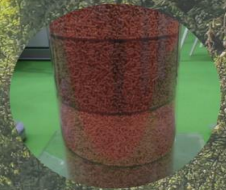




Red Iberoamericana de Tecnologías
de Biomasa y Bioenergía Rural

SISTEMAS DE BIOMASA Y BIOENERGÍA: CASOS EJEMPLARES EN IBEROAMÉRICA

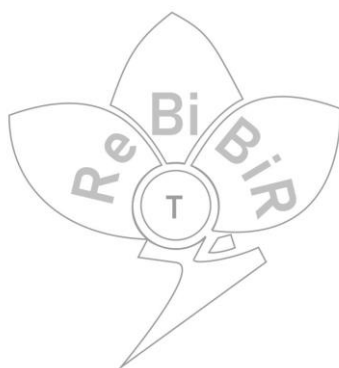
HACIA LA SUSTENTABILIDAD BIOENERGÉTICA TERRITORIAL



**RED IBEROAMERICANA DE TECNOLOGÍAS DE BIOMASA Y
BIOENERGÍA RURAL (REBIBIR-T)**

SISTEMAS DE BIOMASA Y BIOENERGÍA: CASOS EJEMPLARES EN IBEROAMÉRICA

HACIA LA SUSTENTABILIDAD BIOENERGÉTICA TERRITORIAL



**PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA
EL DESARROLLO (PROGRAMA CYTED)**



Red Iberoamericana de Tecnologías
de Biomasa y Bioenergía Rural



Una publicación de la Red Iberoamericana de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T) constituida bajo la promoción del Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

Cita Libro:

Manrique SM, Ojeda ML, Sánchez Hervás JM, Curbelo Alonso A, Garrido S. Editores. 2021. *Sistemas de Biomasa y Bioenergía: Casos Ejemplares en Iberoamérica. Hacia la sustentabilidad bioenergética territorial*. CYTED Ediciones. Una publicación de la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T). ISBN: 978-84-15413-40-0. Madrid, España. 444 Páginas.

Cita Capítulos:

Apellidos autores. 2021. Título capítulo. Estudio de caso N°. Páginas. En: *Sistemas de Biomasa y Bioenergía: Casos Ejemplares en Iberoamérica. Hacia la sustentabilidad bioenergética territorial*. Manrique SM, Ojeda ML, Sánchez Hervás JM, Curbelo Alonso A, Garrido S. Editores. CYTED Ediciones. Una publicación de la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T). ISBN: 978-84-15413-40-0. Madrid, España. 444 Páginas.

Fecha registro: 30/07/2021

Número de registro:

Editorial: Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED)

ISBN electrónico: 978-84-15413-40-0

Los textos de este libro son copyleft. Los editores y autores autorizan la copia, distribución y citado de los mismos en cualquier medio y formato, siempre y cuando sea sin fines de lucro, el autor sea reconocido como tal, se cite la presente edición como fuente original, y se informe al autor. La reproducción de los textos con fines comerciales queda expresamente prohibida sin el permiso expreso del editor. Toda obra o edición que utilice estos textos, con o sin fines de lucro, deberá conceder estos derechos expresamente mediante la inclusión de la presente cláusula copyleft.



Programa
Iberoamericano
de Ciencia y
Tecnología para el
Desarrollo



Red Iberoamericana de
Tecnologías de
Biomasa y Bioenergía Rural

Estudio de caso XI, 2021: 229-246
ISBN: 978-84-15413-40-0

CASO XI. Diversificación de la producción agro industrial del Noroeste Argentino a través de la producción de pellets de residuos de cosecha de caña de azúcar

Guillermo Martínez Pulido¹, Gabriela Nuño^{1,2}, Yamile Perdiguero Samaja¹, Marcos Gabriel Risso¹, Florencia Peralta¹, Martín Rearte¹

¹-Departamento de Energías Renovables NOA, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), San Miguel de Tucumán, Tucumán, CP4000, Argentina

²-PROIMI-CONICET, San Miguel de Tucumán, Tucumán, CP4000, Argentina

Resumen: Argentina cuenta con una importante producción de caña de azúcar particularmente en la región Noroeste, la cual ha impulsado la economía local en las últimas décadas, principalmente a través de la producción de etanol para el corte con las naftas según Ley 26.093/06. Este impulso ha generado grandes asimetrías en la cadena de valor concentrando la riqueza hacia el extremo industrial relegando cada vez más a los pequeños productores. El ensayo llevado adelante por especialistas de INTI y coordinado con diferentes actores de la cadena agroindustrial de producción de azúcar, contempló la parametrización de la recolección de los residuos agrícolas de caña de azúcar (RAC), la logística hacia la planta de pelletizado, el pretratamiento, el conformado del pellet y su caracterización preliminar, para lograr validar la tecnología a escala industrial de pelletizado como alternativa al manejo actual de esta biomasa residual, que además genera un pasivo ambiental para la región muy importante. Los resultados fueron positivos logrando un pellet de características adecuadas para aplicaciones térmicas. Este estudio plantea por un lado una alternativa tecnológica viable para disminuir las asimetrías del sector mejorando las condiciones de los minifundistas y cooperativas dueñas del recurso, y por otro una base para el desarrollo industrial de plataformas de biorrefinerías a escala piloto y el análisis de procesos involucrados en la generación de biocombustibles sólidos a partir de residuos agroindustriales de relevancia regional o nacional que pueden generar grandes impactos en el sector energético a futuro.

*Correspondencia: Martín Rearte. E-mail: mrearte@inti.gov.ar

1. Introducción

A nivel mundial, Argentina es un productor importante de azúcar y alcohol, donde las actividades sucro-alcoholeras se concentran principalmente en el noroeste argentino (NOA), región que incluye a las provincias de Tucumán, Salta y Jujuy. Esta industria y las actividades asociadas al cultivo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) así como también la matriz energética que surge de esta, representan la actividad económica más importante en la región con más 365.000 hectáreas implantadas, de las cuales se derivan y procesan por año alrededor de 20 millones de toneladas de caña de azúcar.

