



IV CONFERENCIA INTERNACIONAL DE DESARROLLO ENERGÉTICO SOSTENIBLE

Lixiviación de residuos agrícolas cañeros para reducir corrosión en calderas de vapor de altos parámetros

Leaching of sugarcane agricultural straw to reduce corrosion in high- parameter steam generators

Lizet Rodríguez-Machín¹, Manuel A. Rubio-Rodríguez², Manuel Paulino-Fleites
Campos³, Michel Fernández-Velázquez⁴

1- Lizet Rodríguez-Machín. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. E-mail: lizetr@uclv.edu.cu

2- Manuel A. Rubio-Rodríguez. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. E-mail: ManuelRR@uclv.edu.cu

3- Manuel Paulino-Fleites Campos. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. E-mail: mfcampos@uclv.cu

4- Michel Fernández-Velázquez. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. E-mail: mfvelazquez@uclv.cu

Resumen:

- **Problemática:** Limitaciones de un mayor aprovechamiento de los residuos agrícolas cañeros (RAC) mezclado con el bagazo de caña usados como combustible debido al insuficiente conocimiento de los efectos en la corrosión de los metales de las calderas de vapor de bioeléctricas por el contenido en álcalis y cloruros.
- **Objetivo(s):** Evaluar el impacto del lavado de los RAC en las características químico-físicas de estos residuos, que tienen mayor influencia en los fenómenos de combustión y corrosión en calderas.
- **Metodología:** Se obtienen las cenizas de ambas biomásas siguiendo la norma ASTM E1755-01 (Reapproved 2007). Se lixivian los RAC, previamente



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
**LIXIVIACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS CAÑEROS PARA REDUCIR CORROSIÓN EN
CALDERAS DE VAPOR DE ALTOS PARÁMETROS**

preparados, en relación 1200 ml/g biomasa original, tiempo de contacto de 10 minutos, temperatura ambiente y agitación a 600 r.p.m..

- **Resultados y discusión:** (principales resultados obtenidos).
- **Conclusiones:** Las modificaciones en las condiciones experimentales de la lixiviación no representaron cambios significativos en los resultados del proceso. El lixiviado de los RAC reduce los principales elementos que influyen en la corrosión de los aceros, el K en 85,34% y el Ca en 19,28%.

Abstract:

- **Problem:** *Limitations of greater use of sugarcane agricultural straw (SCS) mixed with sugarcane bagasse used as fuel due to insufficient knowledge of the effects on the corrosion of metals in bioelectric steam boilers due to the alkali and chloride content.*
- **Objective(s):** *To evaluate the impact of RAC washing on the chemical and physical characteristics of these residues, which have the greatest influence on combustion and corrosion phenomena in boilers.*
- **Methodology:** *Ashes are obtained from both biomasses following the ASTM E1755-01 standard (Reapproved 2007). The previously prepared RAC are leached in a ratio of 1200 ml/g of original biomass, contact time of 10 minutes, room temperature and stirring at 600 rpm.*
- **Results and discussion:**
- **Conclusions:** *Modifications to the experimental leaching conditions did not significantly alter the process results. SCS leaching reduced the main elements that influence steel corrosion: K by 85.34% and Ca by 19.28%.*

Palabras Clave: Residuos agrícolas cañeros; Bagazo de caña; Pretratamiento; Corrosión; Aceros

Keywords: Sugarcane agricultural straw; Sugarcane bagasse; Pretreatment; Corrosion; Superheaters



1. Introducción

En Cuba existen diferentes tipos de biomasa con posibilidades económicas de empleo, entre las más importantes están: el bagazo y los residuos agrícolas de la caña de azúcar, la leña y el raleo de los bosques, el marabú, la cascara de arroz y los residuos del café.

AZCUBA ha planteado una estrategia de desarrollo de 17 centrales azucareros que incrementaran sustancialmente los parámetros de su ciclo termodinámico y su potencial de molido convirtiéndolos en centrales térmicas que se ha dado en llamar bioeléctricas (Sánchez and Sánchez, 2014).

La versatilidad de los residuos de caña de azúcar (principalmente bagazo y paja) para la producción de papel, energía y biocombustibles ha sido ampliamente ilustrada en la literatura (Loh et al., 2013). La paja caña es una parte sustancial de los residuos del cultivo de la caña, compuesta de hojas y topes (Franco et al., 2013), y representa un tercio de la masa de la planta de caña de azúcar (140 kg RAC seco por 1000 kg de caña de azúcar base seca) (Alonso Pippo et al., 2011). El contenido de energía en los RAC varía entre 17,4 y 17,7 MJ/kg (Linero, 2005, Peláez Samaniego, 2007).

