



■ Bioenergía

Características energéticas del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán y su análisis como combustible adicional de calderas bagaceras

Gimena del H. Zamora Rueda*; Gabriela Mistretta*; Cynthia E. Gutierrez*; Florencia L. Peralta*; Marcos Golato**;
Marcelo Ruiz*; Dora Paz***; Gerónimo J. Cárdenas*.

*Ing. Qco, **Ing. Mec., ***Dra. Ing. Qca, Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC,
gzamora@eeaoc.org.ar; mediciones@eeaoc.org.ar

■ Introducción

El aprovechamiento energético del RAC es una de las alternativas con las que cuenta Tucumán para la producción de energía renovable, puesto que estos residuos pueden utilizarse, previo acondicionamiento en las calderas de vapor de los ingenios azucareros de la provincia (Casen *et al.*, 2012).

El RAC es un material lignocelulósico formado por compuestos elementales tales como carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S). Además, suele contener cantidades relativamente importantes de silicio (Si), potasio (K), sodio (Na) y cloro (Cl) (Fungaro y Silva Reis, 2014).

En el análisis de una biomasa como posible combustible de

caldera deben tenerse en cuenta los componentes orgánicos e inorgánicos de esta, las características energéticas y la fusibilidad de sus cenizas. Estos parámetros influyen en la calidad del combustible y permiten estimar la corrosión que se podría presentar en el interior de una caldera de vapor, ya que la presencia de elementos como azufre, cloro, calcio (Ca), sodio, potasio y fósforo

(P) provoca transformaciones en la estructura de las cenizas de un combustible y la formación de distintas fracciones.

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar los resultados de las determinaciones de las características energéticas y físico-químicas del RAC mediante análisis normalizados.

Procedimiento de análisis

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 Colombres (EEAOC). Para ello se recolectaron muestras del RAC de la variedad LCP85-384, dejadas en el campo para su secado natural durante 15 días posteriores a la cosecha de la caña.

La determinación del contenido de humedad (W) se realizó siguiendo la norma ASTM D 5142-02 modificada. Posteriormente se procedió a la preparación de las muestras, triturándolas hasta alcanzar una granulometría adecuada de aproximadamente 1 mm.

Para el análisis de los contenidos de cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV) y carbono fijo (CF) se utilizó un equipo analizador termogravimétrico (TGA) (Figura 1), marca LECO, modelo TGA701, ajustado y calibrado para RAC. Esta metodología sigue el procedimiento indicado en la norma ASTM D 5142-02 modificada.

Para la determinación del poder calorífico superior (PCS) se utilizó la metodología indicada en la norma

ASTM D 1515-96 con una bomba calorimétrica automatizada (Figura 2).

La determinación de cloro se realizó siguiendo la metodología propuesta en la norma ASTM E 776-87 modificada; para el análisis de los contenidos de azufre se siguió la norma ASTM D 3177-02 modificada; y para los contenidos de silicio no soluble en cenizas se aplicó la norma ASTM C 114-04 modificada.

En cuanto a las cenizas, se utilizó un equipo analizador de fusibilidad de cenizas (Figura 3. Ver recuadro en pag 12) con sistema de reconocimiento de imágenes marca LECO, modelo AF700, que cumple con la metodología ASTM D 1857-03 y realiza las determinaciones bajo dos atmósferas gaseosas (oxidante y reductora). La norma identifica cuatro temperaturas características: inicio de la deformación (DT), ablandamiento (FT), hemiesfera (HT) y fluidización (FT).

Caracterización del RAC

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de los contenidos de W, CZ, SV y CF para las muestras de RAC analizadas. Los valores, referidos a base seca (b.s.) y expresados en [%], se encuentran en igual orden de magnitud que los informados por Barbosa Cortez et al. (2008) para este mismo tipo de residuo agrícola. Es importante indicar que el contenido de cenizas encontrado en el RAC analizado es superior al del bagazo, debido principalmente a la incorporación de material inorgánico en la etapa de recolección del material. Los valores encontrados se encuentran en igual orden

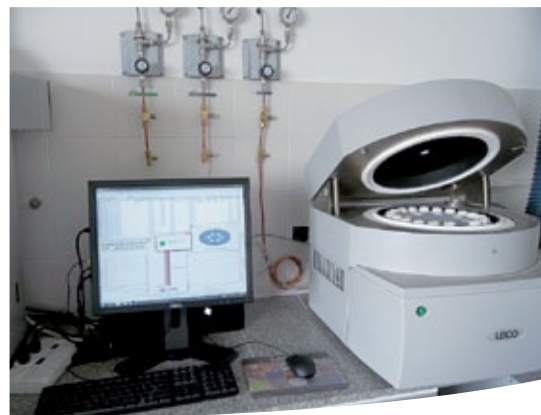


Figura 1. Equipo analizador termogravimétrico.



Figura 2. Bomba calorimétrica automatizada.

de magnitud que los encontrados por Feijóo et al. (2016).

