



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (1):
43-53; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Sensibilidad de los componentes mayoritarios en la fusibilidad de cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina

Marcos A. Golato*, Gimena Del H. Zamora Rueda*, Cynthia E. Gutierrez*, Andrea N. Peña Malavera**, Dora Paz* y Marcelo Ruiz*

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales; **ITANOA. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) de Tucumán, Argentina. Email: mgolato@eeaoc.org.ar; ccruz@eeaoc.org.ar

RESUMEN

La calidad del bagazo y de los residuos de cosecha de la caña de azúcar (RAC) como combustibles para calderas de vapor dependen de diferentes factores, entre ellos la variedad de caña, el tipo de suelo y cosecha, la época del año y las condiciones climáticas, entre otros. Estos parámetros influyen comportamientos diferentes en el hogar de un generador de vapor a lo largo de la zafra. El objetivo del presente trabajo es mostrar los resultados de un estudio de sensibilidad de los componentes mayoritarios encontrados en cenizas de bagazo y RAC, provenientes de ingenios azucareros y campos cañeros de Tucumán, Argentina. Se procesaron 30 muestras de bagazo y 30 muestras de RAC de la variedad de caña LCP 85-384, durante las zafras de 2016 a 2019. Se analizó la fusibilidad de las cenizas según ASTM D-1857 y se determinaron los contenidos de metales mayoritarios, según ASTM D 3682-01, SMWW Part 4500-P-C (2017) y ASTM D 3177-02 modificado. El estudio de sensibilidad de los elementos químicos se realizó fortificando muestras de cenizas de bagazo y RAC, utilizando óxidos comerciales puros. Los resultados de composición de cenizas se correlacionaron con las temperaturas de fusión de las mismas. Las cenizas de bagazo en atmósfera oxidante (AO) presentaron una correlación negativa entre DT y %SiO₂; el incremento de %K₂O provocó un aumento en la temperatura de inicio de fusión (DT) hasta el 5,4%; luego disminuyó. En atmósfera reductora (AR), la correlación fue negativa entre DT y %SiO₂; no se observó influencia del %K₂O en el rango evaluado. Las cenizas fortificadas de RAC mostraron correlaciones positivas entre DT y %Al₂O₃, %SiO₂ y %TiO₂. En RAC fortificado bajo AR, el %CaO, %SO₃ y %K₂O influyeron negativamente en DT. Estos hallazgos resaltan el impacto de los componentes de las cenizas en las propiedades de fusibilidad de las mismas, destacando la importancia de controlar la cantidad de material inorgánico en el combustible y las temperaturas de combustión en el interior del hogar de las calderas de vapor.

Palabras clave: biomasa, composición química, combustión.

ABSTRACT

Sensitivity of major components in the ash fusibility of bagasse and agricultural harvest residues (AHR) of sugarcane in Tucumán, Argentina

The quality of bagasse and sugarcane harvest residues (AHR) as fuels for steam boilers depends on various factors, such as cane variety, soil type, harvest method, time of year, weather conditions, and more. These parameters influence different behaviors in a steam generator's furnace throughout the harvest season. The objective of this study is to present the results of a sensitivity analysis of the major components found in bagasse and AHR ashes from sugar mills and cane fields in Tucumán, Argentina. Thirty samples of bagasse and thirty samples of AHR from the LCP85-384 cane variety were processed during the 2016 to 2019 harvest seasons. The fusibility of the ashes was analyzed according to ASTM D-1857, and the major metal contents were determined according

Fecha de
recepción:
04/12/2023

Fecha de
aceptación:
23/08/2024

to ASTM D 3682-01, SMWW Part 4500-P-C (2017), and modified ASTM D 3177-02. The sensitivity analysis of the chemical elements was performed by fortifying bagasse and AHR ash samples with pure commercial oxides. The ash composition results were correlated with their fusion temperatures. Bagasse ashes in an oxidizing atmosphere (OA) showed a negative correlation between DT and %SiO₂; an increase in %K₂O led to a rise in the initial fusion temperature (DT) up to 5.4%, after which it decreased. In a reducing atmosphere (RA), there was a negative correlation between DT and %SiO₂, with no influence of %K₂O observed within the evaluated range. Fortified AHR ashes showed positive correlations between DT and %Al₂O₃, %SiO₂, and %TiO₂. In AHR fortified under RA, %CaO, %SO₃, and %K₂O negatively affected DT. These findings highlight the impact of ash components on fusibility properties, emphasizing the importance of controlling the amount of inorganic material in the fuel and the combustion temperatures within the steam boiler furnaces.

Key words: biomass, chemical composition, combustion.

INTRODUCCION

Existen diversas biomásas del tipo lignocelulósicas de origen residual, provenientes de actividades agrícolas y procesos agroindustriales, que pueden ser aprovechadas para la generación de energía en calderas de vapor bagaceras. Entre las más importantes se encuentran los propios residuos de cosecha de la caña de azúcar (RAC), ya que presentan buena disponibilidad, cantidad y características respecto a cualquier otra biomasa de la región (Golato *et al.*, 2017). No obstante, el RAC aún no es aprovechado totalmente, debido principalmente al elevado costo de inversión necesario para su recolección, densificación, transporte y distribución (Feijoó *et al.*, 2015). Asimismo, Melissari (2012) y Liu *et al.* (2013) indicaron la importancia de rediseñar o adecuar los generadores de vapor alimentados con biomásas residuales, ya que se encontrarían sujetos a factores que resultarían relevantes de analizar, dada la gran variedad de características que presentan las regiones en cuanto a calidad de los suelos, clima, tecnología de recolección, etc.

Además, según lo observado por Fernández Llorente y Carrasco García (2005) y Baxter *et al.* (1998), durante la combustión de biomasa en calderas de vapor existen problemas frecuentes asociados a la existencia de cenizas con fracciones de componentes inorgánicos, que influyen notoriamente en el proceso de incineración y que les confieren características físicas y químicas indeseables, relacionadas con fenómenos de corrosión, erosión, deposición y escorificación. Estos fenómenos fueron observados en generadores de vapor de nuestra región y se deberían a las características que presentan las cenizas de bagazo y de RAC de caña de azúcar que poseen componentes ácidos (CA) y básicos (CB), los cuales afectan a las temperaturas de fusión de las mismas, según lo observado por Golato *et al.* (2023).

Niu *et al.* (2010) y Melissari (2014) indicaron que los CA de algunas biomásas lignocelulósicas se encuentran formados por sales de silicio (Si), aluminio (Al) y titanio (Ti), las que normalmente se identifican como sus correspondientes óxidos (SiO₂, Al₂O₃ y TiO₂). Del mismo modo, los CB se encuentran formados por sales de hierro (Fe), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K) y también se identifican como óxidos (Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O). En el caso del fósforo (P), si bien su óxido (P₂O₅) es

ácido, según Pronobis (2005), por su comportamiento se considera en conjunto con los CB.

Las características ácidas o básicas de las cenizas tienen que ver con su reactividad y capacidad para formar compuestos ácidos o básicos, dependiendo de la forma en que aquellas se encuentran, la presencia y la cantidad de otros componentes químicos y de la atmósfera que las rodea. Algunos metales, como el Al y el Fe, pueden formar compuestos ácidos cuando se oxidan en presencia de agua o ácido sulfúrico. El Si puede formar ácido silícico (H₄SiO₄) en ciertas condiciones cuando es expuesto al vapor de agua y al dióxido de carbono (CO₂). Otros metales, como Ca, Mg, Na y el K, son comúnmente encontrados en forma de óxidos o hidróxidos en las cenizas y podrían provocar propiedades básicas en aquellas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se procesaron 30 muestras de bagazo y 30 muestras de RAC, provenientes de ingenios y campos cañeros tucumanos, respectivamente, durante las zafas azucareras 2016, 2017, 2018 y 2019. Todas las muestras analizadas pertenecieron a la variedad de caña LCP85-384. Las muestras de bagazo fueron tomadas a la salida de los molinos de caña, inmediatamente antes del ingreso del combustible en las calderas de vapor. Las muestras de RAC se recolectaron aproximadamente a los 15 días posteriores a la cosecha de la caña. Éstas se secaron en estufa eléctrica, marca ORL, con circulación de aire forzado y control automático de temperatura a 105°C, hasta alcanzar peso constante. Posteriormente se acondicionaron a tamaño uniforme (diámetro promedio menor a 2 mm), utilizando un molino de cuchillas, marca Fritsch, modelo Pulverisette 19. Los estudios de caracterización se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI) de la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales y en el Laboratorio de Metales de la Sección Química de los Productos Agroindustriales, ambos pertenecientes a la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC) de la provincia de Tucumán, Argentina.

