chemical composition.

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera de Tucumán, Argentina, es casi totalmente autosuficiente en energía debido al empleo de su propio combustible, el bagazo. El consumo de combustible adicional, gas natural, ha disminuido significativamente en los últimos años, llegando a cero en algunos ingenios. Sin embargo, es importante contar con combustibles renovables alternativos al gas natural, como el residuo agrícola de la cosecha de caña de azúcar (RAC) (Feijóo *et al.*, 2015), ya incorporado en los ingenios del norte argentino. Otro cultivo energético que puede utilizarse como combustible es el sorgo fibroso, ya que presenta un interesante potencial activo (Casen *et al.*, 2020), así como un balance energético positivo (Cruz *et al.*, 2023).

El uso de biomasa combustible está sujeto al análisis previo de sus principales características fisicoquímicas y energéticas para definir su perfil como posible combustible complementario para calderas de vapor de bagazo. Entre los parámetros más importantes se encuentran el contenido de humedad, volátiles, carbono fijo, cenizas y poder calorífico (Cruz *et al.* 2020). Sin embargo, estos parámetros no son suficientes para evaluar la calidad a largo plazo de un biocombustible para calderas de vapor. Otros parámetros importantes son la fusibilidad y la composición química de sus cenizas, así como los contenidos de cloro y azufre, ya que estos influyen en la operación eficiente a largo plazo de los generadores de vapor (Zamora Rueda *et al.*, 2023; Golato, 2021).

Entre 2013 and 2017, la EEAOC llevó a cabo experiencias de producción de cultivos bioenergéticos complementarios a escala comercial en Tucumán (Proyecto Biosorgo), orientados a evaluar la factibilidad técnica del sorgo azucarado en la cadena productiva de la caña de azúcar. Este proyecto incluyó la producción de bioetanol y la combustión de bagazo de sorgo en calderas de bagazo (Tonatto *et al.*, 2018). El objetivo de este trabajo fue evaluar el sorgo fibroso como combustible alternativo para la industria azucarera, mediante su caracterización completa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para comparar las características fisicoquímicas y energéticas del sorgo con otras biomásas combustibles de la industria azucarera, se estudiaron 15 muestras de un híbrido comercial de tipo Silero (alto contenido de fibra), denominado sorgo fibroso, recolectadas en campos experimentales; 15 muestras de bagazo de ingenios azucareros y 15 muestras de RAC de campos de caña de azúcar. Inicialmente, las muestras se secaron para su posterior tratamiento y análisis, de acuerdo con Cruz *et al.* (2016).

Para la determinación del poder calorífico superior (PCS), se utilizó una bomba calorimétrica automatizada

(marca IKA, modelo C2000) bajo operación dinámica a 25°C, con una duración de ensayo de 7 minutos. Previamente, se preparó una pastilla con la muestra seca y molida de cada biomasa. La metodología empleada siguió la norma ASTM D 2015-77. Para la determinación del cloro total, se siguió la metodología modificada de la norma ASTM E 776-87, según Gutiérrez *et al.* (2016). La determinación del contenido de azufre (S) total se realizó siguiendo la norma modificada ASTM D 3177-02, de acuerdo con Mistretta *et al.* (2019).

Se determinaron los contenidos de los metales mayoritarios en las muestras recolectadas, y se midieron las concentraciones en g/kg de calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), silicio (Si) y titanio (Ti) mediante la técnica de espectrometría de absorción atómica (EAA). El contenido de fósforo (P) se determinó por colorimetría, de acuerdo con SMWW parte 4500-P-C. El contenido de potasio (K) se determinó por emisión atómica (EAE), sobre la base de la norma ASTM D 3682-01 modificada para biomasa, descrita en Golato (2021). Los contenidos correspondientes de los óxidos mayoritarios en las cenizas de sorgo fibroso (% Óxidos) se determinaron según la estequiometría de las reacciones de oxidación de los metales, de acuerdo con Golato (2021). A partir de estos datos, se calcularon los índices de comportamiento, que permiten predecir con gran precisión el desempeño de una biomasa determinada respecto a la escoriación (*slagging*) y el ensuciamiento (*fouling*) causados por sus cenizas en el hogar de una caldera de vapor de bagazo. El cálculo de los indicadores se determinó según Golato *et al.* (2022) y se comparó con el bagazo y el RAC.