La Tabla 2 muestra los resultados promedio del contenido de Cl total, S total y Si indicado como SiO₂

Tabla 1. Resultados de las determinaciones termogravimétricas en muestras de RAC de Tucumán.

	%W	%CZ (b.s.)	%SV (b.s.)	%CF (b.s.)
Valor medio	18,64	14,04	69,20	16,75

Tabla 2. Resultados de Cl, S, SiO₂ y PCS en muestras de RAC de Tucumán

	%Cl (b.s.)	%S (b.s.)	% SiO ₂ (b.s.)	PCS[kJ/kg] (b.s.)
Valor medio	0,20	0,21	62,89	16.313



Antes de comenzar a operar con nuevos biocombustibles en calderas de vapor, es de suma importancia caracterizar la biomasa que se desea utilizar para evaluar su aptitud como combustible y su posible comportamiento en el generador. Los parámetros normalmente analizados son los contenidos de humedad y cenizas y el poder calorífico. No obstante, existen otros parámetros físico-químicos que definen la calidad de un combustible, como por ejemplo la fusibilidad de las cenizas. **La fusibilidad de las cenizas es una característica del estado físico que estas adquieren cuando se las somete a un calentamiento progresivo en determinadas condiciones** (Pang *et al.*, 2013).

Este parámetro es de gran importancia para tomar medidas tendientes a evitar problemas de escorificación excesiva, deposiciones y obstrucción en la zona de grillas y pasajes de gases a través de los tubos del haz convectivo y sobrecalentador, procurando un manejo y rediseño adecuados, que permitan extender los periodos de funcionamiento y minimizar los tiempos de parada en los generadores de vapor.

(óxido de silicio); estos valores se hallan expresados en base seca; se muestra además el PCS correspondiente. Estos resultados se encuentran en igual orden magnitud según por Barbosa Cortez *et al.* (2008).

Es importante indicar que el contenido de material inorgánico presente en el combustible influye en forma negativa en el PCS. Los resultados obtenidos para este último parámetro son similares a los encontrados por Castagnaro *et al.* (2011) para RAC de Tucumán.

La Tabla 3 muestra los resultados del análisis de la fusibilidad de cenizas de RAC para atmósfera oxidante y reductora. Hay que destacar que la temperatura FT se encontró por arriba de la capacidad máxima de detección del equipo analizador (1500°C). Este hecho resultaría beneficioso,

ya que la fusibilidad de las cenizas no representaría un riesgo para el generador de vapor.

En la Tabla 4 se observa los contenidos de los parámetros termogravimétricos para el RAC de este estudio y Barbosa Cortez *et al.* (2008); además se incluye una comparación de estos parámetros con el bagazo de caña de azúcar. En este último se observan valores mayores de humedad con respecto al RAC. Estos valores se encuentran en igual orden de magnitud que los consultados en bibliografía.

En la Tabla 5 se muestran los contenidos de los parámetros inorgánicos y su valor de PCS, los cuales resultan en igual orden de magnitud que los presentados por Woytiuk (2006). Asimismo, el bagazo presenta valores inferiores respecto del RAC, en base a lo informado por Silva Lora *et al.* (2012).

Tabla 3. Resultados del análisis de fusibilidad de cenizas de RAC en atmósfera oxidante y reductora.

	Atmósfera oxidante				Atmósfera reductora			
	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
Valor medio	1.085	1.272	1.402	>1.500	1.119	1.350	1.455	>1.500

Tabla 4. Valores medios de parámetros termogravimétricos de muestras de RAC y comparación con bagazo.

	W [%]	CZ [%]b.s.	SV [%] b.s.	CF [%]b.s.
RAC para este estudio	18,64	14,04	69,20	16,75
RAC (Barboza Cortes <i>et al.</i> 2008)	8,65	12,92	73,28	14,96
Bagazo (Silva Lora <i>et al.</i> ,2012)	-	4,14	75,85	20,01

Tabla 5. Valores medios de elementos inorgánicos y energéticos de muestras de RAC y comparación con bagazo.

	%Cl (b.s.)	%S (b.s.)	% SiO ₂ (b.s.)	PCS[kJ/kg] (b.s.)
RAC para este estudio	0,20	0,21	62,89	16,313
RAC (Woytiuk, 2006)	0,40	0,22	65,61	17,725
Bagazo (Silva Lora <i>et al.</i> ,2012)	0,03	0,08	46,61	16,810



Analizador de fusibilidad de cenizas AF700

El equipo analizador de fusibilidad de cenizas, marca LECO, modelo AF700 (Figura 3), instalado en el LEMI, es un moderno equipo automatizado que determina las DT, ST, HT y FT a partir del registro de la deformación de muestras de cenizas por medio de un “software” de función y reconocimiento de imágenes (IRF) y de acuerdo a la norma ASTM D1857-03.



Figura 3. Equipo analizador de fusibilidad de cenizas.