Se consideraron como mayoritarios los elementos Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na y K, P y S, cuyos contenidos se determinaron por espectrometría de absorción atómica

(EAA), según ASTM D 3682-01; salvo los contenidos de K, que fueron determinados por emisión atómica (EEA); el P, que se determinó por colorimetría, según SMWW Part 4500-P-C (SM, 2017); y el S, que se realizó según ASTM D 3177-02 modificado (Mistretta et al., 2019). Para el cálculo de los correspondientes contenidos de óxidos en cenizas (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 y P_2O_5), se consideró la estequiometría de las reacciones de oxidación de los metales indicados, según Golato *et al.* (2023).

Análisis de la fusibilidad de las cenizas

Las determinaciones de fusibilidad de cenizas se realizaron con un equipo automatizado marca LECO, modelo AF700, que cumple con la norma ASTM D1857 (ASTM, 2010). Esta define cuatro temperaturas características: inicial de deformación (DT), ablandamiento (ST), semiesfera (HT) y fluidización (FT). El equipo se ajustó para una velocidad de calefacción de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ y tiempos de duración de ensayo de cuatro horas por cada seis muestras analizadas. Todas las determinaciones se realizaron en atmósfera oxidante (AO) y en atmósfera reductora (AR). Las muestras de cenizas se obtuvieron por calcinación en mufla eléctrica, marca ORL, a 550°C durante ocho horas, hasta peso constante.

Sensibilidad de los óxidos en la fusibilidad de las cenizas

Para conocer la influencia de las concentraciones de los óxidos mayoritarios encontrados en las cenizas de bagazo y RAC sobre la fusibilidad de las mismas, se realizó una fortificación de las muestras de cenizas de las biomásas en estudio, con óxidos comerciales puros, en las cuales se tuvo en cuenta iguales relaciones de concentración de los elementos inorgánicos mayoritarios encontrados en las biomásas originales. Luego, se varió

la concentración de cada elemento en un rango a partir del promedio de los valores encontrados en las muestras originales analizadas, considerando un porcentaje aproximado por arriba y por debajo del mismo, según la variación observada en bibliografía para similares biomásas de otras regiones. En total se formularon 30 muestras fortificadas por medio gravimétrico, utilizando una balanza analítica marca Shimadzu, modelo AUY 220, con capacidad máxima de 220 g y resolución de 0,1 mg.

Posteriormente se realizaron análisis de la fusibilidad de las cenizas fortificadas, y se correlacionaron los resultados con las composiciones químicas de estas muestras haciendo uso de un análisis estadístico multivariado, siguiendo la metodología propuesta por Balzarini *et al.* (2015), por medio del software de análisis estadístico "InfoStat v.2019p". Para el estudio de sensibilidad se utilizó una matriz de diagramas de dispersión (SPlotM) para AO y otro para AR. Además, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) utilizando un gráfico "biplot" para examinar los datos en un espacio de menor dimensión al espacio original de las variables, y correlacionar las dependencias de las mismas entre ellas. Para analizar las correlaciones entre la fusibilidad y los óxidos en cenizas se consideraron relaciones cuadráticas entre estos, según lo observado por Golato *et al.* (2021).

RESULTADOS

La Figura 1 muestra una comparación de las concentraciones de los óxidos mayoritarios encontrados en cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina (Golato *et al.*, 2023). El componente de mayor proporción encontrado en las biomásas analizadas fue el SiO_2 (mayor al 50%), seguido de K_2O y Al_2O_3 en bagazo y de K_2O , CaO y MgO en RAC. Si bien los CA son mayoría en las cenizas analizadas, el bagazo presentó una mayor cantidad (62,43%) en relación al RAC (56,12%), por lo que

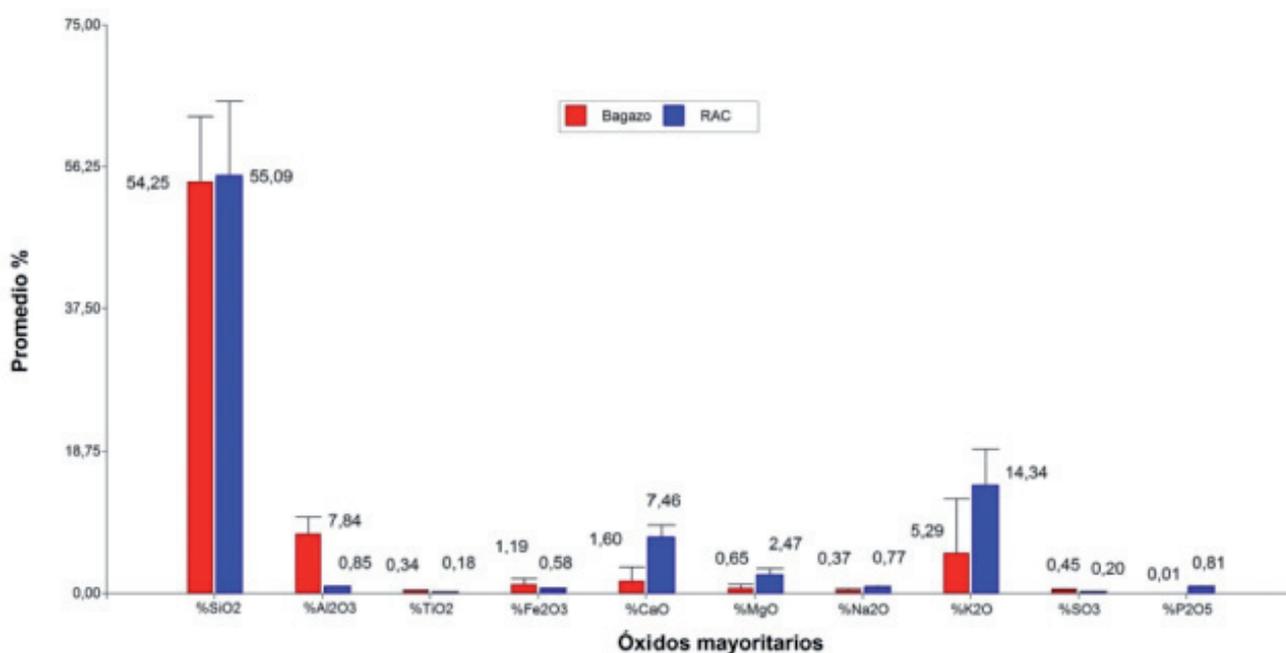


Figura 1. Óxidos mayoritarios en cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina, según Golato *et al.* (2023).

se espera que las cenizas de estas biomásas presenten características diferentes de fusión. Además, los contenidos de K_2O influyen negativamente en la estructura química final de las escorias por su propiedad alcalina, lo que provocaría menores temperaturas DT en las cenizas de RAC en relación a las de bagazo (Golato *et al.*, 2021).

En las Figuras 2 y 3 pueden verse los resultados del análisis de fusibilidad de las cenizas de bagazo y RAC trabajando en AO y AR.

En las Figuras 4 y 5 se observan las concentraciones de óxidos logradas con las muestras de cenizas fortificadas de bagazo y RAC formuladas para este estudio. Se puede observar las concentraciones promedio de los óxidos en las muestras de cenizas originales de bagazo (muestra M0B en Figura 4) y de RAC (muestra M0R en Figura 5), según Golato (2021).

En la Tabla 1 se indican los rangos de las concentraciones logradas con las cenizas fortificadas de bagazo y RAC a partir del estudio realizado inicialmente por Golato (2021). Estos rangos representan las zonas en los que fueron evaluados los diferentes componentes de las cenizas en relación a su fusibilidad.

La Figura 6 muestra cómo los CA afectan la fusibilidad de las cenizas fortificadas de bagazo en condiciones de AO. Se encontró que el $\%Al_2O_3$ tuvo una correlación positiva con DT a bajas concentraciones (hasta 14,2%); luego, a medida que la concentración aumentó la temperatura disminuyó. En cambio, el $\%SiO_2$ tuvo una correlación negativa con DT, ya que su aumento redujo esta temperatura. Respecto a ST, HT y FT, se observó una

Tabla 1. Rango de concentraciones de óxidos logradas con cenizas fortificadas de bagazo y RAC. Elaboración propia.