La caña de azúcar se planta durante todo el año y las actividades fabriles se realizan desde mayo hasta mediados de noviembre. La introducción de bioetanol para el corte con las naftas ha cambiado el paradigma de la industria y de los productores al reasignar el excedente y aumentar el área de siembra para satisfacer la nueva demanda, mejorando así la rentabilidad y la previsibilidad. Sin duda esta actividad tiene una fuerte influencia socioeconómica en la región del NOA, según el Centro Azucarero Argentino (2017), se generan 54.000 puestos de trabajo directos y 140.000 indirectos. Solamente en Tucumán la industria sucro-alcoholera aporta el 10% del Producto Bruto Provincial y el 6% en Jujuy, segunda en el volumen de producción.

El área cañera cosechable en Tucumán, mostró una tendencia creciente hasta la zafra 2013, presentando una caída pronunciada en el año 2014. Sin embargo, a partir del 2015 y hasta el 2020 se constató una tendencia creciente en relación al ciclo precedente en el orden del 0,58% (1.590 ha) estimando una superficie neta cosechable con caña de azúcar para la zafra 2020 de 276.880 ha. (Fandos, et al. 2020).

La zafra 2020 involucra en total 20 ingenios azucareros (15 en Tucumán, 2 en Salta y 3 en Jujuy), 16 destilerías de alcohol, 12 deshidratadoras de alcohol y 8.100 productores cañeros, de los cuales casi 6.000 pertenecen a la provincia de Tucumán. En cuanto a la producción se generan entre 2,2 a 2,5 millones de toneladas de azúcar, 690 millones de litros de bioetanol (utilizado mayoritariamente en el Programa Nacional de Biocombustibles y un porcentaje menor direccionado para el abastecimiento de sanitizantes para combatir el virus SARS-CoV-2) y 100 MW/h calor y energía a partir de procesos de co-generación. El consumo interno de azúcar se sitúa entre 1,6 y 1,7 millones de toneladas y para exportación se destina entre 0,5 a 0,9 millones de toneladas anuales (Informes de cadena de valor, Subsecretaría de Programación Microeconómica, 2018/3). Mientras las exportaciones no sean atractivas, el mercado interno puede considerarse estable. En este esquema los pequeños productores están agrupados en cooperativas, la mayoría exclusivamente cañeras con una baja diversificación productiva la cual básicamente se basa en la producción de miel de caña y proyectos vinculados a la cría de animales.

En cuanto a los residuos originados a partir de las actividades cañeras, es decir la malhoja o RAC que queda en el suelo luego de la cosecha, el uso de estos en la actualidad es muy bajo en relación a la cantidad de este recurso generado y teóricamente disponible para su valorización e industrialización. El uso de éstos está dificultado mayormente por sus altos costos de recolección, transporte y pretratamiento, básicamente por tratarse de una biomasa de baja densidad. Particularmente en el NOA la prohibición y eliminación paulatina de la quema del cañaveral y el avance creciente de la cosecha en verde, han dado lugar a la posibilidad de disponer de este material (Feijoo *et al.*, 2015), el cual presenta un alto potencial como fuente de energía por su disponibilidad teórica y sus características físico-químicas similares a las del bagazo (WISDOM, 2009).

Muchos estudios se han enfocado en la utilización de este material para la generación de energía (Maués, 2008; Devi *et al.*, 2020; Sampaio *et al.*, 2019; Ripoli *et al.*, 2020; Janke *et al.*, 2015; Vats *et al.*, 2019). Todos estos desarrollos se han visto limitados por el alto tenor de cenizas del RAC (alrededor del 12% dependiendo del método de cosecha), por lo cual se tiende al aprovechamiento con una mistura de otros materiales biomásicos como el propio bagazo (Feijóo *et al.*, 2015).

La utilización de los RAC para la producción de pellet como biocombustibles sólidos es una alternativa interesante para utilizar en las calderas del propio ingenio en conjunto con el bagazo (Muñoz, 2017). Esto último tiene el potencial de crecer como un negocio independiente para suplir combustibles fósiles en la región, siendo una línea estratégica de desarrollo impulsada por el INTI y por otras instituciones científicas de la región NOA y proyectos de fomento como el PROBIOMASA (FAO, 2009).

Como una aplicación específica, en el marco de este trabajo se llevó a cabo el primer ensayo a escala industrial en Argentina de conformado de pellets con RAC, con maquinaria disponible y existente en el mercado. El biocombustible esperado tiene como objetivo ser una alternativa viable para el reemplazo del gas natural y diversos quemadores y procesos térmicos e incluso para el precalentamiento de las calderas bagaceras en los ingenios reduciendo el costo de esta etapa.

El presente estudio propone a los RAC como una oportunidad para la implementación de tecnología preexistente para el pelletizado, la cual se encuentra consolidada en nuestro país para el sector alimenticio ganadero, lo que implica que serán necesarias modificaciones y adaptaciones para lograr un producto acorde a los estándares esperados en cuanto a biocombustibles sólidos, no obstante, se espera que dichas modificaciones sean viables y mayormente orientadas a la limpieza y el pretratamiento de la materia prima. Por otro lado, el trabajo permite también recopilar datos técnico-económicos necesarios para diseñar un modelo de aprovechamiento que represente una alternativa para mejorar la rentabilidad de la actividad del pequeño producto o cooperativa que los nuclea.

Este trabajo se enmarca en las actividades de investigación y desarrollo del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) llevado a cabo por el área dedicada a la

valorización de recursos biomásicos del Centro de INTI Tucumán en colaboración con el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET) como parte de un programa de fortalecimiento institucional en la temática de bioenergía y biorrefinerías para el Noroeste Argentino.