La Tabla 6 muestra los resultados promedio del análisis de la fusibilidad de cenizas de RAC de las muestras analizadas en relación a los valores de fusibilidad de cenizas de bagazo, según Peralta *et al.*

(2014). Puede observarse que los valores de RAC encontrados, para el lote de muestras analizadas en este estudio, poseen temperaturas de fusibilidad mayores al del bagazo, hecho que podría

deberse a los elevados contenidos de cenizas y a los posibles componentes inorgánicos presentes en esta para este lote de muestras analizado.

Tabla 6. Parámetros de fusibilidad de cenizas en ambas atmósferas en muestras de RAC comparadas con bibliografía.

Muestra	Fusibilidad de cenizas							
	Atmósfera oxidante				Atmósfera reductora			
	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
RAC	1.085	1.272	1.402	>1.500	1.119	1.350	1.455	>1.500
RAC (Peralta <i>et al.</i> , 2014)	1.058	1.196	1.322	>1.455	1.054	1.263	1.374	>1.455
Bagazo (Peralta <i>et al.</i> , 2014)	1.110	1.235	1.334	>1.455	1.081	1.236	1.385	>1.455



Tuberías Corrugadas de HDPE

La tecnología más avanzada en sistemas de drenaje

- Super resistentes.
- Mayor velocidad de flujo.
- En diámetros de hasta 1500 mm.
- Livianas y de fácil transporte y colocación.
- Para ser usadas en: Drenaje Agrícola, Sanitario, Pluvial, Vial, Deportivo, en Minería, Forestal y Canalización.

Gentile Tucumán S.A. Distribuidor

Lavalle 2729 - Telefax (0381) 4233131 - 4233127 - 4333200
ventas@gentiletucuman.arnetbiz.com.ar - (4000) Tucumán - Argentina



Consideraciones finales

Los resultados obtenidos de los análisis físico-químico y energético del RAC de caña de azúcar de la variedad LCP-85-384 mostraron valores promedio de $W = 18,64\%$; $CZ = 14,04\%$; $SV = 69,20\%$; $CF = 16,75\%$; $CI = 0,20\%$; $S = 0,21\%$; $SiO_2 = 62,89\%$ y $PCS = 16.313[kJ/kg]$. Respecto a la temperatura inicial de fusibilidad de cenizas para el RAC analizado, fue de $1085^{\circ}C$ para atmósfera oxidante y de $1119^{\circ}C$ para atmósfera reductora. En relación al bagazo, las temperaturas encontradas para el lote de muestras analizadas de RAC presentan valores menores de temperatura inicial de fusión en aproximadamente $100^{\circ}C$ que para bagazo de caña de azúcar, según Peralta *et al.* (2014).

Estos resultados indicarían que la combustión del RAC de caña de azúcar presentaría condiciones similares a la combustión del bagazo. No obstante, como los contenidos de cenizas del RAC son mayores que los encontrados en bagazo, se deberá considerar la influencia de este parámetro en la operación eficiente de la caldera de vapor y en la eliminación y

logística de este residuo.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de la Ing. Mónica Coronel y de la Lic. Gabriela Juárez de la Sección Química de la EEAOC.

Bibliografía citada

Barboza Cortez L.A.; E. E. Silva Lora y E. Olivares Gómez. 2008. Biomasa para la Energía. Editorial Unicamp.

Casen S. D.; L. A. Marto; M. M. Medina; R. E. Romero; A. Torres Bugeau y D. Pérez. 2012. Evaluación del desempeño de dos enfardados para la recolección del residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar en Tucumán. En: Actas XVII Reunión Técnica de la Sociedad Argentina de Técnicos de la Caña de Azúcar (SATCA) 2012.

Castagnaro, A.; M. A. Golato; D. Paz y E. A. Feijóo. 2011. Caracterización energética de biomasa residuales de origen agroindustrial de Tucumán. Avance Agroind. 32 (2): 32-37.

Feijóo, E.; M. A. Golato; D. Paz y G. J. Cárdenas 2015. Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar de Tucumán. Avance Agroind. 92 (2).

Fungaro D. A. y T. Vitória da Silva Reis. 2014. Use of sugarcane straw ash for zeolite synthesis. Revista Internacional de Energía y Medio Ambiente 5 (5): 559-566.

Pang, C. H.; B. Hewakandamby; T. Wu and E. Lester. 2013. An automated ash fusion test for characterisation of the behaviour of ashes from biomass and coal at elevated temperatures. Fuel 103: 454-466

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. XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Renovables y Ambiente. VI Latin America Regional Conference. ASADES.

Silva Lora, E. E. y O. J. Venturini. 2012. Biocombustibles 1. Editorial Interciência Lta, Rio de Janeiro, Brasil.

Woytiuk, K. 2006. Master's Thesis- Sugar Cane Trash Processing for Heat and Power Production. Department of applied physics and mechanical engineering. Lulea University of Technology, Lulea, Switzerland.