

Estudio preliminar del aprovechamiento de los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar como combustible adicional para calderas bagaceras de Tucumán (Argentina)

Marcos A. Golato*, Enrique A. Feijóo*, Federico J. Franck Colombres*, Dora Paz* y Gerónimo J. Cárdenas*

RESUMEN

La necesidad de racionalizar el consumo de combustibles de origen fósil ha llevado a explorar nuevas fuentes de energía. La industria azucarera de Tucumán, Argentina, utiliza principalmente como combustible adicional en calderas de vapor bagaceras el gas natural (GN), que presenta elevados costos de adquisición y, en algunos casos, falta de disponibilidad. La Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) realizó un estudio preliminar para el aprovechamiento energético del residuo agrícola de cosecha de la caña de azúcar (RAC), con el objetivo de reemplazar el GN no renovable extraído de yacimientos petrolíferos. Para ello se aprovechó el secado natural del RAC a campo; se lo transportó a fábrica para ser acondicionado y mezclado con bagazo y luego ser utilizado como mezcla combustible en los generadores de vapor. Los ensayos preliminares realizados mostraron que es posible quemar mezclas de bagazo con RAC en calderas bagaceras convencionales. Para una relación en peso de 75% de bagazo y 25% de RAC se obtuvo una combustión estable, y se alcanzó una eficiencia térmica en la caldera de 71,6%, mayor en un 5 en relación a la eficiencia obtenida utilizando únicamente bagazo (caso base). La producción de vapor aumentó un 21% y no se requirieron modificaciones estructurales en el generador. Asimismo, para igual producción de vapor se logró un ahorro de bagazo de 43%. Se estimó que el RAC necesario para reemplazar el GN adicional de la industria azucarera de Tucumán sería aproximadamente de 18% en relación al RAC total disponible. Además de eliminar completamente el consumo de gas natural (GN) de los ingenios de Tucumán, quedarían aun excedentes de RAC y de bagazo disponibles para otros usos, tales como el incremento de la producción de bioelectricidad para venta a la red y la producción de papel y producción de biomateriales, entre otros. Considerando para la provincia de Tucumán una producción de 14 millones de t caña/año, el ahorro de GN sería de alrededor de 70 millones de Nm³ GN/año.

Palabras clave: secado natural, acondicionamiento, combustión, biomasa.

ABSTRACT

Preliminary study of the utilization of agricultural residues from sugarcane harvest as additional fuel for the bagasse boilers of Tucumán (Argentina)

The need to rationalize the consumption of fossil fuels has led to explore new energy sources. The sugar industry in Tucuman, Argentina, used mainly as additional fuel in steam boilers bagasse, natural gas (NG), which has high acquisition costs and in some cases lack of availability. A preliminary study for the energy use of agricultural crop residue of sugarcane (RAC) as alternative additional fuel in bagasse boilers of the mills of Tucuman, Argentina, was made. To do this the RAC was naturally drying and then transported to the factory to be crushed and mixed with bagasse to feed the boilers. The preliminary tests show that it is possible to burn mixtures of RAC and bagasse in conventional bagasse boilers. To a weight ratio of 75% bagasse and 25% of RAC, stable combustion was achieved, the efficiency increased by 6%. A 43% bagasse saving relative to the same steam quantity was attained over the boiler operating only with bagasse, without any additional fuel. The steam production increased by 21%, and boiler structural modifications was not required. The necessary RAC to replace the additional fossil fuel Tucuman's sugar industry would be approximately 18% of the available RAC, whereby in addition to completely eliminate the consumption of natural gas (NG) of the mills Tucuman, would remain even surplus bagasse and RAC available for another uses, such as increased production of bioelectricity for sale to the grid, paper production, production of biomaterials, among others. Considering for the province of Tucuman a production of 14 million tons cane / year, NG saving would be around 70 million Nm³ NG / year.

Key words: natural drying, conditioning, combustion, biomass.

Artículo recibido: 16/11/16 y Aceptado: 31/08/17

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. ingenieria@eeaac.org.ar

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha evidenciado la necesidad de racionalizar el uso de los combustibles y reemplazar los de origen fósil por otros de carácter renovable. Este es el caso de la provisión de gas natural como combustible principal para la generación de energía eléctrica y térmica de las industrias de Tucumán; y como combustible adicional de la industria azucarera de esta provincia, que lo emplea ya sea en las mismas calderas bagaceras mediante quemadores adicionales de gas natural, o en calderas específicas para este combustible gaseoso. Se estima para la industria azucarera de Tucumán un consumo medio de gas natural (GN) de aproximadamente 5 Nm³ GN/t caña y una producción media de residuos agrícolas de cosecha (RAC) de caña de aproximadamente 150 kg en base seca por tonelada de caña, con un porcentaje de recolección promedio de 50% (Casen *et al.*, 2011). Por ello la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) realizó estudios en vistas de aprovechar el RAC como fuente de energía alternativa para ser empleado como biocombustible en calderas bagaceras tanto convencionales como modernas, emplazadas en las fábricas azucareras, con el objetivo de eliminar o reducir el consumo de GN en dicha industria.

El uso de biocombustibles puede traer aparejadas ventajas ambientales y económicas en relación con los combustibles fósiles. Numerosos estudios (Briseo, *et al.*, 2001; Ripolo y Ripoli, 2007 y Feijo, *et al.*, 2015) muestran que estos beneficios dependen de la eficiencia del proceso productivo. Una de las principales ventajas es la disminución de las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) hacia la atmósfera, ya que estos gases, emitidos por la quema de biocombustibles, son absorbidos durante el crecimiento de los cultivos (Cárdenas y Garolera De Nucci, 2013; Villegas Aguilar *et al.*, 2005).

En general se observa en el mundo un creciente interés por las fuentes de energía renovables. Estas energías son limpias y se pueden utilizar de forma autogestionada, lo que significa que es posible aprovecharlas en el mismo lugar donde se las producen. Además ofrecen un potencial prometedor para cultivos productores de grandes cantidades de biomasa, como es el caso de la caña de azúcar (Alonso *et al.*, 2005; Briceño *et al.*, 2001; Valdés Delgado *et al.*, 2005).