Óxidos mayoritarios	Rango de concentraciones evaluado en bagazo [%]	Rango de concentraciones evaluado en RAC [%]
Al_2O_3	6,71 a 21,68	0,30 a 1,60
SiO_2	7,66 a 54,25	48,90 a 62,20
TiO_2	0,10 a 0,90	0,34 a 14,03
Fe_2O_3	1,19 a 14,06	0,10 a 1,10
CaO	1,60 a 13,26	1,70 a 12,80
MgO	0,65 a 14,55	1,10 a 6,00
Na_2O	0,37 a 13,88	0,40 a 1,60
K_2O	1,92 a 9,35	9,50 a 19,40
SO_3	0,45 a 3,53	0,00 a 1,00
P_2O_5	0,01 a 8,24	0,10 a 2,10

disminución de las mismas hasta 41% de concentración de $\%SiO_2$ (muestra M6); a partir de ésta la correlación se volvió positiva. El $\%TiO_2$ también tuvo una correlación positiva con DT en todo el rango analizado (0,10% a 0,90%). ST y HT disminuyeron significativamente con el aumento del óxido, mientras que FT disminuyó ligeramente hasta la mitad del rango (aproximadamente 0,5%), para luego aumentar ligeramente la temperatura indicada.

La Figura 7 muestra la influencia de los CA en cenizas fortificadas de bagazo para condiciones de AR. Se encontró que el $\%Al_2O_3$ tiene una correlación positiva con DT en todo el rango evaluado (6,71% a 21,68%). ST, HT y FT mostraron una correlación negativa para este óxido en bajas concentraciones (hasta 14,2%); luego se torna

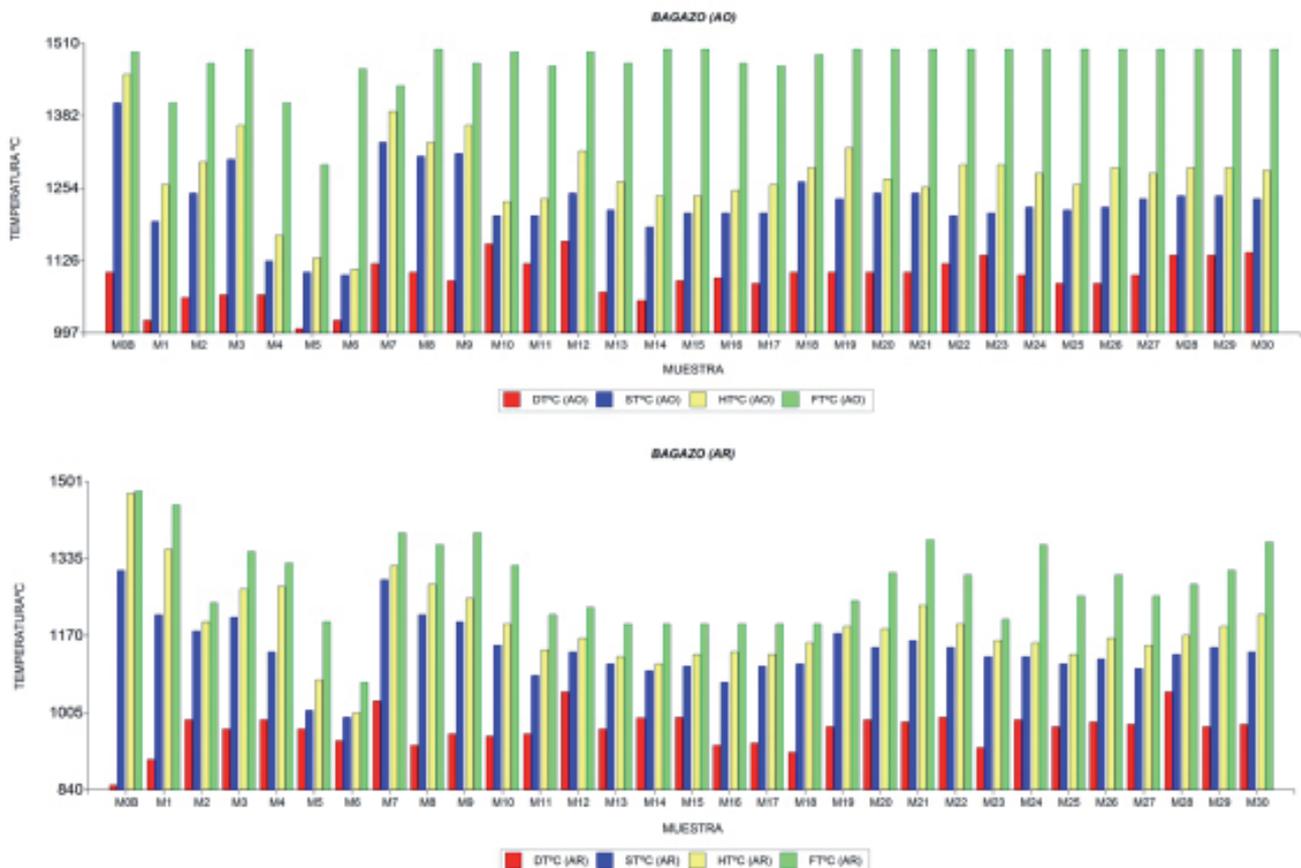


Figura 2. Resultados del análisis de fusibilidad de las cenizas fortificadas de bagazo de Tucumán, Argentina, trabajando en AO y AR.

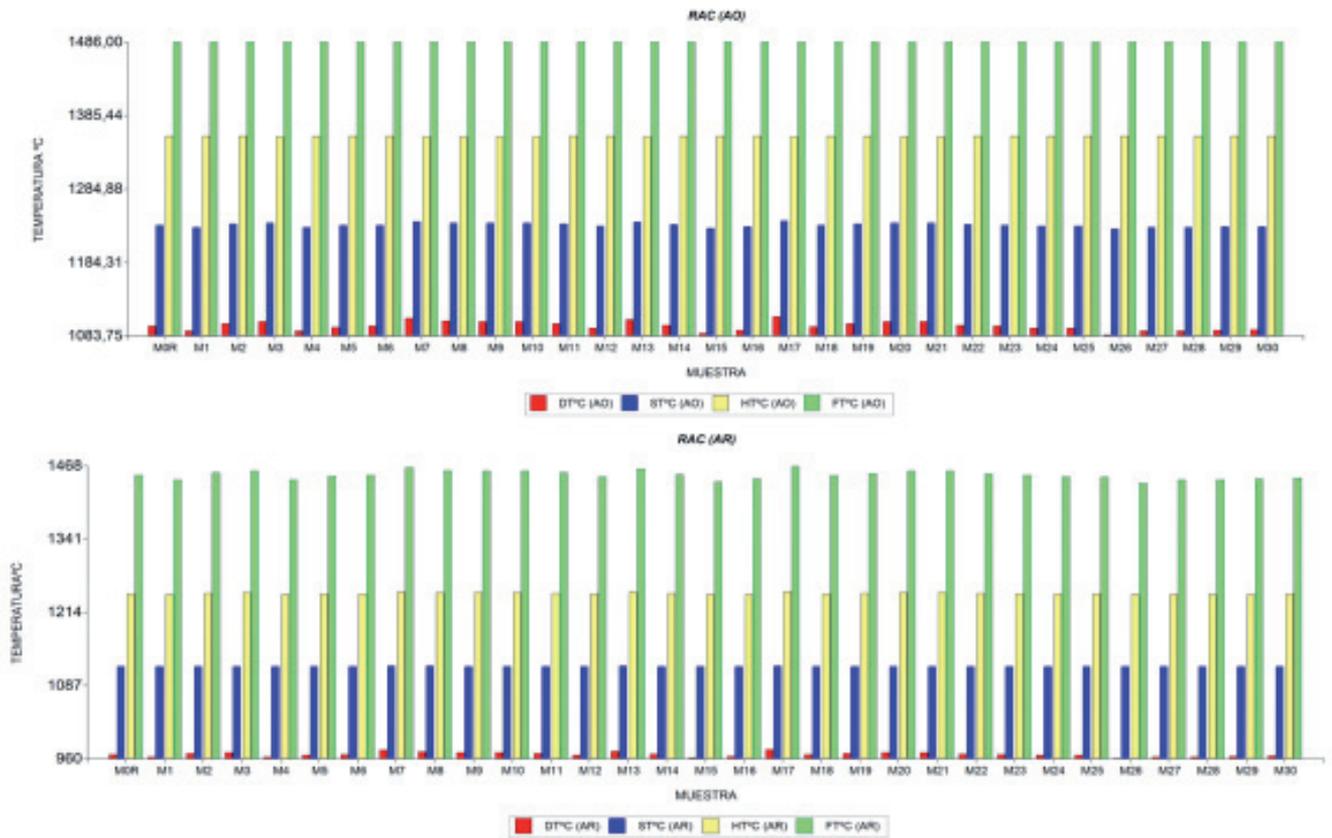


Figura 3. Resultados del análisis de fusibilidad de las cenizas fortificadas de RAC Tucumán, Argentina, trabajando en AO y AR.