El análisis de fusibilidad de cenizas se realizó con un equipo analizador, marca LECO, modelo AF700 siguiendo la metodología ASTM D 1857-03 (ASTM, 2003), el mismo identifica las cuatro temperaturas características de fusión: inicial de deformación (DT), ablandamiento (ST), semiesfera (HT) y fluidización (FT). Estas temperaturas se identifican para dos atmósferas diferentes: oxidante (CO₂ y O₂) y reductora (CO₂ y CO). El procesamiento de las muestras se realizó siguiendo la metodología propuesta por Golato *et al.*, 2021.

Según Cruz *et al.* (2020), las temperaturas de fusibilidad de las cenizas del sorgo son inferiores a las del bagazo y del RAC, por lo que su combustión directa no sería conveniente en una caldera de bagazo. Por este motivo, se realizaron ensayos de fusibilidad de cenizas de mezclas de sorgo y bagazo en diferentes proporciones: 20%-80%; 30%-70%; 40%-60% y 50%-50%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1A presenta los resultados promedio del contenido de humedad (%H), cenizas (%CZ), sólidos volátiles (%SV) y carbono fijo (%CF) para las biomásas estudiadas. Las diferencias observadas en el contenido de

humedad se deben a que las muestras fueron tomadas bajo diferentes condiciones de trabajo. Las muestras de sorgo y de RAC se tomaron en días distintos después de la cosecha del cultivo. Los parámetros hallados para el sorgo se encuentran en el mismo orden de magnitud que los del bagazo y el RAC de la caña de azúcar.

Las Figuras 1B y C muestran el poder calorífico superior (PCS) promedio para las biomásas estudiadas y los correspondientes contenidos de cloro y azufre. Se puede observar que el PCS del sorgo fue un 6,7% mayor que el del bagazo y un 4,1% mayor que el del RAC, lo que lo convierte en un combustible interesante desde el punto de vista energético. Sin embargo, el contenido de cloro en el RAC y en el sorgo (0,24% y 0,26%) presentaron valores elevados en comparación con el bagazo (0,11%). Esto podría generar un problema de corrosión en la caldera a largo plazo si se quemara únicamente sorgo. El contenido promedio de azufre en el sorgo fue aproximadamente un 41% inferior que el hallado en el bagazo, lo que sugiere que se esperarían menos inconvenientes en comparación con las demás biomásas.

La Figura 2 presenta las correspondientes concentraciones promedio de los elementos mayoritarios (expresados como óxidos). Se puede observar un alto contenido de K_2O (27,10%) en comparación con los valores registrados en el bagazo (5,29%) y en el RAC (14,34%), lo cual podría causar problemas de fusibilidad de las cenizas, de acuerdo con Golato *et al.* (2021). Los contenidos de SiO_2 (30,81%) fueron menores que los del bagazo (54,25%) y del RAC (55,09%), tomados como referencia. Esto indica que el sorgo presentaría una menor formación de silicatos sobre la grilla.