La cosecha en verde de la caña de azúcar aparece como una importante alternativa para conformar sistemas de producción más limpios, prescindiendo de la quema de material vegetal y residuos de cosecha en el campo, conservando el suelo y ofreciendo una posibilidad para la generación de energía (Ripoli y Ripoli, 2007; Romero *et al.*, 2009). Entre los efectos agronómicos positivos producidos por la cosecha en verde pueden mencionarse

la conservación de humedad del suelo, las mejoras en el control de malezas, mayor desarrollo de microorganismos degradadores de materia orgánica y fijadores de nitrógeno, entre otros (Alonso *et al.*, 2005; Figueroa *et al.*, 2005; Tortora *et al.*, 2013).

El presente trabajo muestra los resultados del estudio preliminar realizado por la EEAOC para el aprovechamiento energético del RAC como biocombustible adicional para calderas bagaceras de ingenios azucareros de Tucumán, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Figura 1 muestra el proceso ensayado en este estudio para el aprovechamiento energético del RAC. Se pueden observar las tareas realizadas en campo (hilerado, enfardado y carga del RAC) y en fábrica (descarga, picado, alimentación y mezclado del combustible alternativo con bagazo).

Las muestras de RAC fueron presecadas a campo durante 15 días posteriores a la cosecha con el objetivo de eliminar parte de la humedad y con ello, disminuir el peso a transportar y aumentar la densidad energética del RAC, según lo observado por Aso *et al.* (2008).

Luego se realizó el hilerado del RAC por medio de rastrillos circulares, logrando que hojas y despunte depositados en la trocha fueran removidos al surco para su posterior recolección.

Para la recolección, manejo y transporte del RAC se

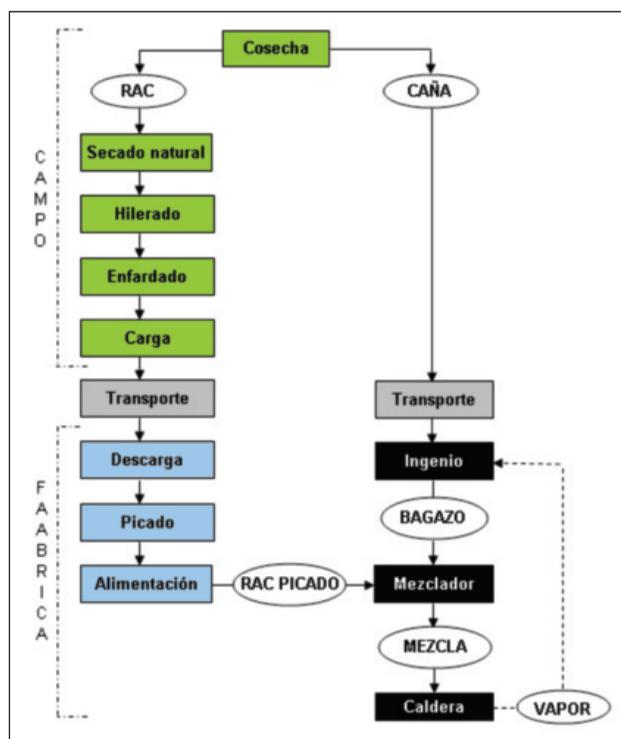


Figura 1. Proceso ensayado para el aprovechamiento energético del RAC.

Tabla 1. Alternativas de recolección ensayadas en los campos de caña de azúcar.

Alternativa 1	RAC sin densificar (a granel): donde el material recolectado del campo fue cargado en un camión por medio de una pala cargadora.
Alternativa 2	RAC densificado: donde el material recolectado del campo fue previamente enfardado para luego ser cargado en un camión por medio de un autoelevador.

estudiaron dos alternativas, según se indica en la Tabla 1. Para la evaluación del densificado se estudiaron dos alternativas de enfardado propuestas por Digonzelli *et al.* (2006).

- a) Enfardado cilíndrico (rotoenfardado).
- b) Enfardado prismático (empacado).

En la primera alternativa se evaluó una rotoenfardadora marca Mainero, modelo 5810; y en la segunda experiencia se utilizó una enfardadora marca

Mainero, modelo 5600.

En la Tabla 2 pueden observarse las características técnicas de las máquinas indicadas.

La densidad volumétrica del material a granel se determinó por gravimetría con la ayuda de una pala cargadora y la balanza de caña del ingenio. Para el caso de los fardos cilíndricos y prismáticos, fueron pesados y se midieron los volúmenes correspondientes. Se destaca que la densidad en este caso depende del manejo del RAC en la

Tabla 2. Características técnicas de las máquinas estudiadas para el densificado del RAC.

Mainero 5810	<p>Capacidad máxima aproximada: 15 t RAC/h</p> <p>Régimen de giro máximo de la máquina: 540 rpm.</p> <p>Accionamiento: toma de fuerza para tractor por medio de cardan protegido con junta homocinética (potencia mínima 70 CV).</p> <p>Recolector: flotante con regulación de altura, con 4 barras porta púas y 36 púas dobles.</p> <p>Ancho de recolección: 1.200 mm.</p> <p>Sistema de prensado: por correas (5 correas de 7" de nylon-polyester).</p> <p>Sistema de atado: atador hidráulico para hilo de brazo simple.</p> <p>Tamaño (rollo): 1.200 mm de ancho, diámetro: 900 a 1.500 mm.</p> <p>Peso aproximado de la máquina: 2.500 kg.</p> <p>Peso del rollo formado: 300 a 400 kg.</p>
Mainero 5600	<p>Capacidad máxima aproximada: 10 t RAC/h</p> <p>Régimen de giro máximo de la máquina: 540 rpm.</p> <p>Accionamiento: toma de fuerza para tractor por medio de cardan protegido con junta homocinética (potencia mínima 40 CV)</p> <p>Recolector: flotante con regulación de altura, con 4 barras porta púas y 24 púas dobles.</p> <p>Ancho de recolección: 1.420 mm.</p> <p>Sistema de prensado: a pistón (96 golpes por minuto a 540 rpm).</p> <p>Sistema de atado: atador mecánico para alambre con accionamiento automático y 2 bobinas de alambre de 45 kg c/u.</p> <p>Tamaño (fardo): prisma rectangular de 460 mm de ancho por 360 mm de altura y 300 a 1.300 mm de largo.</p> <p>Peso aproximado de la máquina: 1.400 Kg.</p> <p>Peso de la paca: 20-25 kg.</p>

recolección y del grado de ajuste de la máquina enfardadora.

En la Tabla 3 pueden observarse las densidades de los fardos cilíndricos y prismáticos obtenidos.

Tabla 3. Densidad volumétrica del RAC para diferentes condiciones de densificación.