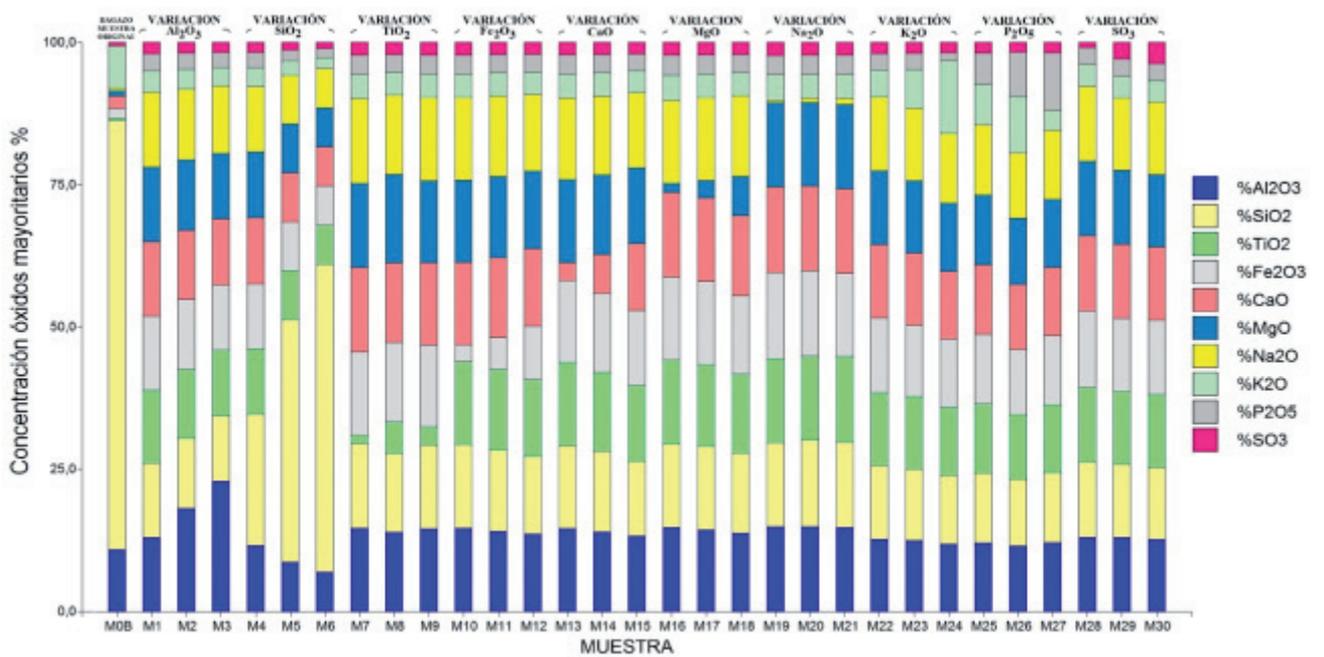


Figura 4. Variación de la concentración de óxidos mayoritarios en cenizas fortificadas de bagazo para este estudio. Elaboración propia.

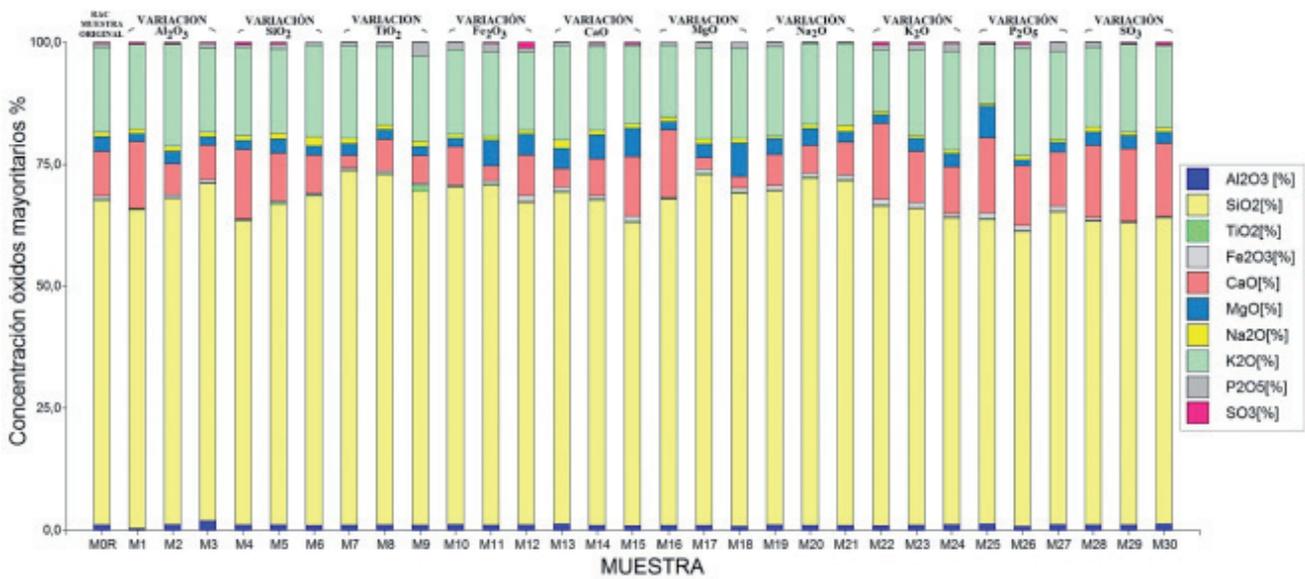


Figura 5. Variación de la concentración de óxidos mayoritarios en cenizas fortificadas de RAC para este estudio. Elaboración propia.

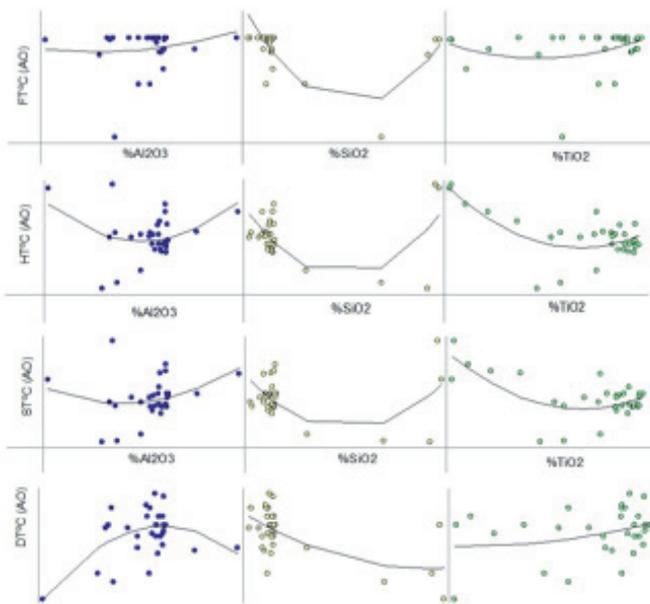


Figura 6. Sensibilidad en AO de CA en la fusibilidad de cenizas fortificadas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