Problemática socio económica

El sector muestra una necesidad de diversificar sus actividades productivas en función de la crisis que ha atravesado la actividad cañera en las últimas campañas. Los bajos precios, los descuentos que se les realizan y los rendimientos, que muchas veces son establecidos por los ingenios por debajo de los valores que los productores consideran razonables, han llevado a analizar fuentes alternativas de ingresos.

Por otro lado, las transformaciones en el proceso productivo, mediante la mecanización integral de la cosecha, ha dado como resultado una disminución del empleo en las últimas tres décadas. Se estima que cada cosechadora reemplaza a 150 trabajadores (Ministerio de Hacienda, 2018).

En cuanto a la posibilidad de comenzar proyectos no vinculados a la caña de azúcar, diferentes instituciones de soporte a la actividad cañera en provincias como Tucumán, expresan que han encontrado reticencia de sus asociados debido al arraigo histórico y el peso cultural de esta actividad en la provincia. Esto se ha constituido como una limitación a la posibilidad de desarrollo de proyectos alternativos (PROICSA, 2013).

Problemática ambiental

Los residuos o biomasas residuales derivados tanto de la cosecha como de la producción industrial de azúcar, papel y etanol actualmente no son aprovechados, o se aprovechan mínimamente, lo que conlleva a un problema ambiental.

Las asimetrías en cuanto a la accesibilidad a la tecnología hacen que la cosecha sea altamente tecnificada o rudimentaria en cuanto a la eliminación de la malloja del campo. De esta manera la cosecha puede llevarse a cabo mecánicamente con una cosechadora integral que separa y trocea la caña antes de la carga al volcador o de formas rudimentarias e incluso a mano.

El pequeño productor que no tiene acceso a la maquinaria moderna de cosecha, a veces debe quemar la caña en pie antes de la cosecha, siendo esta práctica muy riesgosa ya que durante años ha sido causante de focos de incendios de enormes proporciones y trae aparejados perjuicios para la sociedad (afecciones a la salud, contaminación ambiental, cortes de energía eléctrica, accidentes de tránsito, etc.).

Por otro lado, resulta evidente que la quema de caña o sus residuos de cosecha tienen un efecto negativo en la producción debido a que se desencadena un proceso de degradación del azúcar almacenado en el tallo de la caña. Si además se realiza la quema en seco de los RAC se elimina la barrera protectora que tiene el suelo para evitar la evaporación del agua de lluvia almacenada en él con marcado efecto negativo para el cultivo de caña en años con deficiencia hídrica.



Figura 1 - Quema de caña en pie en Tucumán. (Fuente: diario La Gaceta)

Cabe destacar que esta práctica se sigue realizando en la actualidad, aun cuando está totalmente prohibida realizarla en la provincia de Tucumán. Si bien la tendencia de estos años es la disminución gradual de la quema de la caña, en el 2020 se quemaron 111.250 ha (aproximadamente el 40% de la superficie plantada en la provincia) según los datos proporcionados por la Sección de Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica de la Estación Agroindustrial Obispo Colombres. En cuanto a la cosecha mecanizada, la técnica es dejar la malloja como residuo agrícola para secarse en el campo y como aporte de materia orgánica o humedad al suelo. Desde el punto de vista energético, este residuo biomásico tiene alto potencial energético, pero debido al paradigma histórico de la cosecha de caña, donde gran parte de los productores argumentan que el rastrojo no aporta beneficios al suelo, es que la quema continua y no se ha desarrollado alguna alternativa viable de aprovechamiento como por ejemplo el uso como biocombustible en grandes calderas para la co-combustión con el bagazo de la caña. (Portocarrero *et al.*, 2017).

Problemática técnica

Como referencia inicial los RAC actualmente se recolectan con dos tipos de máquinas, una denominada megaenfardadora y otra rotoenfardadora las cuales ya han sido sujetas a estudios comparativos para dilucidar sus costes y rendimientos. Este trabajo está enfocado al proceso de transformación industrial pero la recolección en sí misma es un campo de desarrollo mecánico aún con mucho potencial.

En cuanto al acondicionamiento e integración en las técnicas de cultivo, la limpieza y pretratamiento para lograr las condiciones necesarias para el conformado de pellets para uso energético, todavía representa un reto. Algunos de estos factores se desarrollaron en este estudio y otros se analizan para futuros trabajos de mejora para esta aplicación dentro del campo de la bioenergía.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es recopilar las directrices técnicas y metodológicas necesarias para diseñar a corto plazo un modelo de negocio rentable basado en el desarrollo de un agro pellet o pellet energético a partir de residuos agrícolas, un nuevo biocombustible para aplicaciones industriales de alcance regional que pueda cumplir estándares de calidad del mercado, ya sea para uso en aplicaciones térmicas industriales o residenciales. En este trabajo nos enfocamos especialmente en los RAC que presentan un alto potencial energético con alta producción en el noroeste argentino.

Como objetivos específicos se plantean:

- a) Determinar las características fisicoquímicas del RAC, para establecer el potencial que tiene como biocombustible, y para comprender su comportamiento durante el proceso de compactación y densificación y durante la conversión termoquímica.
- b) Elaborar agro pellets a partir del RAC caracterizado y realizar ensayos de caracterización a los pellets obtenidos para asegurar la eficacia y calidad del producto.

3. Metodología

3.1. Recolección y transporte

Para viabilizar la recolección y acopio de RAC se trabajó con un productor cañero quien proporcionó la materia prima. La elaboración del RAC se realizó utilizando un tractor, una hileradora y una mega-enfardadora. En cuanto a la carga y el transporte de los fardos, el productor articuló con el proveedor del servicio de recolección para que se transportaran 2 rollos de RAC desde Tucumán hasta la ciudad de Rafaela, Santa Fe donde está localizada la empresa en la cual se realizaron las pruebas.



Figura 2 – Preparación de los rollos para ser transportados a la planta de pelletizado (Fuente: Martínez Pulido, Tucumán, 2019).