Manejo de RAC	Densidad RAC [kg/m ³]
1) a granel	70
2) en fardos cilíndricos (rollos)	195
3) en fardos prismáticos (pacas)	170

Para los ensayos de combustión se utilizaron únicamente rollos de RAC, los cuales fueron transportados a fábrica en un camión Mercedes Benz 1114 con caja y acoplado de 9 m, con capacidad de transporte de 36 fardos cilíndricos de 300 kg cada uno. La carga de los rollos en el camión se realizó por medio de una cargadora con brazo hidráulico.

Durante los ensayos de acondicionamiento del RAC en fábrica, previo a su combustión, se empleó una picadora de martillos para forrajes, marca Daniele, con una potencia de 60 HP, accionada por un tractor con toma de fuerza a 540 rpm a través de un sistema de poleas y correas. Esta máquina posee una capacidad nominal de 4000 kg/h; se ajustó el tamaño del material picado a través de tamices intercambiables y de un sistema de recirculación que regula la granulometría de la máquina. El material picado descarga a través de un ciclón de separación, que elimina parte de la tierra y el polvo que acompaña al RAC.

Para analizar la calidad del material picado se realizaron determinaciones del tamaño de partículas por medio de ensayos de granulometría, empleando un equipo de tamizado con movimiento oscilatorio horizontal, marca Macotest para tamices normalizados según ASTM E11, de 200 mm de diámetro con las siguientes aberturas de malla: 19,000 mm; 9,510 mm; 4,760 mm; 3,360 mm; 1,190 mm; 1,000 mm; 0,595mm y 0,297mm, correspondientes a las mallas: ¾; 3/8; 4; 6; 16; 18; 30 y 50 respectivamente. Las partículas de longitudes mayores se separaron manualmente.

Para calcular el diámetro promedio de ambos materiales se utilizó la siguiente ecuación:

$$D_{pi} = \sum_{i=1}^{i=n} Abertura\ promedio \left|_i \cdot \% \text{ muestra retenida} \right|_i$$

Ec 1.

Donde D_{pi} es el diámetro promedio del material i y n es la cantidad de tamices utilizados para realizar la granulometría. La *abertura promedio* i se obtiene como el promedio de las aberturas de dos tamices consecutivos. El porcentaje de *muestra retenida* i es el % de muestra

referido al total separado en el tamiz i .

La evaluación del comportamiento del combustible se realizó mediante ensayos en una caldera bagacera convencional de un ingenio azucarero de Tucumán (se identifica en la Figura 2 como C10). Se trató de un generador de vapor, marca Mellor-Goodwin, modelo VU80 modificado; es del tipo acuotubular con una superficie de calefacción de 2200 m², con producción de vapor de 80.000 kg/h a una presión de 21 kg/cm² y 350°C de temperatura; con grilla volcable de 44 m² de superficie. Posee, además, sobre-calentador de vapor y pre-calentador de aire. Esta caldera de vapor fue alimentada inicialmente solo con bagazo, sin ningún combustible adicional.

Posteriormente se utilizaron mezclas de RAC/bagazo en las siguientes proporciones en peso: 15/85, 20/80, 25/75 y 30/70. Estas se realizaron con la ayuda de una pala cargadora, marca LiuGong, modelo 835, con tara inicial de 11.500 kg, donde se cargó el RAC picado; y por diferencia de peso, medido en la balanza de caña del ingenio, se determinó la cantidad de RAC correspondiente. Simultáneamente se registraron los datos de la molienda de caña de la fábrica y el tiempo de medición. Además, considerando un 30% de la caña molida, se estimó la cantidad de bagazo resultante. Para garantizar la homogeneidad del combustible preparado, se aprovechó la instalación de un dosificador-mezclador situado en el conductor principal de bagazo a la salida de uno de los molinos del ingenio.

En la Figura 2 puede verse un esquema de la planta de calderas y la distribución del combustible en esta. Se muestra además la posición del equipo mezclador-dosificador, donde se incorporaron el bagazo y el RAC en las proporciones ensayadas. Estos combustibles se proveían de manera individual desde el patio de bagazo y acopio de RAC picado. Cabe destacar que la mezcla combustible alimentada al dosificador se distribuía luego entre las calderas que se encontraban en operación, por lo que fue necesario determinar la cantidad de mezcla consumida por la caldera ensayada en forma indirecta.

Caracterización del combustible

Se realizaron determinaciones del contenido de humedad y cenizas, y poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) en el RAC a emplear. Para determinar el contenido de humedad se realizó el secado de muestras en estufa a 105°C durante 8 horas y hasta peso contante, según norma ASTM D 5142 – 02a modificada (ASTM, 2003).

El PCS se determinó en base seca, utilizando una bomba calorimétrica adiabática marca Parr, según norma ASTM D 2015-96 (ASTM, 1996).

El contenido de cenizas se realizó calcinando las

muestras de RAC en una mufla eléctrica a 550°C durante 8 horas según norma ASTM D 3174-02 modificada (ASTM, 2002).

El PCI se calculó a partir del PCS y el contenido de humedad y de cenizas del combustible según lo indicado por Feijóo *et al.* (2015):

$$PCI = PCS \cdot (1 - w) - 2512 \cdot [9 \cdot H(1 - cz) \cdot (1 - w) + w]$$

Ec 2.

Donde:

PCS [kJ/kg de combustible seco] = poder calorífico superior en base seca.

PCI [kJ/kg de combustible] = poder calorífico inferior en base húmeda (b.h.).

w [kg agua/kg combustible] = contenido de agua del combustible.

H [kg H₂/kg de combustible seco libre de ceniza] = contenido de hidrógeno en la materia seca libre de ceniza.

cz [kg de ceniza/kg de combustible seco] =

contenido de ceniza de la materia seca.

En la Tabla 4 se muestran las composiciones elementales de RAC y bagazo en por ciento en peso seco y libre de cenizas, obtenidas a partir de determinaciones realizadas por Povse y Bogó (2008) en el Laboratorio del Instituto de Química Física de los Materiales, Medio Ambiente y Energía (Inquimae) del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet).