Se han identificado tres peligros fundamentales al emplear los RAC: el incremento de la corrosión, el incremento de las incrustaciones y la recarga del sistema de limpieza. Estos pueden identificarse a través de la formación de aglomerados fundidos o parcialmente fundidos y depósitos de escoria a las altas temperaturas de la parrilla y la formación de depósitos de ceniza a temperaturas más bajas en la sección de convección produciendo pérdida de eficiencia y capacidad de la caldera aumentando la corrosión de las superficies metálicas (Melissari, 2012, Funcia, 2015).

La composición química de las cenizas del combustible resulta muy importante por el impacto sobre los metales de las calderas, de la mayor parte de los elementos que la componen, en particular cuando se opera a altos parámetros de vapor. Los RAC no pasan por el proceso de lixiviación que experimentan los tallos por la repetida imbibición con agua y compresión mientras se muele la caña, ya que se disuelve en el guarapo buena parte de las sales minerales que forman la ceniza por combustión y no aparecen en las fibras del bagazo al final de la molienda.

La presencia de cloro y azufre en los RAC (aunque en pequeñas cantidades) es muy importante a los efectos de los procesos de corrosión en los metales de las calderas. Lo reportado además revela que es mayor la presencia de estos elementos químicos en los



RAC que en el bagazo. El resto de los elementos químicos varía en rangos similares en los dos combustibles (Rubio-González et al., 2021, Valdés, 2010). Por esta razón se plantea existen limitaciones de un mayor aprovechamiento de los residuos agrícolas cañeros (RAC) mezclado con el bagazo de caña usados como combustible debido al insuficiente conocimiento de los efectos en la corrosión de los metales de las calderas de vapor de bioeléctricas por el contenido en álcalis y cloruros.

Rodríguez-Machín et. al., 2018 estudiaron el efecto de la lixiviación con ácido cítrico sobre la fracción de cenizas removida y los cambios resultantes en el comportamiento de degradación térmica de los RAC y el bagazo de caña de azúcar. Estos resultados se compararon con otros agentes de lixiviación conocidos, como H_2SO_4 , HCl y agua. Se evaluó la desmineralización mediante análisis inmediato y elemental, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y análisis termogravimétrico. Para el ácido cítrico y las soluciones de lixiviación de referencia, la fracción másica de cenizas removidas se ubicó en un rango estrecho (entre 38,9 y 54,1%), independientemente del tipo de biomasa y las condiciones de lixiviación (temperatura y tiempo) analizadas. El análisis bifactorial no paramétrico de los resultados reveló que la naturaleza de la solución de lixiviación y su interacción con el tiempo de contacto son cruciales al desmineralizar tanto los RAC como el bagazo. Curiosamente, no se encontró significancia de la temperatura ni de su interacción con el tiempo de contacto (Rodríguez-Machín et al., 2018).

Como principal objetivo de la presente investigación se propone Evaluar el impacto del lavado de los RAC en las características químico-físicas de los residuos agrícolas cañeros que mayor influencia tienen en los fenómenos de combustión y corrosión en calderas.

2. Metodología

2.1- Preparación de las muestras de biomasa, las cenizas y las mezclas bagazo-RAC

Los RAC y el bagazo de caña de azúcar se recolectaron en el ingenio azucarero "Empresa azucarera Héctor Rodríguez". Los RAC se muestrearon en la estación de limpieza de caña de la propia empresa azucarera, mientras que el bagazo se colectó en la casa de almacenamiento. A partir de entonces, ambas muestras se secaron al aire



durante tres días a temperatura ambiente, luego se trituraron en un molino Retsch con tamiz 2 mm. Las biomásas se almacenan posteriormente a temperatura ambiente en bolsas plásticas selladas herméticamente.

2.2- Caracterización de la biomasa

Las muestras de bagazo y RAC se analizaron de manera idéntica en términos de determinación del contenido de humedad (DIN EN ISO 18134-3) y del contenido de cenizas (ASTM E1755 – 01 (Reapproved 2007)). En las determinaciones el bagazo tiene una humedad de 4,39% y el contenido de cenizas de 2,61%, mientras que los RAC tienen 5,58% y 4,91%, respectivamente.