La Tabla 1 presenta los resultados de los índices de comportamiento del sorgo fibroso en comparación con el bagazo y el RAC (Golato *et al.*, 2022). Las cenizas de combustión del sorgo, en relación con las otras biomásas, exhiben un comportamiento diferente según los índices evaluados. El sorgo presentaría un alto riesgo de escorificación, ya que su índice característico ($R_{B/A}$) fue mayor que 0,75. Todas estas biomásas presentarían riesgo de sinterización, dado que el índice (IS) se encuentra por debajo de 2. Con respecto al índice de ensuciamiento (AI), todos los materiales superarían visiblemente el valor umbral, lo que indica riesgo de ensuciamiento, pero el sorgo mostraría un menor impacto en comparación con el bagazo (15,87 < 36,27). Además, estos materiales mostrarían una baja tendencia a la escorificación debido a la acción del azufre. El sorgo fibroso en particular exhibiría una menor tendencia a la deposición en comparación con el RAC (24,35 < 47,98). Finalmente, todos los materiales revelarían bajas probabilidades de fluidización según el índice de referencia ($SR > 72$). El sorgo fibroso se destaca por su alta reactividad ($I_{K-SiO_2} = 1,56$) y Erosión ($I_{S/C12} = 1,59$); el bagazo, por su alta corrosividad ($I_{Ca/Si} = 1,80$) y baja formación de silicatos ($I_{Ca/Si} = 0,03$), mientras que el RAC presenta los valores más bajos en general. Estos análisis pueden ser útiles para predecir la mejor aplicación para cada tipo de ceniza según sus propiedades específicas.

Las Figuras 3 A y B presentan los resultados promedio de las temperaturas (DT, ST, HT y FT) para las biomásas, realizados en atmósferas oxidante y reductora. La temperatura promedio mínima de deformación inicial (DT) registrada en ambas atmósferas correspondió al sorgo (812°C), lo que indica que la combustión directa de