Tabla 4. Composición elemental de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar (RAC) y Bagazo de Tucumán en porcentaje en peso, base seca y libre de cenizas

Composición (%)	RAC	Bagazo
Carbono	46,0	46,3
Hidrógeno	6,1	6,0
Oxígeno	46,7	47,4
Azufre	<0,3	-

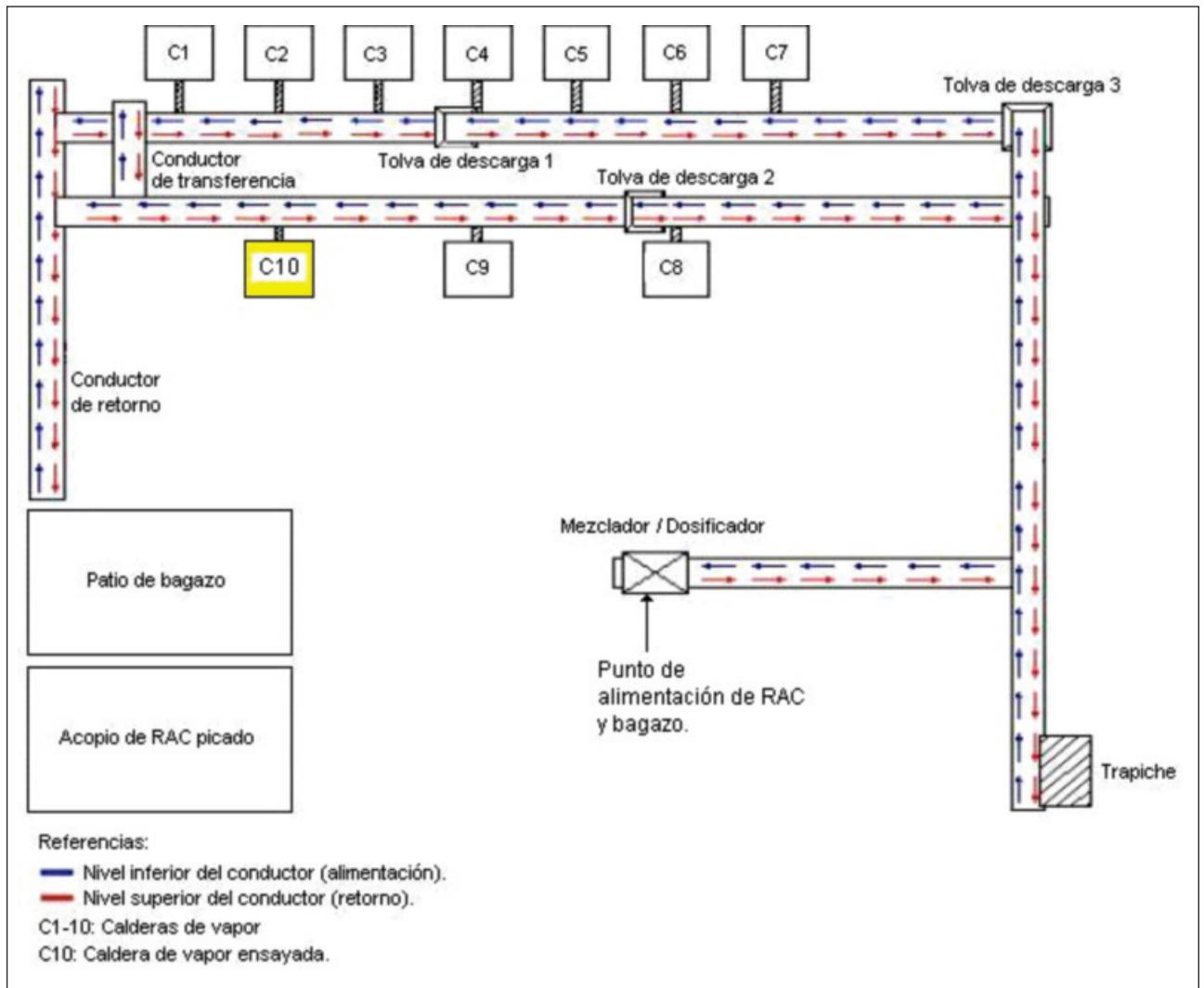


Figura 2. Planta de calderas de vapor del ingenio azucarero ensayado en Tucumán

Para el análisis estadístico de los datos medidos se utilizó la desviación estándar como parámetro de dispersión de los valores. Como valor comparativo se ha definido la desviación estándar porcentual relativa al valor promedio, como:

$$CV\% = \frac{\text{Desv.est.}}{VP} \quad \text{Ec. 3.}$$

Donde:

Desv. est.: desviación estándar de las mediciones.
VP: promedio de los valores medidos.

Comparación del desempeño de la caldera con bagazo y con la mezcla

Se realizaron en la caldera ensayos preliminares con distintas proporciones de mezclas de combustibles para determinar la relación RAC/Bagazo a emplearse en el presente estudio. Pudo observarse que la operación de la caldera no requirió variaciones operativas importantes hasta una relación RAC/Bagazo de 25/75, razón por la cual se tomó dicha relación para comparar el desempeño de la caldera en relación al de esta funcionando únicamente con bagazo. Para ello se realizaron tres ensayos operando la caldera alimentada únicamente con bagazo, y luego tres ensayos adicionales con la mezcla de 25% de RAC y 75% de bagazo, siguiendo la metodología propuesta por Golato *et al.* (2008). Esta metodología consiste esencialmente en un conjunto de balances de masa y energía para la determinación de sus flujos y eficiencias, tomando como datos de partida las mediciones de sus principales variables operativas. De este modo se determina la cantidad de combustible consumido por la caldera mediante un balance de carbono, para lo cual se requiere previamente conocer el caudal de gases secos efluentes, su composición elemental y la correspondiente al combustible. Debido a que la caldera ensayada no poseía las instalaciones necesarias para la medición del caudal de gases secos en chimenea, y considerando que el objetivo de estos ensayos de combustión fue la comparación entre dos situaciones, combustión con bagazo únicamente y combustión con la mezcla bagazo y RAC, no se realizó la medición del caudal de gases secos, sino que se asumió que el rendimiento del horno en ambas situaciones era de 85% (Ecuación 4); y por medio de un proceso iterativo se

η_{Horno} : Rendimiento térmico del horno de la caldera de vapor.

G: Flujo de la corriente correspondiente.

h: Entalpía específica correspondiente para estado gaseoso.

PCI: Poder calorífico inferior del combustible.

Cp: Calor específico medio.

t: temperatura del flujo correspondiente.

t_{Ref} : Temperatura de referencia correspondiente.