2.2- Descripción del equipamiento empleado para la lixiviación de los RAC

En este estudio, cargas de 100 g de RAC se tratan con la solución de lixiviación (agua desionizada, conductividad 0,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en relación 1200 ml/g RAC para reducir la fracción másica de cenizas de la biomasa original y comparar con resultados obtenidos por (Rodríguez-Machín et al., 2018). Se estudió para las siguientes condiciones experimentales: tiempo de contacto de 10 minutos y temperatura ambiente. La dispersión de biomasa se removió con un agitador eléctrico a 600 r.p.m., ver esquema del proceso en la figura 1.

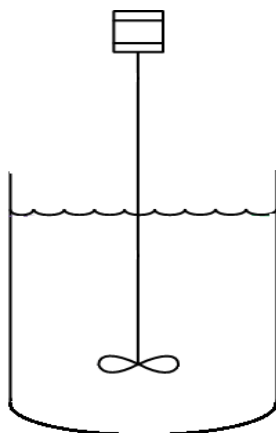


Figura 1. Esquema del equipamiento empleado en la lixiviación. Fuente: elaboración propia.

Después de agitar, la muestra se filtró a través de un tamiz 0,1 mm. Finalmente, la muestra se secó en una estufa de convección natural a 104 ± 1 °C durante 10 h.



2.3- Determinación de los elementos inorgánicos

La determinación de los elementos inorgánicos presentes en las cenizas se contrataron al Centro de Estudios Avanzados de Cuba (CEA) empleando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva, modelo EDX-800HS del fabricante Shimadzu y el Software: EDX Series EDX-720/800HS.

3. Resultados y discusión

3.1- Lixiviado de los RAC

Se realizaron 6 corridas para el lixiviado de los RAC, el promedio de los resultados se presentan en la tabla 1.

Biomasa	Cenizas RACs.l., % peso b.s	Rendim. de la lixiviación, % peso b.s.	Pérdida de masa por la lixiviación, % peso b.s.	Cenizas RAC _{lix.} , % peso b.s	Cenizas eliminadas, % peso b.s.
RAC	4,91±0,059	93,811±1,185	6,189±1,185	4,84±0,018	20,646±1,712
	b.s. - base seca	s.l. - sin lixiviar		lix. - lixiviada	

Tabla 1. Resultados del lixiviado de los RAC con desviaciones estándar. Fuente: elaboración propia.

3.2- Obtención de las cenizas de bagazo y RAC, en condiciones controladas, para conformar las mezclas

Después de caracterizadas biomazas se obtuvieron las cenizas en condiciones controladas siguiendo el procedimiento de la norma ASTM E1755-01 (Reapproved 2007) y estableciendo la rampa de temperatura señalada en la norma, para lo cual se emplearon cápsulas de porcelanas de 500 ml y una mufla Carbolite Gero type11/18. La composición elemental de las cenizas de ambas biomazas se presenta en la tabla 2. El sistema utilizado no detecta a los elementos más ligeros (Z=1 hasta Z=11).

Cenizas	Elementos químicos										
	Si	Ca	K	Fe	P	S	Mn	Ti	Zn	Cr	Cu
Bagazo	62,770	14,289	13,262	4,208	2,510	1,912	0,429	0,306	0,095	0,094	0,064
RAC	49,980	27,942	15,403	0,233	3,964	1,799	0,243	0,036	0,039	-	0,032

Tabla 2. Principales elementos en cenizas de las biomazas, % peso. Fuente: elaboración propia.



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
LIXIVIACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS CAÑEROS PARA REDUCIR CORROSIÓN EN
CALDERAS DE VAPOR DE ALTOS PARÁMETROS

Cenizas	Elementos químicos								
	Si	Ca	K	S	Fe	Cr	Mn	Zn	Cu
RAC _{lix.}	69,239	22,556	2,258	1,381	0,168	0,144	0,138	0,035	0,020
% eliminación	+38,533	19,276	85,341	23,235	27,897	nd	56,790	10,256	37,500

nd: no detectado en la biomasa original

Tabla 3. Composición elemental de las cenizas de los RAC lixiviados, % peso y el porcentaje de eliminación de cada elemento respecto a la no lixiviada, %. Fuente: elaboración propia.

En los RAC lixiviados se detectan elementos que no fueron identificados en la biomasa original, lo cual se puede atribuir a errores de detección del método de análisis empleado. Los elementos mayoritarios en ambas cenizas son el Si, Ca y K, en el caso de los RAC, éstos aportan el 93,325% de la masa de la muestra (elementos $Z > 11$), mientras que en las cenizas de bagazo aportan el 90,321%.