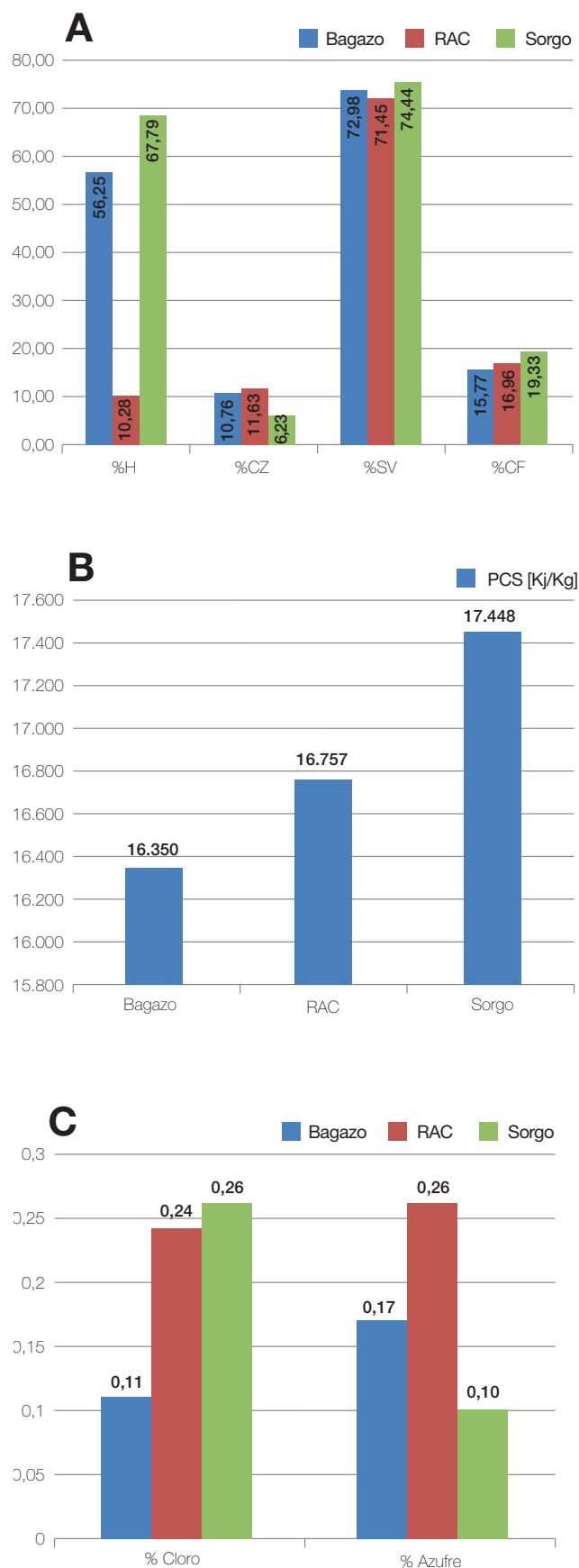


Figura 1. A. Valores promedio de %H, %CZ, %SV y %CF; B. poder calorífico superior (PCS); C. Contenido de cloro y azufre en muestras de bagazo, RAC y sorgo de Tucumán, Argentina.

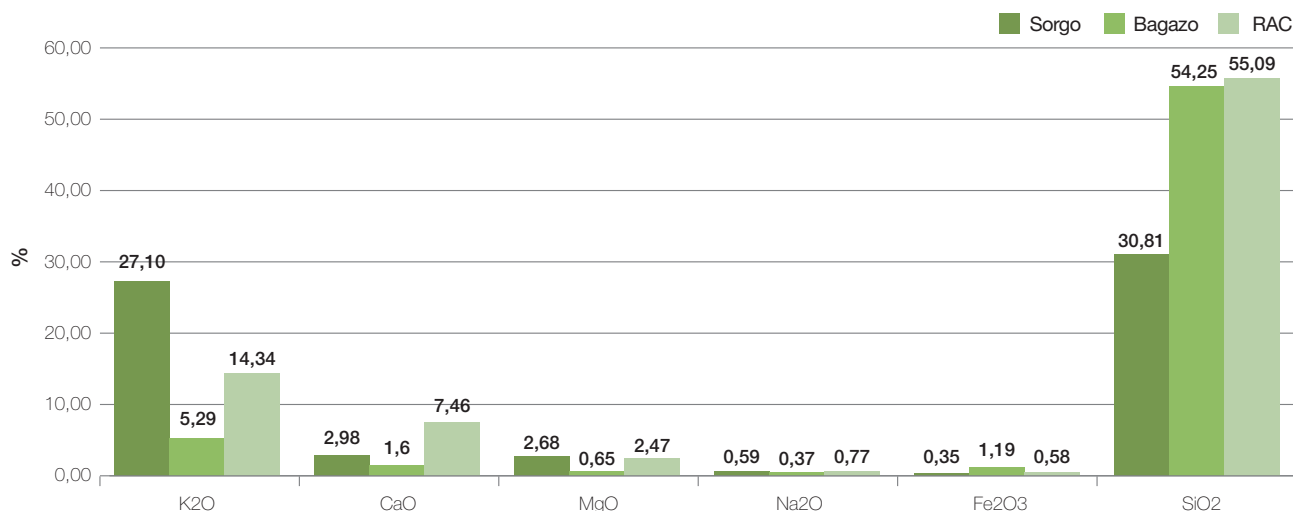


Figura 2. Concentración de óxidos mayoritarios en cenizas de sorgo de Tucumán, en comparación con las concentraciones de óxidos en bagazo y RAC obtenidas por Golato *et al.* (2022).

Tabla 1. Índices de comportamiento de las cenizas de sorgo fibroso en comparación con el bagazo y el RAC de la caña de azúcar.