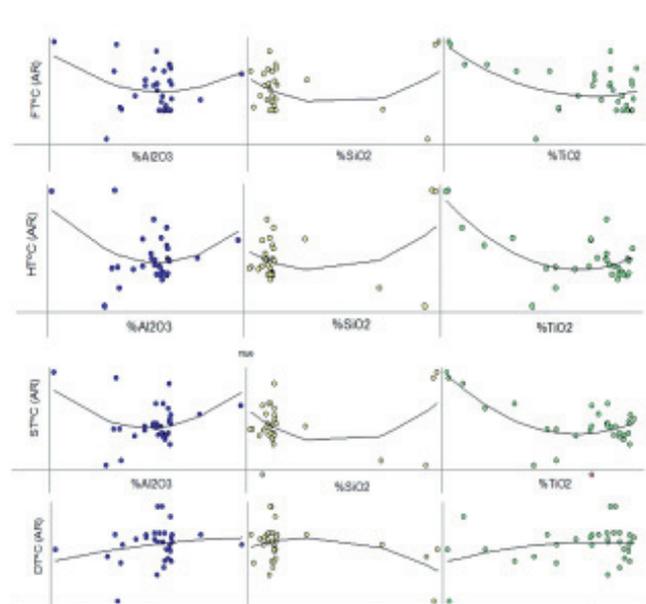


Figura 7. Sensibilidad en AR de CA en la fusibilidad de cenizas fortificadas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

ron positivas con el aumento de la concentración de este óxido. Con respecto al $\%SiO_2$, el aumento de éste influyó negativamente en DT para el rango analizado (7,66% a 54,25%). ST, HT y FT también presentaron correlaciones negativas para bajas concentraciones de $\%SiO_2$ (hasta 31%) y aumentos de las temperaturas para concentraciones mayores. En cuanto a $\%TiO_2$ en cenizas, su influencia fue similar a la observada en AO, excepto en el caso de FT, donde se observó una correlación negativa en todo el rango analizado.

La Figura 8 muestra la sensibilidad de los CA en la fusibilidad de las cenizas de RAC fortificadas bajo condiciones de AO. El $\%Al_2O_3$ presentó una correlación positiva con DT y ST en todo el rango analizado (0,3% a 1,6%),

no obstante HT presentó una correlación ligeramente positiva hasta alrededor de 0,95% del óxido en ceniza, luego se tornó negativa. En cuanto al $\%SiO_2$, se observaron aumentos ligeros en DT y ST en el rango analizado (48,90% a 62,20%), pero HT mostró una correlación negativa. FT no presentó variaciones con el aumento de este óxido. Por otro lado, el aumento de concentración de $\%TiO_2$ resultó en incrementos en DT y ST; y una correlación negativa para HT. Al igual que en los casos anteriores, FT no mostró cambios con el aumento de $\%TiO_2$.

La Figura 9 muestra la sensibilidad de los CA en la fusibilidad de las cenizas fortificadas de RAC bajo condiciones de AR. Se observa cómo DT, HT y FT mantuvieron una correlación positiva con el aumento de $\%Al_2O_3$,

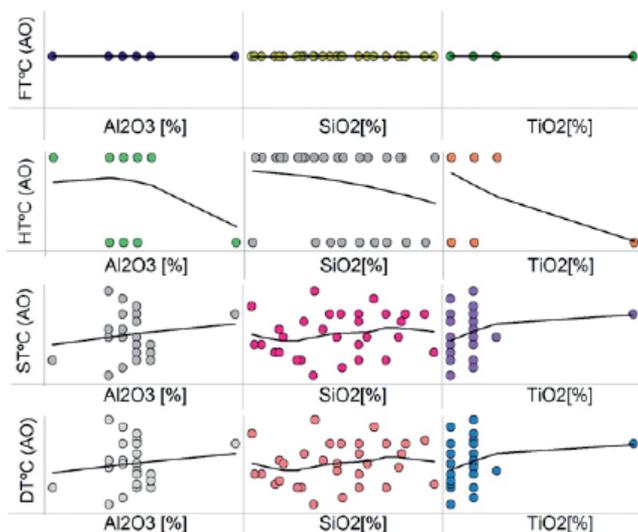


Figura 8. Sensibilidad en AO de CA en la fusibilidad de cenizas fortificadas de RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

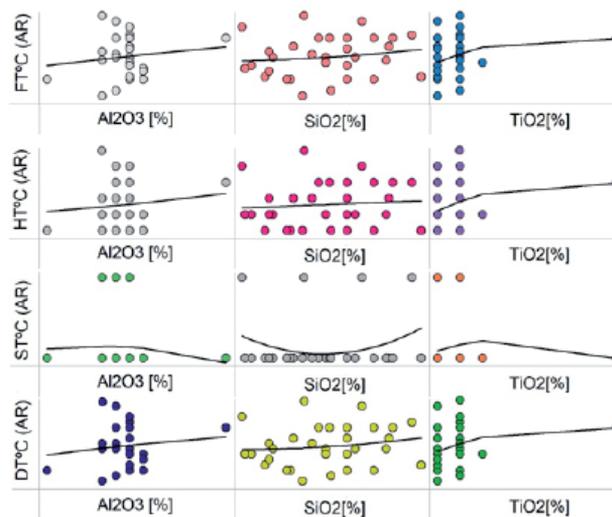


Figura 9. Sensibilidad en AR de CA en la fusibilidad de cenizas fortificadas de RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

mientras ST presentó una tendencia a disminuir en el rango analizado. En cuanto al %SiO₂, se observaron aumentos ligeros en DT, HT y FT, mientras que ST mostró una correlación negativa para bajas concentraciones del óxido (hasta 55,5%), y aumentos de temperatura para mayores concentraciones. Por otro lado, el aumento en la concentración de %TiO₂ provocó incrementos en DT, HT y FT; y correlación negativa de ST para elevadas concentraciones del óxido.

La Figura 10 muestra la sensibilidad de los CB sobre la fusibilidad de cenizas fortificadas de bagazo trabajando en AO. Se observó una correlación positiva entre DT y la mayoría de los CB en cenizas de bagazo, a excepción del %K₂O, que presentó un aumento en DT hasta aproximadamente el 5,4% del óxido en ceniza; luego la

correlación fue negativa. En general, ST, HT y FT resultaron elevadas para bajas concentraciones de CB, a excepción también del %K₂O, que presentó menores temperaturas para bajas concentraciones y con correlaciones positivas con el aumento de la concentración de este óxido.

La Figura 11 muestra la sensibilidad de los CB sobre la fusibilidad de cenizas fortificadas de bagazo trabajando en AR. En general, se observó que el aumento de los CB provocó incrementos en DT en el rango de concentraciones evaluado. No se apreciaron variaciones en DT con el aumento de %K₂O en AR. Para las mayores y menores concentraciones de CB del rango evaluado, se observaron las mayores temperaturas ST, HT y FT, con disminuciones de éstas para concentraciones logradas en la mitad del rango. Para el caso del %K₂O, se observó una

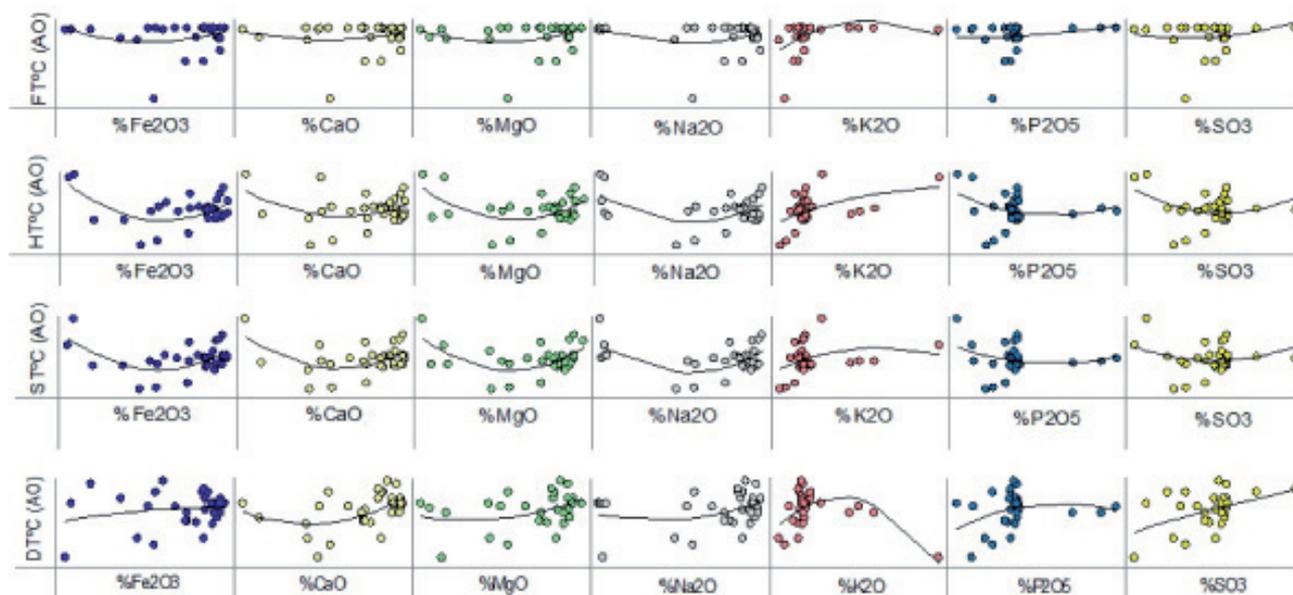


Figura 10. Sensibilidad en AO de CB en la fusibilidad de cenizas fortificadas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