En ambos casos, una vez calculado el caudal de combustible se determinó el rendimiento térmico del sistema caldera-precalentador de aire (η_{sistema}), a partir de la Ecuación 5:

$$\eta_{\text{sistema}} = 100 \cdot \frac{G_{\text{Vapor}} \cdot (h_{\text{Vapor}} - h_{\text{Agua}})}{G_{\text{Combustible}} \cdot \text{PCI}} \quad \text{Ec. 5}$$

Los ensayos en el generador de vapor se realizaron durante aproximadamente cuatro horas, previendo que los sistemas se encontrasen en condiciones estables de operación.

Ahorro de GN

Una vez calculado el rendimiento del generador con bagazo y con la mezcla bagazo y RAC, haciendo un prorrateo se estimó el rendimiento correspondiente a la combustión del RAC adicional como si se quemara solo; luego, por medio de una conversión isocalórica, se estimó el ahorro de gas natural que podría obtenerse en la industria azucarera de Tucumán debido al empleo del RAC como combustible adicional. Para ello se asumió una eficiencia térmica media de 90% para calderas a GN y un consumo específico medio de 5 Nm³ GN/t caña.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 muestra las densidades volumétricas obtenidas para las diferentes alternativas de densificación planteadas.

Puede observarse que los fardos cilíndricos poseen mayor densidad. Sin embargo para el transporte y el almacenaje es conveniente emplear fardos prismáticos, ya que debido a las geometrías se puede transportar o almacenar mayor cantidad de material en fardos

$$\eta_{\text{Horno}} = 100 \cdot \frac{G_{\text{Combustible}} \cdot \text{PCI} + G_{\text{Aire } 1^\circ} \cdot C_{p_{\text{Aire } 1^\circ}} \cdot (t_{\text{Aire } 1^\circ} - t_{\text{ref}}) + G_{\text{Vapor}} \cdot (h_{\text{Agua}} - h_{\text{Vapor}}) - G_{\text{Gases}} \cdot C_{p_{\text{Gases}}} \cdot (t_{\text{Gases}} - t_{\text{ref}})}{G_{\text{Combustible}} \cdot \text{PCI} + G_{\text{Aire } 1^\circ} \cdot C_{p_{\text{Aire } 1^\circ}} \cdot (t_{\text{Aire } 1^\circ} - t_{\text{ref}}) + G_{\text{Agua}} \cdot h_{\text{Agua}}} \quad \text{Ec. 4}$$

obtuvo el caudal de combustible (variable de iteración) para cada situación.

Donde:

prismáticos que en rollos. Un camión con acoplado puede transportar 36 fardos cilíndricos de 300 kg cada uno (lo que equivale a 10.800 kg de RAC), mientras que el mismo

camión puede transportar 570 fardos prismáticos de 23 kg cada uno (lo que equivale a 13.110 kg de RAC). Por lo tanto si se transportan fardos prismáticos es posible transportar 2.310 kg más de RAC que si se transportaran fardos cilíndricos.

En la Tabla 5 se observan los resultados de las determinaciones de granulometría del bagazo y el RAC picado.

De la tabla puede inferirse que la picadora utilizada en la experiencia resultó eficiente para el acondicionamiento del material. La distribución de tamaños de ambos materiales fue similar. El ensayo de granulometría del bagazo a la salida del trapiche arrojó un diámetro promedio de partículas de 7,63 mm; y el tamaño de las partículas de RAC obtenidas luego del picado fue de 8,21 mm. La diferencia representa un valor menor al 8% aproximadamente.

En la Tabla 6 se observan los valores promedio de las determinaciones de los contenidos de humedad y cenizas de las muestras de bagazo y RAC tomadas en la alimentación del dosificador-mezclador de la caldera de vapor durante los ensayos realizados. Además, se indican

2011 y Feijóo *et al.*, 2014. Además, el valor promedio de PCS del RAC en base seca resulta próximo a los valores promedio para el bagazo de Tucumán, según determinaciones realizadas por Diez *et al.*, 2010 y Agüero *et al.*, 2004. Por ello, se puede esperar un comportamiento similar para la combustión de la mezcla de RAC y bagazo en comparación con la utilización del 100% de bagazo como combustible para calderas bagaceras convencionales.

El RAC posee un mayor contenido de cenizas frente al bagazo, lo que influye negativamente en los procesos de combustión en las calderas bagaceras (Magasiner & de Kock, 1987) y en el PCI del mismo. No obstante, debido al secado natural al campo el contenido de humedad del RAC decrece en forma considerable, lográndose un incremento en el valor del PCI del RAC.

Estudios recientes sobre la fusibilidad de cenizas de RAC provenientes de cultivos de caña de azúcar de Tucumán, Argentina, indican valores de temperatura inicial de fusión de 1085°C para atmósfera oxidante y de 1119°C para atmósfera reductora; y que en relación a las cenizas de bagazo de caña de azúcar, estas temperaturas

Tabla 5. Granulometría del bagazo y RAC empleados durante los ensayos de combustión.

Tamiz	Abertura [mm]	Granulometría Bagazo	Granulometría RAC
3/4	19,000	3,79%	16,90%
3/8	9,510	26,64%	24,84%
4	4,760	33,97%	10,44%
6	3,360	1,66%	3,60%
16	1,190	14,51%	17,91%
18	1,000	12,18%	4,68%
30	0,595	10,90%	5,36%
50	0,297	12,54%	8,75%
Fondo	menor de 0,297	4,60%	7,52%

Tabla 6. Valores promedio del contenido de humedad, cenizas y PCS de las muestras de bagazo y RAC tomadas durante los ensayos.

Material	Humedad [%] (b.h.)	Cenizas [%] (b.s.)	PCS [kJ/kg] (b.s.)	PCI [kJ/kg]
Bagazo	52,47	4,59	18.372	6.853
RAC	10,30	13,89	16.581	13.586

los correspondientes valores de PCS y PCI.

En la Tabla 7 se observan los valores promedio de las mediciones realizadas en la caldera y sus correspondientes coeficientes de variación porcentual.

Estos resultados se encuentran dentro de los rangos de valores determinados por Castagnaro *et al.*,

son menores en aproximadamente 100°C, según Zamora Rueda *et al.* (2016).

Estos problemas, es decir mayores contenidos de cenizas y bajas temperaturas de fusión de las mismas en relación a las cenizas de bagazo, podrían traer un aumento de los depósitos en el hogar de la caldera; y al

Tabla 7. Valores promedio de las variables medidas durante los ensayos.