3.2. Recepción y acondicionamiento de la biomasa residual

Los fardos fueron recepcionados y se tomaron muestras para analizarlas físicamente a través de ensayos de fotometría. En este ensayo, por medio de una inspección visual sobre una lámina con una grilla de cuadrícula mayor de 5 cm² y cuadrícula

menor de 1 cm²., se determina la uniformidad de la biomasa a través del estudio de su composición en relación al contenido de distintos materiales y al tamaño. El acondicionamiento se realizó a través de dos etapas. En una primera etapa se realizó una transformación o desmenuzado con una máquina desmenuzadora (Figura 3 a) accionada por toma de fuerza de tractor. A esto le siguió una segunda transformación o molienda con molino de martillo con motor 50 HP con malla de 7 mm (Figura 3b).



Figura 3.- Maquinaria para el acondicionamiento de tamaño de la biomasa. a) máquina desmenuzadora. b) Molino de martillo (Fuente: Martínez Pulido, Tucumán, 2019).

3.3. Caracterización de la biomasa

La caracterización de los residuos de caña de azúcar, para la muestra M1, se basó en análisis de:

- Contenido de humedad (Hames *et al.*, 2008), se determinó por secado de muestra al aire. Método adecuado para la preparación de grandes cantidades (>20 g) de muestra recogida en campo, donde la humedad ambiental permite secar la muestra hasta un contenido en humedad por debajo del 10%. Las muestras de biomasa deben contener piezas de dimensiones menores de 5x5x0,6 cm. Los tallos y ramas pequeñas no deben tener un diámetro superior a 0.6 cm. El material se debe extender en una superficie adecuada, sin exceder los 15 cm de altura, dejándose secar al aire antes del análisis. Finalmente se debe voltear el material al menos una vez al día para asegurar un secado uniforme. Se considera que el material está seco cuando el contenido en humedad es menor de 10% y el cambio de peso es menor de 1% en 24 horas.
- Contenido de cloro y azufre se determinó por medio de técnicas según normas modificadas (ASTM E 776-87 modificada, ASTM D 3177-02 modificada, ISO 351, AS1038.6.1, AS1038.8.1). El %Cloruros: el extracto obtenido de la combustión de la muestra en bomba calorimétrica y se titula con nitrato de plata utilizando K₂Cr₂O₇ como indicador. Se determina el %cloruro por volumetría. El %Azufre: el extracto obtenido de la combustión de la muestra en bomba calorimétrica se hace reaccionar con BaCl₂, hasta formación de un precipitado de

BaSO₄, el cual se calcina. El peso del residuo es equivalente al azufre presente en la muestra.

- Poder calorífico superior (PCS) se determinó por combustión completa de 1 g de muestra seca en bomba calorimétrica automática IKA C5000, en método adiabático de acuerdo a normativa internacional (ASTM D5865, ISO 1928, AS1038.5.1).
- Contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cenizas, se tomó como referencia de la literatura (Reyes Montiel, 2003).
- Por otro lado, para las muestras M1, M2 y M3 (obtenidas en la etapa de acondicionamiento de la biomasa residual) se analizó:
- Densidad aparente (UNE-EN 15103), se determinó pesando un volumen determinado de muestra en vaso de precipitado de 1 L de capacidad total, y se determina la densidad aparente por cálculo. La determinación se efectúa en las condiciones de recepción de la muestra. El resultado se expresa en kg/m³ aparente.
- Contenido de humedad (ASTM D3173-03, ISO 11722, AS1038.3) por secado de muestra en estufa con tiro forzado de aire, a 105°C hasta peso constante.
- Tamaño de partícula a través de un ensayo de distribución granulométrica (UNE-EN 15149-1). Se realiza una clasificación de la muestra según el tamaño de partículas de la misma. Se utilizan tamices de apertura estandarizada, seleccionados de acuerdo a las características de la muestra.

3.4. Ensayo industrial de conformado de pellets de RAC

El proceso de pelletizado que consiste en la compactación de la biomasa de madera natural, mediante la aplicación de una gran presión con unos rodillos sobre una matriz perforada, a través de la cual se hace pasar el material. La operación de pelletizado se llevó a cabo en una prensa marca Giuliani (fig. 4a) con matriz anular de 6 mm de diámetro de extrusión (fig. 4b) y motor eléctrico de 75 HP. El INTI trabaja en el diseño mecánico de estos componentes críticos para el proceso de pelletizado dando soporte a las empresas del rubro.



Figura 4. a) Prensa Pelletizadora. b) matriz (Fuente: Martínez Pulido, Tucumán, 2019).

3.5. Caracterización del biocombustible

Sobre los pellets ya elaborados se estudiaron distintos parámetros de calidad, basándose en la normativa europea EN14961-2 y la más reciente norma ISO 17225-5 para pellets de madera para usos térmicos (ISO 17225-5). Se determinó contenido de humedad que influye sobre el poder calorífico y sobre la eficiencia de la combustión, dimensiones que influyen sobre la velocidad de combustión, densidad aparente que influye de manera considerable sobre el almacenamiento, transporte y también sobre el comportamiento durante la combustión, y durabilidad que determina la resistencia de la estructura del pellet al estrés mecánico.

4. Resultados

4.1. Recolección y transporte

En esta etapa solamente se caracterizó el tipo de fardo por forma y dimensiones, ya que los costes de transporte y de servicio de enfardado (megaenfardado o enrollado) son valores conocidos en la actividad siendo hasta 3 veces más costoso que el servicio el cultivo de la caña misma (Paredes *et al.*, 2016).

4.2. Recepción y acondicionamiento de la biomasa residual

En la Figura 5a se puede observar el material en las condiciones en la que ingresó al laboratorio de biocombustibles de INTI, obtenido en el lugar de recolección antes de que se realizara el enfardado.