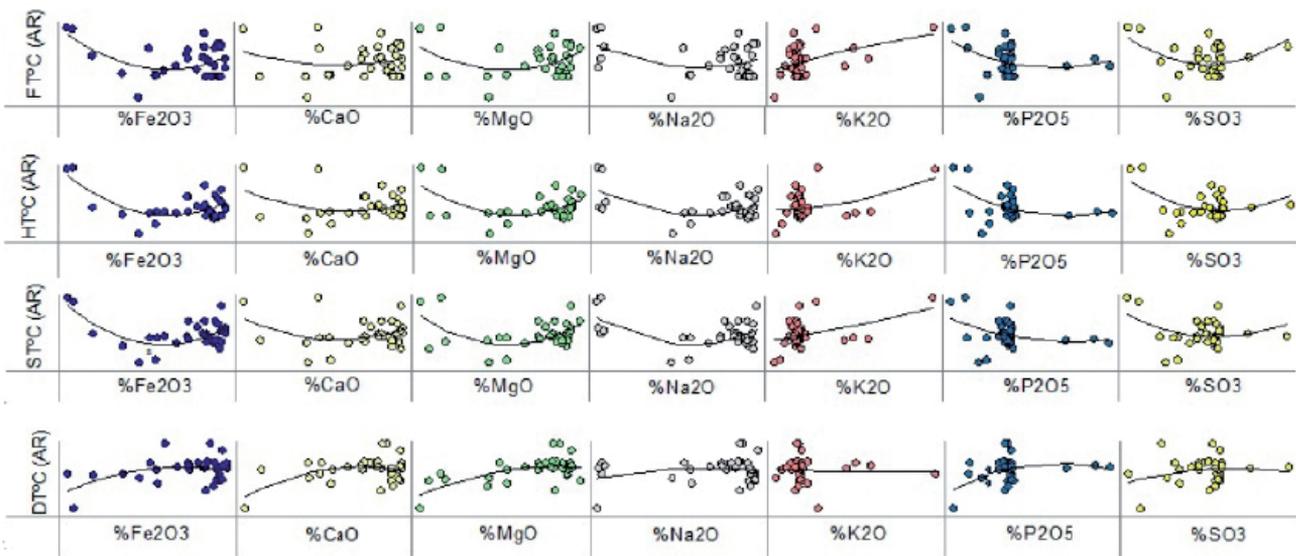


Figura 11. Sensibilidad en AR de CB en la fusibilidad de cenizas fortificadas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

correlación positiva de estas temperaturas con el incremento del óxido en ceniza.

La Figura 12 muestra los resultados del estudio de sensibilidad de los CB en la fusibilidad de cenizas fortificadas de RAC bajo condiciones de AO. Se observó que para valores medios de $\%Fe_2O_3$ se obtuvieron temperaturas elevadas de DT y ST, mientras que en los extremos del rango evaluado (0,10% a 1,10%) se obtuvieron las temperaturas más bajas. Se encontraron correlaciones negativas entre $\%CaO$ y las temperaturas DT y ST. Además, se encontró una correlación positiva de HT con el aumento de este óxido y no se observaron variaciones en FT con cambios en la concentración de CB.

La Figura 13 muestra los resultados del estudio de sensibilidad de los CB en la fusibilidad de las cenizas fortificadas de RAC bajo condiciones de AR. Se obser-

vó que para concentraciones medias de $\%Fe_2O_3$ (0,6%) y $\%MgO$ (3,5%), se obtuvieron las mayores temperaturas de DT, ST, HT y FT. Además, se encontró una correlación negativa entre $\%CaO$ y estas temperaturas. Es importante destacar la correlación negativa existente entre $\%K_2O$ y DT, ST, HT y FT, ya que a concentraciones elevadas de este componente, las temperaturas mencionadas registraron valores más bajos.

La Figura 14 muestra el gráfico “biplot” del ACP; en ella se observa la correlación negativa del $\%SiO_2$ respecto a DT en AO. Además, muestra la independencia de este óxido sobre ST y HT. Mientras tanto, existe un aporte positivo (principalmente del $\%Al_2O_3$, $\%CaO$ y $\%MgO$) sobre DT. Se destaca la correlación positiva de $\%K_2O$ sobre HT, ST y en menor medida sobre FT. Además, se observa la baja influencia en esta atmósfera del $\%K_2O$ sobre DT.

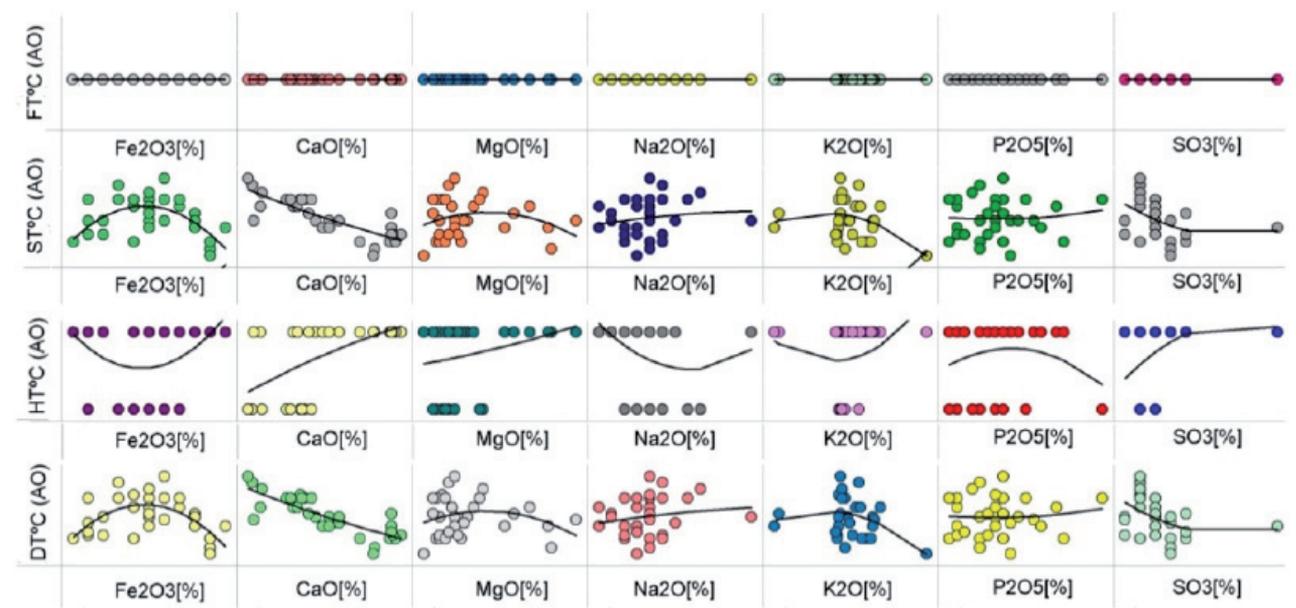


Figura 12. Sensibilidad en AO de CB en la fusibilidad de cenizas fortificadas de RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