3.3- Conformación de las mezclas para los estudios de corrosión

Las mezclas de cenizas se conformaron en cantidad de 33 g. Los tipos de mezclas y las proporciones de cada ceniza se conformaron teniendo en cuenta la humedad promedio en el país, 50% para el bagazo y 25% para los RAC (Rubio-González, *et.al.*, 2021) y el porciento de cenizas determinado de acuerdo a la norma, se presentan en la tabla 3.

Mezcla bagazo-RAC	Cantidad de cenizas de bagazo, g	Cantidad de cenizas de RAC, g	Cantidad de cenizas de RAC _{lix.} , g
BGS90	25,1229	7,8770	
BGS70	14,9364	18,0635	
BGSL70	15,0539		17,9460

Nota: se emplean cuatro cifras después de la coma porque se empleó una balanza analítica.

Tabla 3. Cantidad de cenizas de cada biomasa empleada en las mezclas. Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

- 1- Las modificaciones en las condiciones experimentales de la lixiviación no representaron cambios significativos en los resultados del proceso, permitieron un 20,646% de eliminación de cenizas.
- 2- El método de obtención de las cenizas en condiciones controladas es factible para obtener muestras para estudios de corrosión.
- 3- El principal elemento eliminado de las cenizas de los RAC fue el K, lo cual es importante teniendo en cuenta su influencia en los procesos de corrosión de metales.



5. Referencias bibliográficas

(cada referencia debe estar ordenada alfabéticamente y numerada).

- ALONSO PIPPO, W., LUENGO, C. A., ALONSOAMADOR, L., ALBERTERIS, M., GARZONE, P. & CORNACCHIA, G. 2011. Energy Recovery from Sugarcane-Trash in the Light of 2nd Generation Biofuels. Part 1: Current Situation and Environmental Aspects. *Waste Biomass Valor*, 2, 1–16.
- FRANCO, H. C. J., PIMENTA, M. T. B., CARVALHO, J. L. N., MAGALHÃES, P. S. G., ROSSELL, C. E. V., BRAUNBECK, O. A., VITTI, A. C., KÖLLN, O. T. & ROSSI NETO, J. 2013. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. *Scientia Agricola*, 70, 305-312.
- FUNCIA, I. 2015. *Predicción del comportamiento de compuestos inorgánicos en parrilla de combustión.*, Universidad de La Rioja. Tesis Maestría. Departamento Ingeniería Mecánica. .
- LINERO, F. A. B. L., H. M. I. 2005. Integração BIG/GT - Usina. Geração de energia por biomassa: bagaço e palha de cana. *Seminário alternativas energéticas a partir da cana-de-açúcar*. Centro de tecnologia canavieira - CTC, Piracicaba, São Paulo.
- LOH, Y. R., SUJAN, D., RAHMAN, M. E. & DAS, C. A. 2013. Sugarcane bagasse—The future composite material: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 75, 14-22.
- MELISSARI, B. 2012. Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, No.10,.
- PELÁEZ SAMANIEGO, M. R. 2007. Uso de biocombustível da pirólise rápida da palha de cana em um motor de ciclo Otto. Mestrado, 100 p.
- RODRÍGUEZ-MACHÍN, L., ARTEAGA-PÉREZ, L. E., PÉREZ-BERMÚDEZ, R. A., CASAS-LEDÓN, Y., PRINS, W. & RONSSE, F. 2018. Effect of citric acid leaching on the demineralization and thermal degradation behavior of sugarcane trash and bagasse. *Biomass Bioenergy*, 108, 371-380.
- RUBIO-GONZÁLEZ, A. M., RODRÍGUEZ-MACHÍN, L., ITURRIA QUINTERO, P. J., LARIOT SÁNCHEZ, C. A., RUBIO RODRÍGUEZ, M. A., QUIROGA FERNÁNDEZ, D. A., PILOTO RODRÍGUEZ, R., DUFFUS SCOTT, A., CABRERA CASTELLANOS, L., LORENZO GONZÁLEZ, A., BRITO SAUBANEL, Á. L., RIVAS GUTIÉRREZ, A. & GARCÍA LOVELLA, Y. 2021. *Estudio teórico conceptual sobre la corrosión en zonas de alta temperatura de generadores de vapor de altos parámetros*, Editorial Feijóo.
- SÁNCHEZ, L. & SÁNCHEZ, S., O. 2014. Fuentes renovables de energía. Abre camino de la actualización. *Periódico Granma*.
- VALDÉS, A. 2010. Los residuos agrícolas de la cosecha cañera (RAC). Centro Gerencia. *Programa y Proyectos Priorizados- Ministerio Ciencia Tecnología y Medio Ambiente Cuba*.