

Eficiencia técnica de la producción de panela

The technical efficiency of Non Centrifugal Sugar production

María Eugenia Guerrero Useda, Juan Diego Escobar Guzmán

Resumen

El interés por el desarrollo de investigación aplicada en torno a la eficiencia técnica de las unidades agroindustriales utilizadas para la transformación de caña de azúcar en panela - más conocida como piloncillo en México y raspadura en Brasil, Cuba y Panamá-, ha incrementado, incluso en países en los que éste no es un producto de la canasta familiar. La panela o azúcar no centrifugado, como se le conoce técnicamente, es un producto promisorio dentro de las tendencias de consumo de alimentos menos procesados y más saludables. Sin embargo, además de los rezagos en los factores tecnológicos de producción que comprometen la eficiencia y la rentabilidad del proceso, la transabilidad de la panela enfrenta retos relacionados con la estandarización del proceso productivo y de las características del producto final. En este artículo se describen alternativas para mejorar el desempeño ambiental y energético de los trapiches paneleros.

Palabras clave: Azúcar no centrifugada, panela, proceso de producción, eficiencia energética, sostenibilidad ambiental.

Abstract

This paper provides an analysis of the technical efficiency of Non Centrifugal Sugar (NCS) production in Colombia. The NCS is a promising product in consumer trends of processed and less healthy foods. However, in addition to the lags in technological production factors that compromise the efficiency and profitability of the process, the tradability of NCS facing challenges related to the standardization of the production process and the characteristics of the final product. This article describes alternatives to improve environmental and energy performance of sugarcane mills.

Keywords: Non-centrifugal sugar (NCS), jaggery, technical efficiency, Bagasse furnace.

Recibido / Received: Noviembre 23 de 2014 Aprobado / Approved: Febrero 25 de 2015

Tipo de artículo / Type of paper: Investigación Científica y Tecnológica terminada.

Afiliación Institucional de los autores / Institutional Affiliation of authors: Universidad El Bosque, Grupo de investigación Agua, Salud y Ambiente.

Autor para comunicaciones / Author communications: María Eugenia Guerrero Useda, mguerrerou@unbosque.edu.co

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

Introduction

Por su tamaño, con cerca de veinte mil unidades de producción y cuatrocientos mil empleos directos, la cadena productiva de la panela es la segunda agroindustria rural de Colombia, después de la cadena del café. Y aunque Colombia es líder mundial por consumo per cápita con 38,6 kilos [1] y el segundo productor mundial, después de India que anualmente transforma en panela casi 108 millones de toneladas de caña de azúcar [2], las pequeñas unidades de producción panelera se caracterizan por su bajo nivel de mecanización y la ineficiencia técnica de la producción, situación que impone retos para la sostenibilidad y la competitividad de esta cadena.

Dentro de la cadena productiva de la panela se identifican cinco eslabones: proveedores, cultivadores, procesadores, comercializadores y clientes. El tercer eslabón de la cadena, el de los procesadores de la caña panelera, está integrada mayoritariamente por los dueños de pequeñas unidades agroindustriales para la transformación de la caña de azúcar, denominadas trapiches en Colombia. Este eslabón también está integrado por trapiches cooperativos, organizados en empresas asociativas de trabajo, y algunas empresas maquiladoras, del mismo modo que ocurre en India [2].

La Superintendencia de Industria y Comercio con referencia en estudio de mercado 2010-2012, informó que la producción de panela es un proceso verticalmente integrado, caracterizado por la prevalencia de los sistemas tradicionales de producción con muy baja tecnificación [3].

Y si bien, la producción nacional de panela se destina mayoritariamente al consumo interno, para el 2013 las exportaciones de panela alcanzaron las tres mil toneladas siendo Estados Unidos, España y Canadá los principales importadores de esta producción. Al mismo tiempo, el Estado Colombiano junto con Fedepanela, promovió la ampliación de las exportaciones hacia nuevos mercados, trazando las metas de exportación para el 2016 en cuatro mil quinientas toneladas métricas, para lo cual en tratados de libre comercio con países y grupos tales como Estados Unidos, Canadá, Suiza y la Unión Europea, se incluyeron medidas para garantizar la entrada de panela colombiana con cero aranceles. Es de señalar, que el 50% de la producción nacional de panela se concentra en los

departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Santander y en ellos, entre el 47% y el 53% de los costos totales del proceso se atribuyen al procesamiento de la caña de azúcar [1].