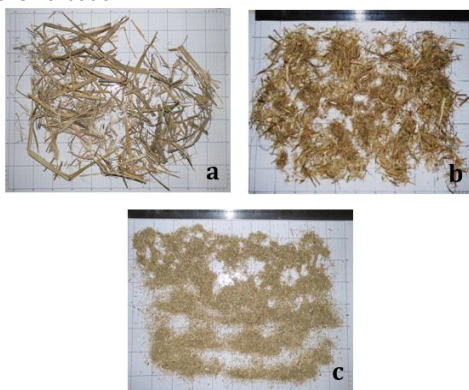


Figura 5. Fotometría. a) muestra M1, RAC sin enrollar. b) muestra M2 obtenida a partir de la maquina desmenuzadora. c) muestra M3 obtenida a partir de molino de martillo. Fotometría: Grilla de 50x50 mm de resolución 10mm. (Fuente: Martínez Pulido, Tucumán, 2019).

La muestra presentó material más o menos uniforme en cuanto a composición, con un largo de fibra de 400 a 600mm, excediéndose esta medida a la medida necesaria para el ingreso a los sistemas de la maquinaria para pelletizado de acuerdo a las especificaciones del proveedor. El largo de fibra influye en los sistemas de transporte enredando las fibras en los componentes rotatorios sin mencionar que no podría ingresar ni fluir en la prensa pelletizadora. Por lo que se continuó con el correspondiente acondicionamiento de la biomasa a través de distintas etapas de molienda, observándose a través del ensayo de fotometría la obtención de tres muestras de distintos tamaños. Las muestras fueron designadas como M1 (muestra sin acondicionar), M2 y M3 (muestras acondicionadas).

En la primera etapa de acondicionamiento se obtuvo una biomasa M2 con tamaño de partícula de 50 a 120mm (Figura 5b). En la segunda de transformación se llegó a obtener una muestra M3 con un tamaño de partícula final de 2 a 15mm (Figura 5c).

4.3. Caracterización de la biomasa

El análisis de humedad, densidad aparente y distribución granulométrica (a cada una de las muestras que se obtuvieron en las etapas de acondicionamiento) se puede observar en la figura 6. La densidad aparente de la biomasa aumenta en la muestra M3, lo que facilita su manejo a granel y transporte.

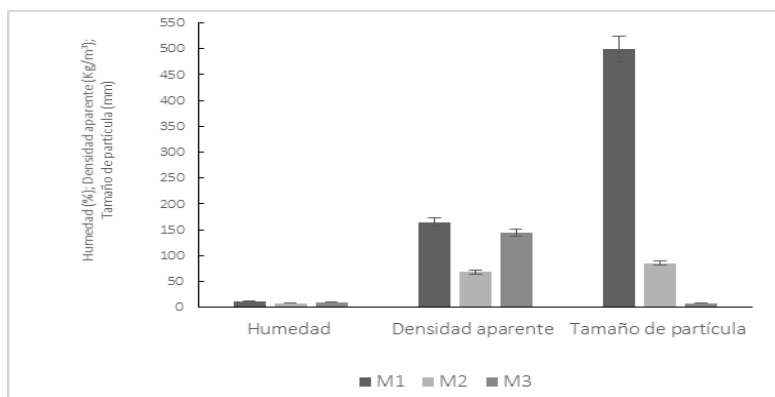


Figura 6. - Caracterización física de la biomasa residual

En la tabla 1 se puede observar la caracterización físico química realizada a la muestra M1. El contenido de C e H es proporcional al contenido energético de la biomasa en estudio, y está relacionado con la calidad de la biomasa y la cantidad de calor que puede liberar en un proceso de termo conversión, expresada a través del poder calorífico superior. Los resultados recopilados muestran que el contenido de C, H y O es similar a otras biomásas lignocelulósicas como el bagazo o la madera (De Palma

et al., 2019) con lo que se puede considerar al RAC una biomasa con buen potencial combustible donde el poder calorífico será muy similar al de otras biomásas lignocelulósicas.

Por otro lado, el contenido de N y S se presentan bajos y similares al de otras biomásas lignocelulósicas. Estos parámetros permiten conocer el potencial de contaminación que posee la biomasa ya que están relacionados con la emisión de contaminantes (óxidos de azufre y nitrógeno) durante el proceso termoquímico. En cuanto al contenido de N, también sirve de parámetro para clasificar a la biomasa en estudio, de esta manera y con el valor de referencia obtenido, se lo clasifica como combustible de N medio (0,4-1% en peso) según Sommersacher et al. (2012) El contenido de N en el RAC es atribuido a la presencia de N en las moléculas de clorofilas y en las proteínas de las hojas de la caña de azúcar. En cuanto a la ceniza, esta genera problemas de corrosión, aglomeración y deposición o incrustaciones en los sistemas de combustión. En los resultados se puede observar que el contenido de ceniza obtenido fue elevado debido a que los RAC contienen contaminantes del suelo por el sistema de recolección implementado. Sin embargo, existe la posibilidad de disminuir el contenido de contaminantes del suelo en los RAC realizando la recolección con maquinaria integral con modulo incorporado, donde se realiza una separación del despunte dejando solo la hoja en el suelo.

Tabla 1 - Caracterización química y fisicoquímica de la biomasa residual

| Análisis | Valores | Técnica de medición |
|----------------------------|----------------|--|
| Poder calorífico (Kcal/Kg) | 2300/2400 | ASTM D5865, ISO 1928, AS1038.5.1 |
| Carbono (%) | 45.28 ± 0.20 | (TGA) - based method, Reyes Montiel, 2003 |
| Hidrogeno (%) | 5.55 ± 0.05 | (TGA) - based method, Reyes Montiel, 2003 |
| Oxígeno (%) | 45.61 ± 0.15 | (TGA) - based method, Reyes Montiel, 2003 |
| Nitrógeno (%) | 0.43 ± 0.03 | (TGA) - based method, Reyes Montiel, 2003 |
| Azufre (%) | 0.13 ± 0.02 | ASTM E 776-87 modificada, ASTM D 3177-02 modificada, ISO 351, AS1038.6.1, AS1038.8.1 |
| Cenizas (%) | 9.5 ± 0.10 | ASTM D7582-12 modificada ASTM D5142-02 |

Nota. El poder calorífico superior se determinó con un contenido de humedad en la biomasa del 15%. Los valores de CHON se toman de bibliografía para verificar en laboratorio.