Lugar de medición	Variable medida	Bagazo 100%		25% RAC + 75% Bagazo	
		Valor promedio	CV%	Valor promedio	CV%
Salida de vapor	G [kg/h]	45.180	0,56	54.700	3,85
	p [ata]	24,2	2,89	23,47	2,19
	t [°C]	320	0,91	320,3	0,79
Entrada de gases al calentador de aire (ICQ)	CO [ppmCO]	200	22,91	900	6,46
	O ₂ [%]	8,75	4,65	10,2	7,47
	t [°C]	292,9	1,97	287,5	0,49
Aire ambiente	t [°C]	32,5	6,15	32,5	0,47
Salida de gases del ICQ	t [°C]	176,4	0,85	167,8	0,84
Aire caliente	t [°C]	218,6	7,57	221,7	1,3
Bagazo	w [%] (b.h)	52,47	2,7	52,47	2,7
	cz [%] (b.s.)	4,59	11,92	4,59	11,92
	PCS [kJ/kg] (b.s.)	18.372	3,06	18.372	3,06
RAC	w [%] (b.h)	-	-	10,3	3,86
	cz [%] (b.s.)	-	-	13,89	3,7
	PCS [kJ/kg] (b.s.)	-	-	16.581	5,71

encontrarse directamente expuestas a la radiación de la llama, producir problemas de escorificación y/o incrustación en los tubos que refrigeran la cámara de combustión.

En la Figura 3 se muestran los resultados de los balances de materia y energía para la combustión de bagazo, y en la Figura 4 para la combustión de la mezcla de RAC y bagazo (los valores en color rojo corresponden a datos de entrada).

El rendimiento obtenido para la caldera operando únicamente con bagazo es típico de estos equipos.

La caldera alimentada con la mezcla mantuvo una combustión estable durante los ensayos. En relación a la combustión de bagazo 100%, se observó un incremento en la producción de vapor de 21% (de 45.180 kg/h a 54.700 kg/h). La presión del vapor generado presentó variaciones del 3% (24,20 ata vs. 23,47 ata). No se observaron variaciones en la temperatura del vapor.

Si bien el consumo de bagazo disminuyó a 17.747 kg/h, lo que representaría una disminución de alrededor del 32%, para igual producción de vapor el consumo de bagazo sería de 14.658 kg/h, con lo cual el ahorro de bagazo neto representa un 43% respecto al consumo de bagazo original (25.878 kg/h).

El rendimiento térmico del sistema fue de 67,89%,

cuando se operó el generador de vapor únicamente con bagazo; y de 71,57% con la mezcla de bagazo y RAC. Es decir que el rendimiento aumentó en un 5% aproximadamente.

Con respecto a la calidad de los gases de combustión, se observó en promedio un mayor porcentaje de oxígeno para la caldera operando con el combustible mezcla (O₂ = 10,2%), respecto a la operación con bagazo (O₂ = 8,75%). Dicho aumento se debió principalmente a que dado que un combustible de menor humedad (41,75%) requiere menor cantidad de aire al quemarse que uno de mayor humedad (52,47%), habría sido necesario regular el suministro de aire al hogar, lo cual no pudo realizarse por averías en el sistema de regulación. Esto se ve reflejado también en los factores de dilución y temperaturas de gases obtenidos en ambos casos. No se observaron presencias de óxidos de nitrógeno en los gases efluentes. La concentración de monóxido de carbono fue mayor para la operación con la mezcla que para la operación únicamente con bagazo (900 ppm vs. 200 ppm respectivamente). Este aumento pudo haberse debido a la falta de regulación del aire, que pudo haber resultado en una menor temperatura de combustión, lo que podría inferirse por la menor temperatura obtenida para los gases a la salida del horno; a pesar de ello, estos

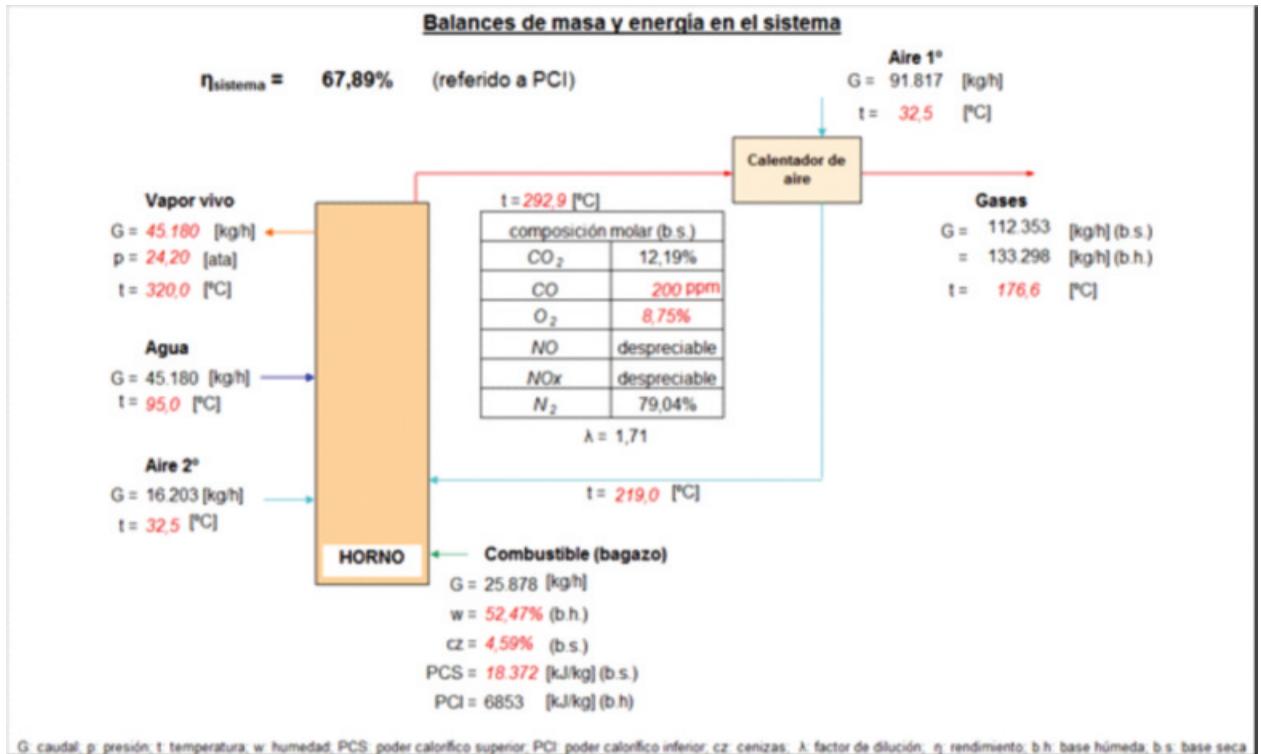


Figura 3. Resultado del balance de masa y energía para la combustión de bagazo 100%.