En [3], [4] y [5], entre otros estudios, se reportó el bajo grado de tecnificación de la producción de panela, factor que se ve agravado con la ineficiencia de procesos unitarios claves como lo son: la extracción de los jugos de la caña, la generación térmica y las pérdidas de calor. La ineficiencia de los factores tecnológicos de la producción, en adición a malas prácticas de manejo y aprovechamiento de residuos, se traducen en pérdidas energéticas, desaprovechamiento de los recursos naturales e impactos nocivos sobre el aire y las fuentes de agua; circunstancias que además de hacer más frágil el tercer eslabón de la cadena productiva de la panela, incrementan los riesgos operacionales, ambientales y de mercado.

Para aportar a la comprensión y a la implementación de acciones que permitan superar esta problemática se desarrolló el estudio que se presenta en este artículo, el cual se organizó por fases, primero una revisión bibliográfica; segundo, el análisis del problema y finalmente la identificación de alternativas viables y accesibles a los pequeños productores de panela.

Antecedentes

El objetivo del estudio presentado en este artículo se apoyó en los planteamientos expuestos por Anwar S.I., quien analizó el valor calorífico neto del bagazo utilizado como combustible en hornillas paneleras [6]. En el mencionado estudio, se encontró que además del contenido de fibra, sacarosa y humedad del bagazo, hay factores operativos que determinan la cantidad total de calor generada por el bagazo, lo cual llevó a recomendar ajustes al diseño del trapiche e incluso al diseño de mecanismos para el secado de bagazo, utilizando el calor residual del horno. Al mismo tiempo, Cortez y Gómez [7] tras establecer la eficiencia y la irreversibilidad del proceso de combustión de bagazo, determinaron que hay oportunidades para mejorar el rendimiento exergético de las hornillas paneleras.

La lectura juiciosa de los trabajos de Anwar [6] y de Cortez & Gómez [7], y la expectativa nacional por incrementar su participación en el mercado internacional de la panela, alienta a que desde la academia se propongan iniciativas dirigidas a optimizar el proceso productivo de la panela con acciones básicas que van desde mejorar la distribución de los componentes del trapiche, como por ejemplo el almacén de bagazo y la hornilla; hasta mejoras tecnológicas importantes como la instalación de máquinas extractoras de última generación, la optimización de los hornos de lecho fijo y el reúso de los bagazos y cenizas en otros procesos productivos.

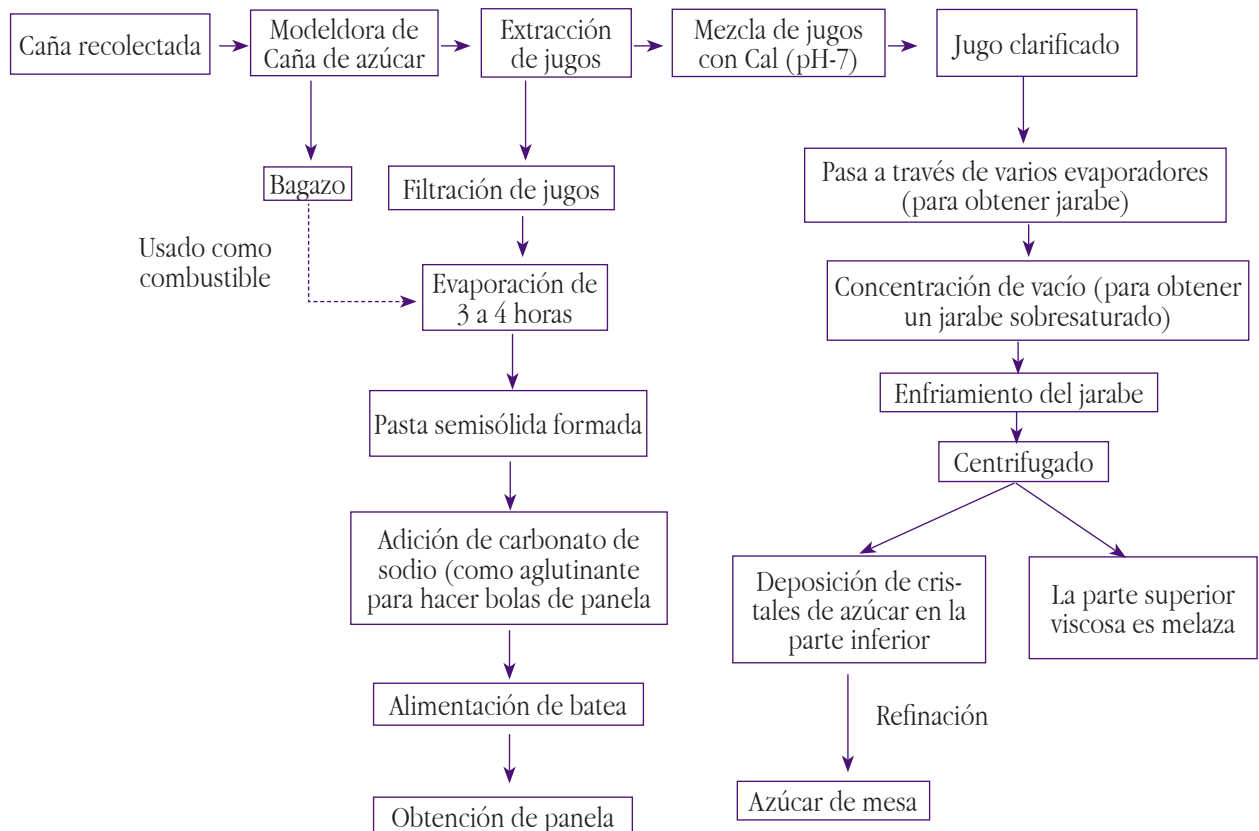
En los últimos años el Estado Colombiano financió un número importante de proyectos de investigación y desarrollo dirigidos a modelar matemáticamente los procesos energético y exergético de la producción de panela y a evaluar alternativas de mejora en procesos unitarios claves, como la extracción de los jugos de la caña panelera (molienda) y la evaporación y concentración (punteo). Como se puede observar en la figura 1,