Índices de comportamiento	Sorgo	Bagazo	RAC	Observaciones
Relación base/ácido ($R_{B/A}$: índice de escorificación)	0,88	0,16	0,49	$R_{B/A} < 0,75$ sin peligro de escorificación $R_{B/A} \sim 0,75$ bajo peligro de escorificación $R_{B/A} > 0,75$ alto peligro de escorificación
Índice de sinterización (IS)	0,20	0,53	0,73	IS > 2 no presenta riesgo de sinterización
Índice de ensuciamiento (AI)	15,87	36,27	10,81	AI < 0,17 los álcalis no son problemáticos 0,17 < AI < 0,34 riesgo de ensuciamiento AI > 0,34 problemas de ensuciamiento
Índice de escorificación por acción del azufre (RS)	0,09	0,03	0,08	Rs < 0,6 existe baja tendencia a escorificación
Índice de deposición fouling (Fu)	24,35	0,92	47,98	Fu < 0,6 baja tendencia a la deposición 0,6 < Fu < 40 alta tendencia a deposición Fu > 40 muy alta tendencia a deposición
Índice de reacción del potasio (I_{K-SiO_2})	1,56	0,13	0,01	
Índice de sulfatación ($I_{sulf.}$)	1,56	0,13	0,01	
Índice de corrosión ($I_{S/CL}$)	0,38	1,80	0,86	
Índice de formación de Silicatos ($I_{Ca/Si}$)	0,15	0,03	0,17	
Índice de erosión (Erosión)	1,59	0,14	0,02	
Índice de viscosidad (S_R)	83,67	94,12	83,65	$S_R > 72$ bajas probabilidades defluidizarse $S_R < 72$ altas probabilidades de fluidizarse

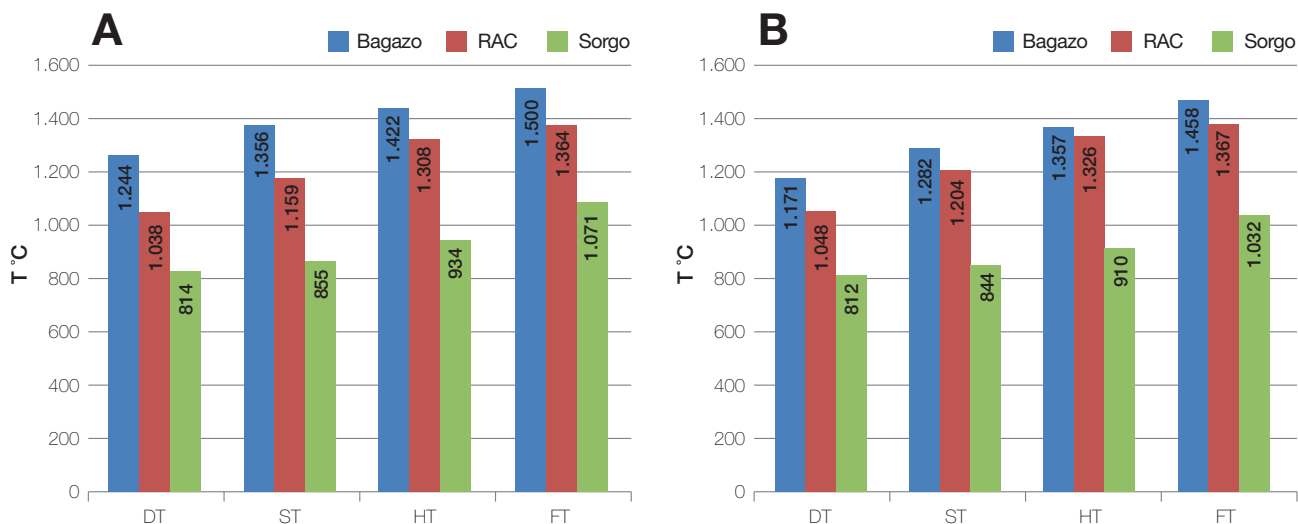


Tabla 1. Índices de comportamiento de las cenizas de sorgo fibroso en comparación con el bagazo y el RAC de la caña de azúcar.

este combustible en calderas de bagazo sería problemática. Esto podría deberse al mayor contenido de K_2O en las cenizas de sorgo en comparación con las otras biomásas analizadas; por lo tanto, el sorgo fibroso debería mezclarse con bagazo para su uso como combustible complementario.