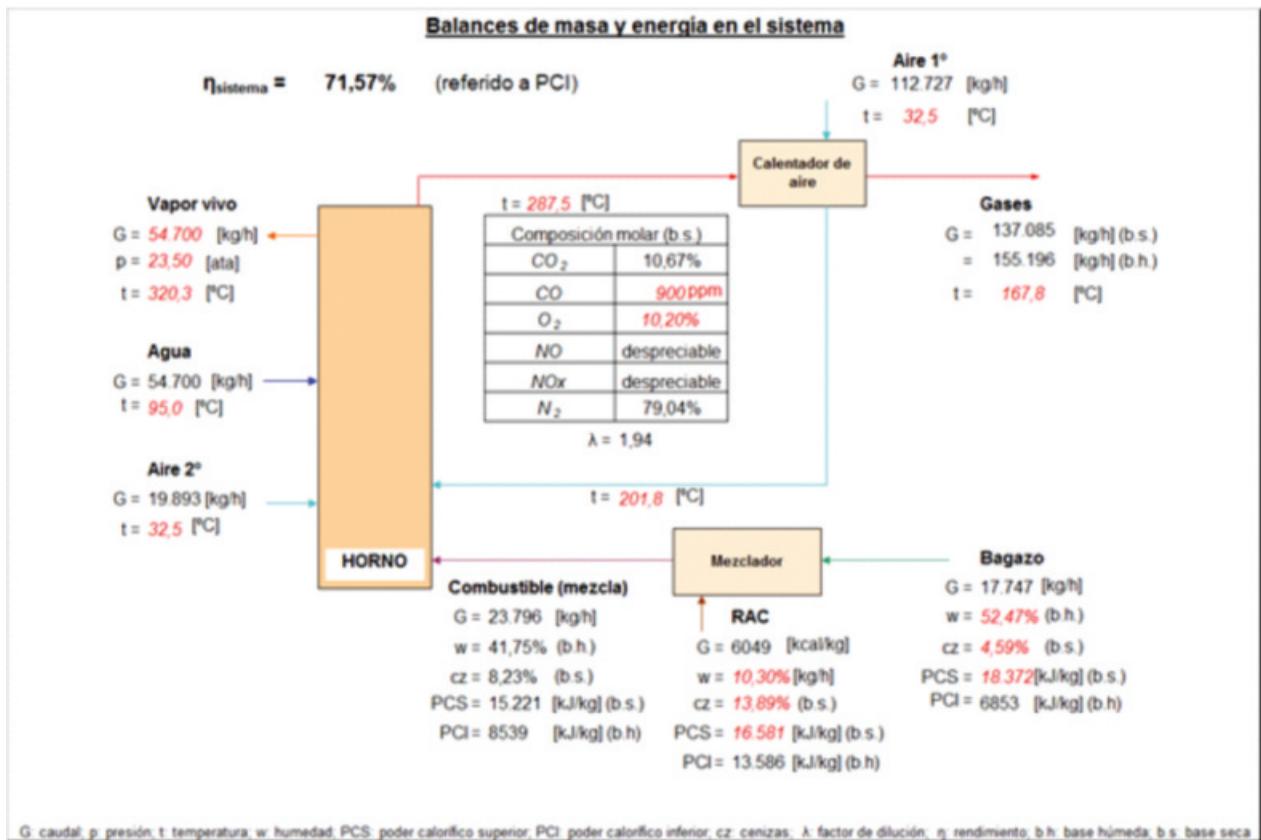


Figura 4. Balance de masa y energía para la combustión de la mezcla de 25% RAC y 75% bagazo.

valores de monóxido se mantuvieron dentro del rango de valores típicos de este parámetro para estos equipos.

Si se hubiere regulado el suministro de aire, probablemente el rendimiento de la caldera y el ahorro de bagazo habrían sido aun mayores.

En la Tabla 8 se muestran los valores empleados en la conversión isocalórica para la determinación del gas

Tabla 8. Resumen conversión isocalórica.

	PCI	eficiencia	GN equivalente [Nm ³ GN/kg RAC]
GN	36.000 [kJ/Nm ³]	90,0%	-
RAC	13.586 [kJ/kg]	77,0%	0,323

natural equivalente.

Para las condiciones de humedad del RAC considerado en los ensayos (10,3%), el equivalente en gas natural obtenido fue de 0,323 Nm³ GN/kg RAC. Es decir que para un consumo de GN medio de 5 Nm³ GN/t caña, la cantidad de RAC necesaria para eliminar el GN consumido sería de 15,5 kg RAC/t caña, lo que representa un 18% del RAC promedio disponible (83,6 kg/t caña). A partir de estos resultados, se puede indicar que el empleo del RAC como combustible adicional en calderas de vapor bagaceras permitiría, además de eliminar completamente el GN consumido en los ingenios de Tucumán, generar excedentes de RAC y de bagazo que estarían disponibles para otros usos.

CONCLUSIONES

Este estudio preliminar para el aprovechamiento energético del RAC resultó satisfactorio tanto para las tareas realizadas en campo, como para las ejecutadas en fábrica. La alternativa de enfardado cilíndrico resultó más favorable en cuanto a la densidad volumétrica de compactación lograda (195 kg/m³), en comparación con la del enfardado prismático (170 kg/m³). Sin embargo, por cuestiones de transporte y almacenamiento resultan más convenientes los fardos prismáticos.

El ensayo de granulometría del bagazo a la salida del trapiche arrojó un diámetro promedio de partículas de 7,63 mm; y el tamaño de las partículas de RAC obtenidas luego del picado fue de 8,21 mm.

Los ensayos de combustión realizados muestran que es posible quemar mezclas de bagazo con RAC en calderas bagaceras convencionales para una relación en peso de un 75% de bagazo y un 25% de RAC. Se observó un incremento en la producción de vapor de 21% respecto al vapor generado con bagazo únicamente (54.700 kg/h vs. 45180 kg/h). La presión del vapor presentó variaciones del 3% (24,20 ata vs. 23,47 ata). No se observaron variaciones significativas en la

temperatura del vapor.