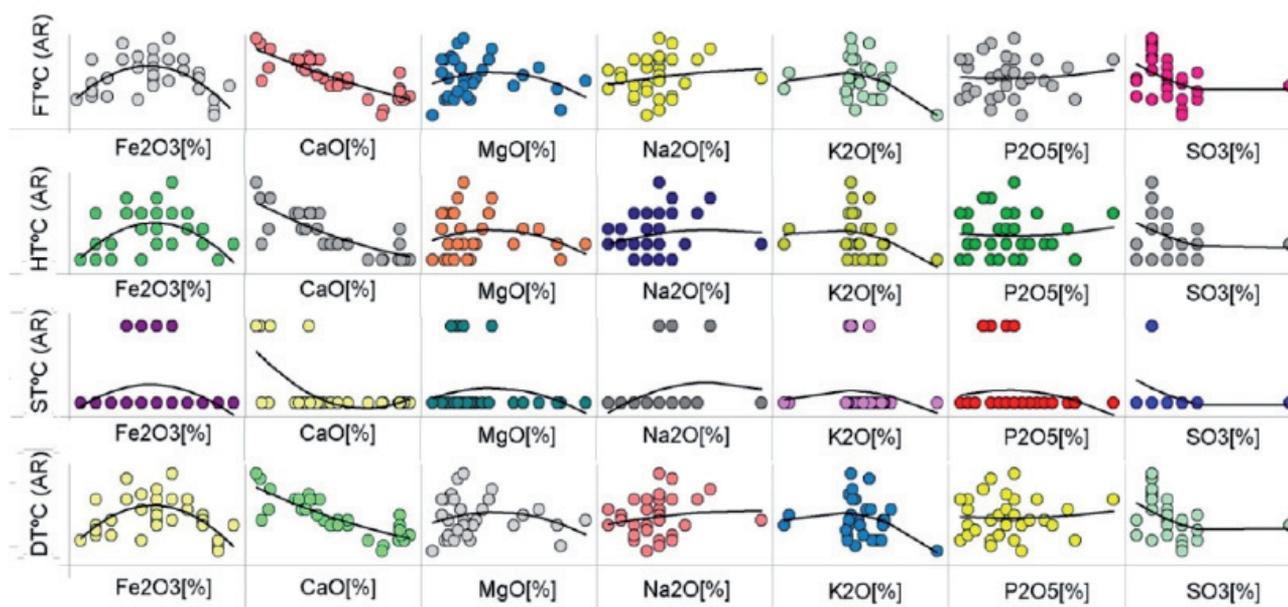


Figura 13. Sensibilidad en AR de CB en la fusibilidad de cenizas fortificadas de RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

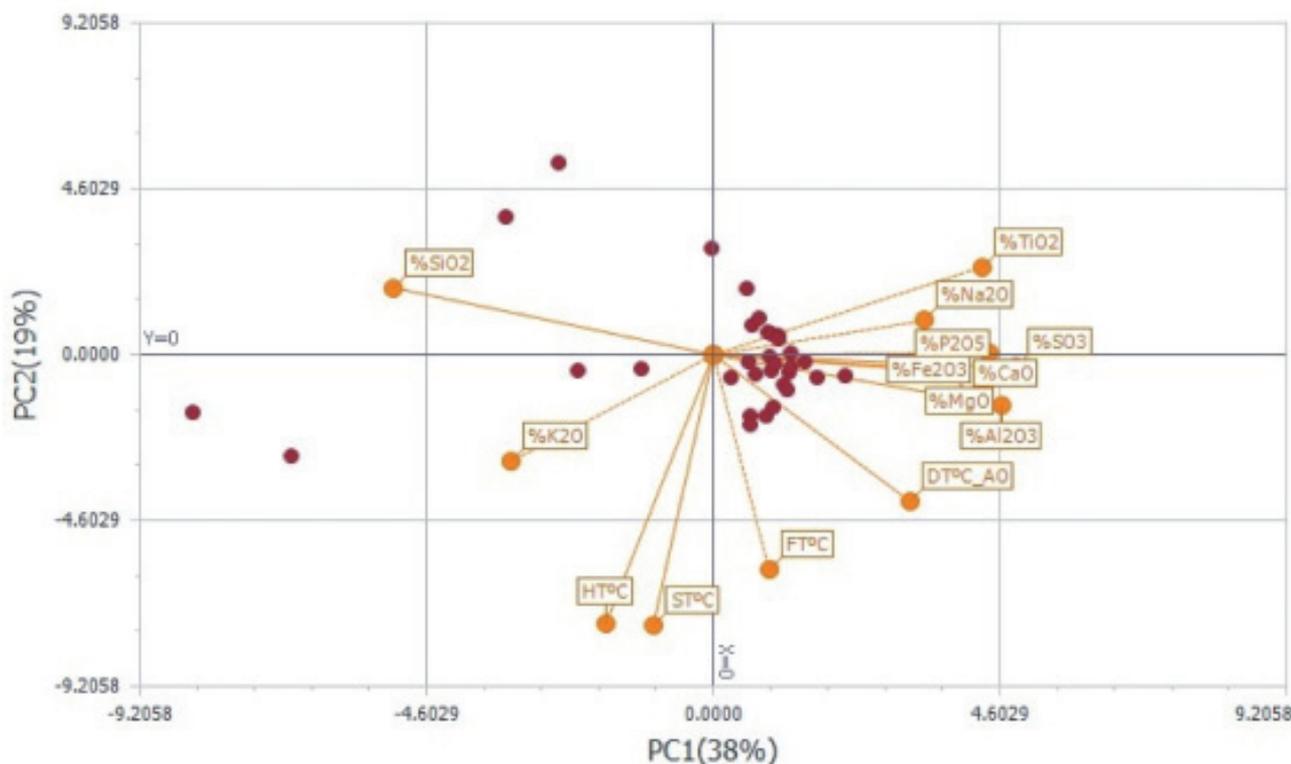


Figura 14. Incidencia de óxidos mayoritarios en la fusibilidad en AO de cenizas fortificadas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

La Figura 15 muestra la correlación negativa del $\%SiO_2$ y $\%K_2O$ respecto a DT para cenizas fortificadas de bagazo trabajando en AR. Se observó que para este tipo de atmósfera existen correlaciones positivas entre ST, HT y FT, en relación a la concentración de $\%K_2O$. Estas últimas temperaturas resultaron independientes de las concentraciones de $\%SiO_2$.

La Figura 16 muestra una correlación positiva del $\%Al_2O_3$, $\%P_2O_5$, $\%Ti_2O$, $\%SiO_2$ y $\%Na_2O$ con DT y ST e independencia de $\%Fe_2O_3$, $\%MgO$ y $\%K_2O$ respecto a las temperaturas mencionadas para cenizas de RAC trabajando en AO. Además, se determinó una correlación negativa del $\%CaO$ y $\%SO_3$ sobre DT y ST. Para los rangos de concentraciones evaluados de CB, no presentaron influencia sobre FT.

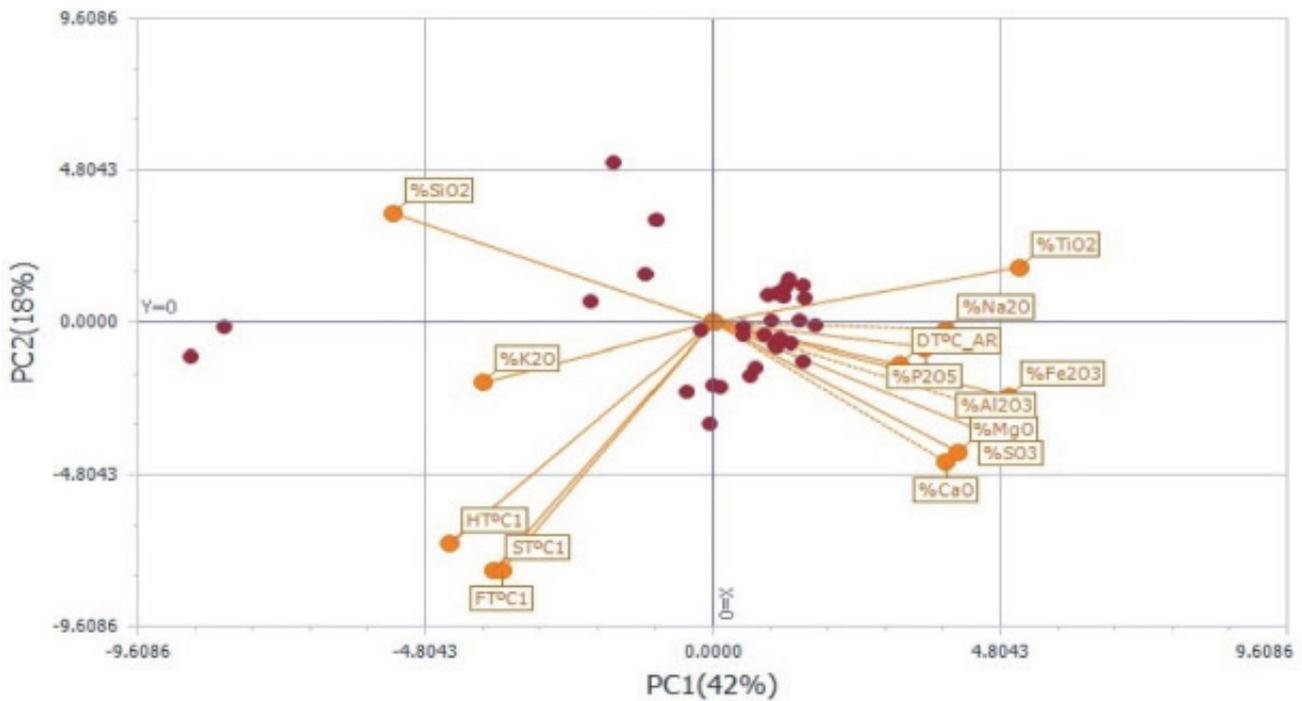


Figura 15. Incidencia de óxidos mayoritarios en la fusibilidad en AR de cenizas fortificadas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