Las Figuras 4 A y B muestran los resultados del análisis de fusibilidad de las cenizas en mezclas de sorgo y bagazo para las diferentes proporciones analizadas, tanto en atmósfera oxidante como reductora. Las mezclas cuyas composiciones arrojaron temperaturas de fusibilidad más altas y más cercanas a las del bagazo y el RAC correspondieron a la proporción 20% sorgo / 80% bagazo, con $1275^{\circ}C$ en atmósfera oxidante y $1200^{\circ}C$ en atmósfera reductora. Por lo tanto, el sorgo fibroso podría utilizarse en mezcla con el bagazo sin alterar la operación de la caldera, ya que se comportaría de manera similar a cuando se combustiona únicamente bagazo.

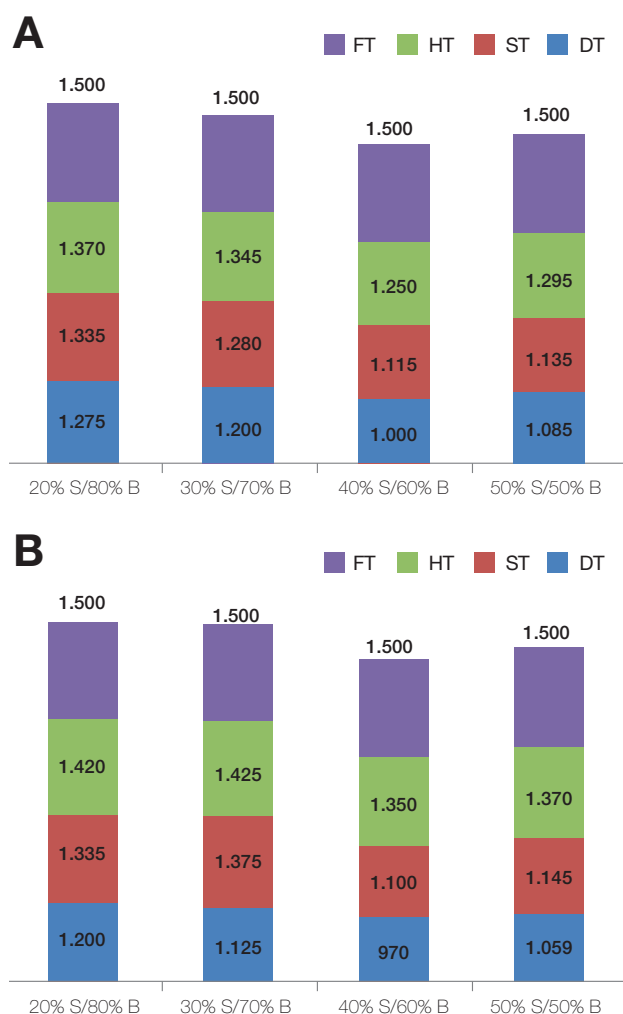


Figura 3. Temperaturas promedio de DT, ST, HT y FT en atmósferas A oxidante y B reductora para muestras de bagazo, RAC y sorgo.