Con respecto al rendimiento térmico determinado para la caldera de vapor ensayada, se observó un aumento del 5% respecto al caso base. Asimismo, para igual producción de vapor, el ahorro de bagazo representó un 43% respecto al consumo de bagazo original (25.878 kg/h).

El equivalente determinado del RAC en gas natural fue de 0,323 Nm³ GN/kg RAC. Es decir que para un consumo de GN medio de 5 Nm³ GN/t caña, la cantidad de RAC necesaria para eliminar el mismo sería de 15,5 kg RAC/t caña, lo que representa un 18% del residuo total disponible.

Si se considera una producción de 14 millones de t caña/año la para la provincia de Tucumán, el ahorro de GN sería aproximadamente de 70 millones de Nm³ GN/año.

Este estudio preliminar demuestra que el empleo del RAC como combustible adicional en calderas de vapor bagaceras permitiría eliminar completamente el consumo de GN de la industria azucarera de Tucumán. Además, se lograría generar excedentes de RAC y de bagazo que estarían disponibles para otros usos, como ser el incremento de la producción de bioelectricidad para venta a la red, producción de papel y producción de biomateriales, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al personal de la Sección Agronomía de la Caña de Azúcar de la EEAOC por su colaboración.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Agüero, A. C.; J. R. Pisa; C. J. Agüero y A. T. Bugeau. 2004.** Poder calorífico del bagazo de caña de azúcar. Revista CET 24, FACEyT, UNT, pp. 32-37.
- Alonso, J.; E. Romero y J. Scandaliaris. 2005.** Cosecha en verde de la caña de azúcar y aprovechamiento de sus residuos. Avance Agroind. 26 (2): 22-28.
- Aso, G; E. A. Feijóo; S. M. Sosa, y D. Paz. 2008.** Residuos agrícolas de la cosecha en verde de la caña de azúcar: Experiencias de secado natural en el campo. Avance Agroind. 29 (1): 19-22.
- ASTM D 2015-96, 1996.** Standard Test Method for Gross Calorific Value of Solid Fuel by the Adiabatic Bomb

- Calorimeter. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 3174-02, 2002.** Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 5142-02a, 2003.** Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- Briceño C. O.; J. H. Cock & J. S. Torres. 2001.** Electric power from green harvesting residues of sugar cane in Columbia : A Pre-Feasibility Study on its Technical and Economic Viability. *International sugar journal* 103 (1227): 107-111.
- Cárdenas G. J. y P. Garolera De Nucci. 2013.** Sostenibilidad en la producción de biocombustibles. *Avance Agroind.* 33 (2): 39-43.
- Casen, S. D.; E. R. Romero; J. Fernández de Ullivarri; P. Fernández González; A. Sánchez Ducca; D. Pérez; F. Soria; P. Digonzelli; L. Alonso y D. Duarte. 2011.** RAC potencialmente disponible en el área cañera de Tucumán y alternativas de enfardado. En: Resúmenes de la Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar, 17, Orán, Salta, R. Argentina, pp. 179-183.
- Castagnaro A.; M. A. Golato; D. Paz y E. A. Feijóo. 2011.** Caracterización energética de biomasa residual de origen agroindustrial de Tucumán. *Avance Agroind.* 32 (2): 33-37.
- Diez, O. A.; G. J. Cárdenas; L. F. Mentz. 2010.** Poder calorífico superior de bagazo, médula y sus mezclas, provenientes de la caña de azúcar de Tucumán, R. Argentina. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 87 (1): 29-38.
- Digonzelli P.; L. Alonso; S. Casen; J. Giardina; E. Romero; M. F. Leggio Neme; J. Scandaliaris; J. Alonso; J. Fernández de Ullivarri y J. Tonatto. 2006.** Manejo de los residuos de la cosecha en verde de la caña de azúcar: evaluación preliminar de máquinas enfardadoras. *Avance Agroind.* 27 (4): 25-27.
- 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. y Agríc. de Tucumán* 92 (2).
- Figuroa L. R.; M. Morandini y C. Hernández. 2005.** Quema y conservación de los residuos de la cosecha de caña de azúcar en la llanura deprimida de Tucumán. *Avance Agroind.* 26 (2): 29-31.
- Golato, M. A.; F. J. Franck Colombres; G. Aso; C. A. Correa y D. Paz. 2008.** Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 85 (2): 17-31.
- Magasiner, R. & J. de Kock. 1987.** Design Criteria for fibrous fuel fired boilers. *Energy World*, Agosto-Setiembre: 4-12.
- Povse, V. y H. Bogo. 2008.** Análisis de C, H, N, S y O sobre muestras sólidas. Informe inédito (MA-100409-022/034). Inquimae, FCEyN, UBA, Buenos Aires, R. Argentina.
- Ripoli, T. C. C. y M. L. C. Ripoli. 2007.** Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. 2ª Edic. Piracicaba, Brasil, pp. 310.
- Romero, E. R.; J. Scandaliaris; P. A. Digonzelli; L. G. Alonso; F. Leggio; J. A. Giardina; S. D. Casen; M. J. Tonatto y J. Fernández de Ullivarri. 2009.** Effect of variety and cane yield on sugarcane potential trash. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 86 (1): 9-13.
- Tortora M. L.; L. Vera; N. Grellet Naval; J. Fernández de Ullivarri; P. A. Digonzelli y E. R. Romero. 2013.** Effect of sugar cane trash blanketing on the development of microorganisms of agronomic and environmental interest. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 90 (1): 61-68.
- Valdés Delgado, A.; G. J. Cárdenas y E. F. Castillo Monroy. 2005.** Los residuos y residuales agroindustriales de la producción de azúcar. Publicación CYTED, La Habana, Cuba, pp: 4-9.
- Villegas Aguilar P. J.; O. Cruz Fonticiella; Á. Rubio González; B. Bucki Wasserman y F. Pérez Egusquiza. 2005.** Evaluación del impacto ambiental del uso de biomasa en las fábricas de azúcar cubanas. Consultado en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar12/HTML/articulo01.htm>
- Zamora Rueda G. del H.; G. Mistretta; C. E. Gutierrez; F. L. Peralta; M. Golato; M. Ruiz; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2016.** Características energéticas del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán y su análisis como combustible adicional de calderas bagaceras. *Avance Agroind.* 37 (3): 14-18.