4.4. Ensayo industrial de conformado de pellets de RAC

La pelletización es un proceso de compactación y densificación de material lignocelulósico de determinadas condiciones (granulometría y humedad menor del 12%) para obtener cilindros de diámetro entre 7 y 22 mm y de longitud entre 2,2 cm a 7.0 cm. La compactación facilita la manipulación y el almacenamiento por reducción de volumen, disminuye los costos de transporte y aumenta su valor energético por unidad de volumen (aumento de densidad energética).



Figura 7. - Pellet de RAC de caña de azúcar (Fuente: Martínez Pulido, Tucumán, 2019).

Primero se acondicionó la materia prima en cuanto a granulometría, ya descrita en los pasos previos, y a humedad. Esta última realizada de forma natural en el campo sin gastos de energía extra para eliminar el exceso de agua que puede llegar a repelerse con el aglutinante (lignina) y generar rompimiento de la estructura del pellet, poca densificación y poca durabilidad en los pellets. Finalmente se llevó a cabo el proceso de compactación obteniéndose pellets (Figura 7) a los que se les realizó la correspondiente caracterización.

4.5. Caracterización del biocombustible

En general, todos los valores medios de los parámetros analizados se encuentran dentro de los requisitos de la normativa cumpliendo con los criterios de calidad para pellets clase A1 quedando algunos más específicos para futuras determinaciones (tabla 2).

Tabla 2 - Resumen de los parámetros de calidad del pellet, valores estándar y técnicas de medición

| Variable | Valor obtenido | Valor Ref. Norma ISO 17225 | Técnica de medición |
|------------------------------------|----------------|----------------------------|------------------------------------|
| Longitud promedio (mm) | 12 | $3,15 \geq L \geq 40$ | Tumuluru et al., 2014 |
| Diámetro (mm) | 5.8 | 6 ± 1 u 8 ± 1 | |
| Humedad (%) | 9 | ≤ 10 | ASTM D3173-03, ISO 11722, AS1038.3 |
| Densidad (kg/m ³) | 728 | ≥ 600 | UNE-EN 15103 ISO 17828 |
| Durabilidad mecánica (Peso-% a.r.) | 95 | $\geq 97,5$ | ISO 17831-1 |
| Finos, F (Peso-% a.r.) | - | < 1 | ISO 18846 |

Nota: El producto terminado tiene las siguientes características de acuerdo al Procedimiento VRB-P-TPA02 de calidad de Pellet basado en la Normativa Europea EN14961-2. Se usó como referencia Pellets de Madera para Usos Térmicos (ISO 17225-5)

5. Discusión

Se debe tener en cuenta que este ensayo se realizó en varias etapas desde los estudios de recolección y pelletizado hasta las caracterizaciones modernas según las normas vigentes que fueron desarrollándose durante este período. En el año 2019 se aprobó y publicó en Argentina el primer juego de normas IRAM-ISO 17225 para clasificación de biomásas para uso energético en las que se consideran a los residuos agrícolas como potencial fuente de energía incluyendo los RAC.

Adicionalmente en los últimos años se logró modificar el método de cosecha, haciendo que la maquinaria agrícola sea capaz de discriminar la malloja en el momento de la cosecha de la caña, desagregando los RAC en un RAC residual y el despunte de caña de azúcar. De esta manera se abre la puerta a una mejora de la calidad del material o materia prima apta para la producción de pellet, referida al contenido de cenizas generado luego de la termoconversión.

En cuanto al proceso de secado, este no podría desarrollarse de forma natural debido a que el material se retiraría del campo, el control de humedad se debería hacer en planta o con sistemas híbridos de secado natural y forzado. A partir de los resultados obtenidos en este estudio se refleja la posibilidad de alcanzar una calidad para este futuro biocombustible similar a la calidad propuesta en los altos estándares de exportación.

Cabe destacar que este biocombustible puede ser un hito disruptivo para el uso y la eficiencia de la energía en los ingenios azucareros, diversificando el negocio. Mientras que para el pequeño productor puede significar una mejora de la rentabilidad de la tierra y la posibilidad de industrializar su actividad a través de emprendimientos cooperativos capaces de operar plantas de pelletizado de menor potencia para los mercados locales.

Queda pendiente la integración de la cadena de costos desde la recolección hasta la producción final del pellet integrando los parámetros de valor agregado que otorga una certificación. En este caso, el INTI está desarrollando certificaciones para el mercado bioenergético y las nuevas tecnologías emergentes en la región para revalorizar este residuo biomásico.

Finalmente se puede resaltar que el objetivo de validar la tecnología existente y su adaptabilidad para este biocombustible se logró satisfactoriamente y presentó interés en otras regiones productoras de caña de azúcar como Cuba y Brasil y en eventos asociados a la industria del sector como el "Congreso Mundial de Caña de Azúcar ISSCT 2019" e incluso en instituciones internacionales dedicadas a los biocombustibles de 2G como el CENER en España.

6. Conclusiones del estudio

A pesar de que existe una gran cantidad de subproductos agrícolas en Argentina, la producción de pellets con biomasa residual agrícola se desarrolla lentamente, siendo una razón de esto la diferencia de calidad entre los pellets de madera y los pellets agrícolas. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la calidad obtenida fue satisfactoria para el pellet de RAC si se compara con las características definidas por la norma europea. Sin embargo, habría que estudiar otros parámetros de calidad como contenido de cenizas, contenido de azufre y fusibilidad para obtener una idea más amplia sobre la calidad y la utilidad en cuanto a transformación energética de los pellets producidos. Estos datos podrían sugerir mayor atención en proceso de fabricación y selección de materia prima.