CONCLUSIONES

La caracterización del sorgo fibroso valida su alto potencial como biocombustible sólido renovable, exhibiendo parámetros energéticos análogos a los del bagazo y el RAC. El hallazgo más disruptivo radica en su baja corrosividad ($I_{s/ci} = 0,38$), valor sustancialmente menor al del bagazo (1,80) y el RAC (0,86), lo que representa una ventaja competitiva crucial para prolongar la vida útil de los equipos térmicos. Si bien el sorgo presenta una mayor tendencia a la escorificación debido a puntos de fusión de ceniza más bajos asociados a su contenido de K_2O (27,10), sus índices de ensuciamiento (15,87 vs. 36,27 del bagazo) y deposición (24,35 vs. 47,98 del RAC) resultan marcadamente favorables. La investigación demuestra que las limitaciones térmicas de esta biomasa se resuelven eficientemente mediante la co-combustión: una mezcla optimizada de 20% de sorgo y 80% de bagazo eleva las temperaturas de fusión a rangos operacionales seguros. Consecuentemente, acoplado a una gestión adecuada del hogar de la caldera, el sorgo fibroso emerge como una materia prima estratégica y eco-eficiente para diversificar la matriz energética agroindustrial y reducir la huella de carbono del sector.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Casen S.; E. Romero; P. Fernández Gonzáles y G. De Boeck. 2020. Sorgo fibroso para la producción de bioenergía. Avance Agroindustrial. 41(3): 20-24.
- Cruz C.; S. Casen; G. De Boeck; D. Paz. 2023. Análisis de la productividad energética del sorgo fibroso. Rev. Ind. Agric. 100(1): 3-10.
- Cruz C.; G. De Boeck; D. Paz. 2020. Estudio preliminar del aprovechamiento de sorgo fibroso como combustible para abastecer energéticamente un ingenio durante la interzafra en Tucumán. Rev. Ind. Agric. 197(1): 43-50.
- Cruz C.; G. Zamora Rueda; M. Golato y D. Paz. 2016. Caracterización de biomásas regionales. Argentina (Tucumán) y Brasil (Itajubá). Avance Agroindustrial. 37(4): 34-39.
- Feijóo, E. A.; Golato, Marcos Antonio; Federico J. Franck Colombres; Dora Paz; Cárdenas, Gerónimo. 2015. Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar de Tucumán. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, 92 (2): 23-32.
- 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 Magíster en Ingeniería Bioenergética, UTN, FRT. Disponible en: <https://ria.utn.edu.ar>
- Golato, M. A.; Gutiérrez, C. E.; Zamora Rueda, G. del H.; Juárez, G.; Kamiya, N. y Paz, D. 2022. Estudio preliminar de los índices de comportamiento y fusibilidad de las cenizas de bagazo y de los residuos de cosecha de la caña de azúcar (RAC) de Tucumán, Argentina. XXII Reunión de la Sociedad Argentina de Técnicos de la Caña de Azúcar (SATCA). Disponible en: <https://www.eeaoc>.

gob.ar/wp-content/uploads/2023/03/Trabajos-Satca-2022_compressed.pdf

Golato, M. A.; G. Zamora Rueda; C. Gutiérrez; M. G. Mistretta; D. Paz; M. Ruíz. 2021. Características de la fusibilidad de cenizas de bagazo y de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán - Argentina. Revista industrial y Agrícola de Tucumán. 98(2): 21-27.

Gutiérrez, C.; M.G. Mistretta; G. Zamora Rueda; F. Peralta; M.A. Golato; M. Coronel; M. Ruíz; G.J. Cárdenas. 2016. Contenido de cloro total en residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán. Revista industrial y agrícola de Tucumán 2: 19 - 25.

Mistretta, M.G.; C. Gutierrez; G. Zamora Rueda; F.

Peralta; M.A. Golato; D. Paz; G.J. Cárdenas y M. Ruíz. 2019. Contenido de azufre total del residuo agrícola de la cosecha de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Revista industrial y Agrícola de Tucumán.1: 49 - 54.

Tonatto S.; D. Gutierrez; G. De Boeck; S. Casen; C. Gusils; M. Ruiz; E. Romero y A. Acevedo. 2018. Sorgo azucarado, una opción suplementaria para la industria sucroalcoholera. Proyecto Biosorgo. Avance Agroindustrial. 39(3): 14-18.

Zamora Rueda G. d. H., M. G. Mistretta, C. E. Gutierrez, M. A. Golato, D. Paz y M. Ruiz. 2023. Caracterización energética de bagazo de caña de azúcar en Tucumán, Argentina. Revista industrial y agrícola de Tucumán 100(1): 47-53.