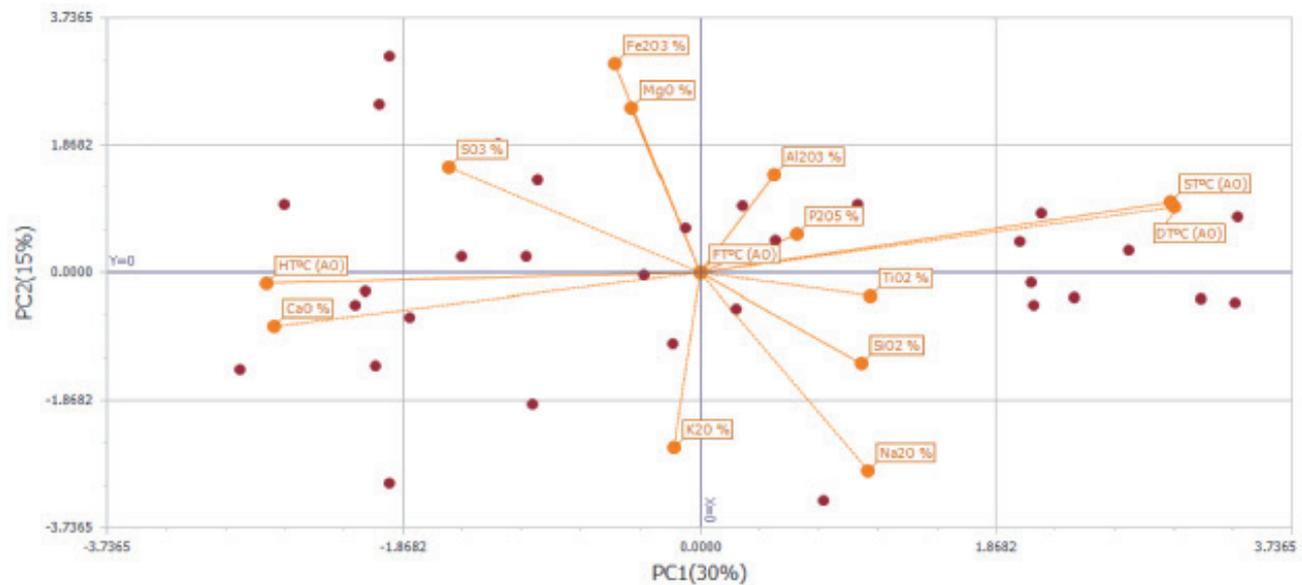


Figura 16. Incidencia de óxidos mayoritarios en la fusibilidad en AO de cenizas fortificadas de RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se demostró que el comportamiento de las cenizas depende principalmente de su composición, por lo que resulta imprescindible su caracterización química para evaluar el desempeño de éstas en el interior del hogar de una caldera de vapor. En el presente estudio se encontró que las cenizas de bagazo de caña de azúcar, trabajando en condiciones de AO, presentaron correlaciones negativas entre DT y %SiO₂ para el rango de concentración analizado (7,66% a 54,25%). Las temperaturas ST,

HT y FT dependerán de la concentración de %SiO₂. Se observó que desde 7,66% hasta 20,00% la dependencia fue negativa; mientras que para mayores concentraciones (hasta 54,25%), la correlación fue positiva. Con el aumento de la concentración de %K₂O en cenizas de bagazo en AO (entre 1,92% y 3,71% aprox.), se observó una correlación positiva con DT. Para mayores concentraciones de %K₂O (hasta 9,35%), se observó una correlación negativa para esta misma temperatura. El aumento de %Fe₂O₃, %CaO y %MgO en cenizas de bagazo trabajando en AR contribuyó positivamente en DT, mientras que %K₂O no

presentó influencia para el rango de concentraciones analizado (1,92% a 9,35%). Además, en AR se encontró una correlación negativa para el %SiO₂ con respecto a DT y mostró una influencia positiva de %K₂O en ST, HT y FT. Las cenizas de RAC trabajando en AO poseen una correlación positiva entre %Al₂O₃, %SiO₂ y %Ti₂O con respecto a DT y ST. El %Fe₂O₃ presentó correlaciones variables en DT y ST según las concentraciones del óxido (entre 1,19% y 6,43%, la influencia resultó positiva, mientras que entre 6,43% y 14,06% fue negativa). Asimismo, para AO se encontraron correlaciones negativas entre %CaO y las temperaturas DT y ST. Se encontró una influencia negativa del %K₂O en las temperaturas DT, ST, HT y FT, operando en AR. Estos resultados señalan la influencia de los CB en las propiedades de fusibilidad de las cenizas de RAC en condiciones de AR, y subrayan la importancia de considerar las concentraciones de %Fe₂O₃, %MgO, %CaO y %K₂O para controlar las temperaturas en los procesos de combustión y manejo de cenizas.

■ AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dr. Norma Kamiya, la Fca. Gabriela Juárez y la Lic. Raquel Dellmans, de la Sección Química de los Productos Agroindustriales de la EEAOC, por su colaboración en las determinaciones de los elementos químicos presentes en las cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar.

■ BIBLIOGRAFÍA CITADA

- ASTM D1857-04. 2010.** Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash. American Society for Testing and Materials (ASTM). 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. USA.
- Balzarini, M.; C. Bruno; M. Córdoba y I. Teich. 2015.** Herramientas en el Análisis Estadístico Multivariado. Escuela Virtual Internacional CAVILA. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Baxter, L. L.; T. R. Miles; T. R. Miles Jr.; B. M. Jenkins; T. Milne; D. Dayton; R. W. Bryers and L. L. Oden. 1998.** The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences. *Fuel Processing Technology* 54: 47-78.
- 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.
- Fernández Llorente, M. J. y J. E. Carrasco García. 2005.** Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion. *Revista Fuel* 84, pp. 1893-1900.
- Golato, M. A.; E. A. Feijóo; F. J. Franck Colombres; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2017.** Estudio preliminar del aprovechamiento de los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar como combustible adicional para calderas bagaceras de Tucumán (Argentina). *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 94 (2): 21 - 31.
- Golato, M. A.; G. Zamora Rueda; C. Gutierrez; 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. *Revista industrial y agrícola de Tucumán.* Tomo 98 (2): 21-27.
- Golato, M. A.; C. E. Gutierrez; G. del H. Zamora Rueda; G. Juárez; N. Kamiya; D. Paz y M. Ruiz. 2023.** Características de las cenizas de bagazo y de residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar (RAC) de Tucumán, Argentina. *Revista industrial y agrícola de Tucumán (RIAT); en prensa.*
- Liu, B.; Q. He; Z. Jiang; R. Xu and B. Hu. 2013.** Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Hamnkou Road, Nanjing, Jiangsu, PR China. *Fuel* 105: pp. 293-300.
- Melissari, B. 2012.** Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica (10): 69-82.
- Melissari, B. 2014.** Ash related problems with high alkali biomass and its mitigation - Experimental evaluation. Memoria Investigaciones en Ingeniería 12. ISSN 2301-1092; ISSN (En línea) 2301-1106. Consultado 20/04/23.
- Mistretta, M. 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. *Revista industrial y agrícola de Tucumán* 96 (1): 49 - 54.
- Niu, Y.; H. Tan; X. Wang; Z. Liu; H. Liu; Y. Liu y T. Xu. 2010.** Study on fusion characteristics of biomass ash. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University. Shaanxi, China. *Bioresource Technology* 101: 9373-9381.
- Standard methods for examination of water and wastewater (SMWW). 2017.** Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method Bibliography. Part 4500-P C. 23rd. Edition: 4-161/4-162.