Desde el punto de vista industrial, el proceso mostró una alta adaptabilidad para trabajar con este material sin mayores dificultades considerando que se trabajó por lotes, en caso de una producción continua serán necesarias adaptaciones para poder asegurar una granulometría adecuada para la alimentación y el conformado en la prensa pelletizadora. Adicionalmente un factor a controlar para mejorar la calidad es la humedad de ingreso de los RAC a los sistemas de molienda, antes del pelletizado y finalmente después del conformado.

Otro factor importante a tener en cuenta en la calidad final es el cuidado de la estructura del material desde la etapa de conformado hasta su enfriamiento. Esta última característica no es tan importante en la producción de pellets para alimentos, no así para los productos bioenergéticos que deben preservar una mayor uniformidad para poder ser dosificados en los quemadores industriales o más aún en sistemas más exigentes como en aparatos de calefacción doméstica.

Este trabajo permite concluir que el RAC presenta un alto potencial para la elaboración de pellets energéticos, susceptibles de ser aprovechados en la producción de energías renovables. Así, se establece una base sólida que permitirá avanzar en materia de estrategias bioenergéticas para promover la viabilidad de proyectos que utilicen energía derivada de biomasa.

7. Aportes y reflexiones para un Maletín de Buenas Prácticas

En Argentina, la distribución de energía eléctrica, principalmente en áreas rurales, no es uniforme, generando una brecha de desarrollo para comunidades apartadas de la red eléctrica. La energía eléctrica para iluminación y otros usos en zonas de difícil acceso, se realiza mediante grupos electrógenos a gasolina o diésel. El auto-abastecimiento con biocombustibles de producción descentralizada en pequeñas plantas autónomas a partir de residuos biomásicos procedentes de la economía regional, se muestran entonces como una oportunidad para la generación de energía eléctrica. El noroeste argentino, y en particular la provincia de Tucumán, tienen gran disponibilidad de biomasa, caracterizándose por la gran diversidad agroindus-

trial, centrada principalmente en cultivo de caña de azúcar y de cítricos, la poda de frutales y la producción de sus derivados.

El consumo total de biomasa con fines energéticos a nivel nacional se estimó en 10 987 015 toneladas. Los sectores demandantes Considerados fueron la industria azucarera (50%), la autogeneración (19%), las carboneras (11%), los hogares (6%), las panaderías (4%), el procesamiento de yerba mate (4%), las parrillas (2%), el procesamiento De té (2%), y las ladrilleras, las cementeras, las escuelas rurales y el procesamiento de tabaco (2% en conjunto) (Denaday *et al.*, 2020). El balance de biomasa para fines energéticos revela un superávit en la mayor parte del territorio argentino. La oferta principal se da en provincias como Tucumán que tienen industrias generadoras de residuos biomásicos, como los ingenios. De modo análogo, la mayor demanda proviene de sitios con industrias que generan energía (Denaday *et al.*, 2020).

La información cuantitativa y cualitativa que resulta del presente trabajo es indispensable para proyectar diferentes escenarios, ya que la transformación del sector energético argentino requiere de grandes inversiones de capital, el acondicionamiento del sistema eléctrico nacional y la identificación y cuantificación de los recursos renovables. Por otro lado, esta información colabora con la toma de decisiones técnica y financieramente aumentando la participación de la energía derivada de biomasa en la matriz energética.

El desarrollo de la matriz energética en base a las energías renovables presenta diversas ventajas, tales como:

- Agregado de valor al sector agropecuario, forestal y forestoagroindustrial;
- Generación de empleo;
- Disponibilidad local;
- Aumento de la eficiencia productiva;
- Conversión de pasivos ambientales (residuos, efluentes) en materia prima energética;
- Redistribución de ingresos hacia el sector rural;
- Facilidad de conservación y almacenamiento.

La disponibilidad local se destaca como ventaja del presente trabajo, donde el residuo de cosecha de caña puede ser recolectado por métodos convencionales o con nuevas técnicas de cosechas integradas que ponderan el despunte de la caña antes de dejarlo en el suelo, a menores costos. El volumen de RAC de caña de azúcar factible de recolección por hectárea cultivada depende del rendimiento, la tecnología empleada y las características y necesidades edáficas de la zona. Por recomendación de técnicos regionales, se empleó un promedio potencial de 5 t/ha año (Denaday *et al.*, 2020).

La principal dificultad que presenta el estudio es que el RAC es un material de baja densidad por lo que los costos de logística son elevados y no todos los pequeños productores tienen acceso a la tecnología para su recolección. Sin embargo, el

biocombustible sólido desarrollado (pellets de RAC) presenta cualidades suficientes para ser utilizado en la industria y en los procesos de calefacción comerciales e incluso, incorporando técnicas de mejoramiento y sistemas de calidad a la producción de pellet, podría llegar a utilizarse para calefacción doméstica. Esto representa la posibilidad de reemplazo de combustibles fósiles y un biocombustible de mayor accesibilidad local que a su vez genera nuevos puestos de trabajo en la región.

Adicionalmente, si bien este modelo se basa en el RAC, es un modelo de estudio y validación para otros residuos agrícolas que podrían llegar a industrializarse y valorizarse para impulsar las economías regionales en diferentes lugares de Latinoamérica. A partir de esto, se recomienda la proyección del análisis de estudio a otras biomásas residuales también abundantes en la región. En este sentido, el desarrollo de escenarios futuros, el análisis para el desarrollo de plataformas de biorefinerías, y los estudios sobre la ubicación óptima de plantas consumidoras de biomasa con fines energéticos, facilitarán la formulación de políticas públicas y estrategias energéticas.

8. Referencias

- AS 1038.3. Coal and coke - Analysis and testing Proximate analysis of higher rank coal.
- AS 1038.5.1. Coal and coke—Analysis and testing Part 5: Gross calorific value.
- AS1038.6.1. Coal and coke - Analysis and testing - Higher rank coal and coke - Ultimate analysis Carbon and hydrogen.
- AS1038.8.1. Coal and coke - Analysis and testing Coal and coke - Chlorine - Eschka method.
- ASTM D 3177-02. Total Sulfur.
- ASTM D3173-03. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke.
- ASTM D5142-02. Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures.
- ASTM D5865. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke
- ASTM D7582-12. Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis.
- ASTM E776- 87. Standard Test Method for Forms of Chlorine in Refuse-Derived Fuel.
- Centro Azucarero Argentino. (2017). Proceso Productivo: Azúcar: Fuente natural de energía de fácil y rápida asimilación. <http://centrozucarero.com.ar/azucar/>
- De Palma K. R., García-Hernando N., Silva M. A., Tomaz E. & Soria-Verdugo A. (2019). Pyrolysis and Combustion Kinetic Study and Complementary Study of Ash Fusibility Behavior of Sugarcane Bagasse, Sugarcane Straw, and Their Pellets. Case Study of Agro-Industrial Residues. *Energy fuels*, 33: 3227-3238.
- Denaday F, Escartín C, Parodi G, Spinazzola E, 2020. "Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina". FAO. 2020. Colección Documentos Técnicos N.º 19. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8764es>
- Devi G. K., Vignesh K & Chozhavendhan S. (2020). Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts. Effective utilization of sugarcane trash for

-
- energy production. *Technology, Advances, Life Cycle Assessment, and Economics*, 12: 259-273.
- FAO (2009). *WISDOM Argentina, Análisis del balance de energía derivada de Biomasa en Argentina*. FAO 2009.
- EN 14961-1. (2010) *Solid biofuels e fuel specifications and classes e part 1: general requirements*. Brussels: CEN.
- EN 14961-2. (2011). *Solid biofuels e fuel specifications and classes e part 2: wood pellets for non-industrial use*. Brussels: CEN.
- Fandos C., Scandaliaris P., Carreras Baldrés J. I., Soria F. J., Giardina J., De Ullivarri J. F. & Romero E. R. (2020). *Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán. Area cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2020 en Tucumán. Reporte agroindustrial, ISSN 2346-9102*.
- Feijóo E. A., Golato M. A., Franck Colombres F. J., Paz D. & Cárdenas G. J. (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): 23-32.
- ISO 11722. (2013). *Solid mineral fuels -- Hard coal -- Determination of moisture in the general analysis*.
- ISO 17225-5. (2014). *Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 5: Graded firewood*.
- ISO 17828. (2015). *Solid biofuels - Determination of bulk density*.
- ISO 17831-1. (2015). *Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets*.
- ISO 18846. (2016). *Solid biofuels - Determination of fines content in quantities of pellets*.
- ISO 1928. *Solid mineral fuels – Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value*.
- ISO 351. *Solid mineral fuels -- Determination of total sulfur -- High temperature combustion method*.
- Janke L., Leite A., Nikolauz M., Schmidt T., Nelles M. & Stinner W. (2015). *Biogas Production from Sugarcane Waste: Assessment on Kinetic Challenges for Process Designing*. *Int. J. Mol. Sci.*, 16: 20685-20703.
- Maués J. A. (2008). *Optimisation of power generation from baggase and sugarcane waste in a brazilian sugar and alcohol mill*. *ISES Solar World congress: Solar Energy and Human Settlement*, 2445-2448.
- Ministerio de Hacienda. (2018). *Secretaría de Política Económica, Informes de cadenas de valor - Azucarera, N°3, junio*.
- Muñoz M. (2017). *Potencial de los Residuos Agrícolas de Cosecha de Caña de Azúcar, como un biocombustible*. https://www.researchgate.net/publication/320087116_Potencial_de_los_Residuos_Agricolas_de_Cosecha_de_Cana_de_Azucar_como_un_biocombustible.
- Paredes M. V., Pérez D. R., Casen S. & Romero R. E. (2016). *"Factibilidad técnica-económica de la recolección y enfiado del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) para su utilización con fines energéticos en Tucuman en la zafra 2015*. *Asociación Argentina de economía Agraria*, 1: 3-8.
-

-
- Portocarrero R., Ullivarri E., Valeiro A. & Vallejo J. (2017). Los residuos de la industria sucro-alcoholera Argentina. Serie: gestión de residuos de la industria sucro-energética argentina, INTA – EEA Famaillá, 8-9.
- PROICSA (2013). Caracterización de las cooperativas de productores de caña de azúcar de Tucumán, EEAOC.
- Reyes Montiel J. L. (2003). La biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental. *Centro Azúcar*, 30(2): 1-14.
- Rípoli T. C. C., Molina W. F. & Rípoli M. L. C. (2020). Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. *Scientia Agricola*, 57(4): 677-681.
- Sampaio I. L. M., Cardoso T. F., Souza N. R. D., Watanabe M. D. B., Carvalho D. J., Bonomi A. & Lopes Junqueira T. (2019). Electricity Production from Sugarcane Straw Recovered Through Bale System: Assessment of Retrofit Projects. *BioEnergy Research*, 1-13.
- Sommersacher P., Brunner T. & Obernberger I. (2012). Fuel Indexes: A novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion test sample by drying in nitrogen. *Proprieties of New Biomass Fuels. Energy Fuels*, 26: 380-390.
- Tumuluru J. S. (2018). Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. *Carbon Resour Convers* 1:44–54
- UNE-EN 15103. Solid biofuels - Determination of bulk density.
- UNE-EN 15149-1. Solid biofuels - Determination of particle size distribution - Part 1: Oscillating screen method using sieve apertures of 1 mm and above.
- Vats N., Khan A. A. & Ahmad K. (2019). Observation of biogas production by sugarcane bagasse and food waste in different composition combinations. *Energy*, 185: 1100-1105.
- WISDOM (2009). Argentina, Análisis del balance de energía derivada de Biomasa en Argentina. FAO.