los procesos unitarios del procesamiento de la caña de azúcar ya sea para obtención de panela o para la obtención de azúcar sin refinar, en sus primeras fases son los mismos:

1. Disposición de la caña de azúcar en la zona de molinos.
2. Extracción de los jugos utilizando molinos (molienda).
3. Decantación y clarificación de los jugos.
4. Evaporación y concentración para obtención de las mieles (jarabe).
5. Cristalización.

De ahí, que técnicamente, la panela se denomine azúcar no centrifugada (ANC) y como tal, sea un producto transable en algunos mercados, aunque para Colombia el indicador de transabilidad de la panela sea muy bajo. Así, para el periodo 1991-2000 este indicador fue de -0,29% [8].

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de transformación de caña en panela y en azúcar.



El Observatorio Agrocadenas Colombia, en su estudio del 2005, ratificó la vigencia de este concepto cuando señaló que la panela colombiana seguía siendo un producto no transable [10]. Ahora bien, por más que se han abierto nuevos mercados internacionales para este producto, el dictamen sobre la no transabilidad de la panela producida en Colombia sigue trascendiendo en informes más recientes, al respecto véase por ejemplo el informe titulado Agenda Prospectiva de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la cadena panelera, estudio que fue auspiciado por el ministerio de la rama y publicado en 2010 [11].

Para los fines de soportar el argumento anterior, se hace referencia a acciones desplegadas por Fedepanela y Comerpanela. Esta última, es la comercializadora del gremio panelero que tiene como objetivo principal la búsqueda de nuevos mercados nacionales e internacionales para este producto. Recientemente, Comerpanela anunció nuevas exportaciones hacia Sudan del Sur, Nigeria, Kenia y Guinea Ecuatorial [12], destinos que complementan las exportaciones colombianas de panela hacia Estados Unidos, España, Canadá y Australia, países que para el 2008 seguían siendo los principales destinos de las más de dos mil toneladas métricas de panela colombiana exportadas durante ese año [13]. Más aún, el informe 2012 de Panela Monitor indicó que entre 2007 y 2011 la exportación mundial de azúcar no centrifugado fue del orden de 137000 toneladas por año [14]. Estas referencias, hacen evidente que urge el diseño y desarrollo de estudios de prospectiva que con soporte en datos cuantitativos, permitan estimar indicadores sobre los cuales sea posible generar diagnósticos más confiables sobre la transabilidad del azúcar no centrifugado, las tendencias y oportunidades de este mercado.

Uno de los aspectos del mercado internacional de la panela, que debe abordarse con urgencia es el de la trazabilidad interna, atributo conectado a las características de composición y manipulación del producto, las operaciones de producción, las máquinas, técnicas y demás factores de la producción. Al respecto es oportuno señalar que varios de los países productores de panela han definido requisitos sanitarios, estándares y manuales de buenas prácticas de producción. En Colombia, mediante Resolución No. 779 de 2006 del Ministerio de Protección Social se estableció el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir

en la producción y comercialización de la panela para consumo humano. En la citada resolución fueron definidos los requisitos físico-químicos de la panela que se listan en la Tabla 1, además de condiciones sanitarias para los trapiches y las centrales de acopio de mieles vírgenes.

Tabla 1. Requisitos físico químicos para la panela producida y comercializada en Colombia según la Resolución No. 779 de 2006.

Requisito	% Mínimo	% Máximo
Azúcares reductores, expresados en glucosa	5,74	-
Azúcares no reductores expresados en sacarosa		90,0
Proteínas, (N x 6.25)	0,2	-
Cenizas	1,0	-
Humedad	-	5,0

Además de los parámetros básicos de composición listados en la Tabla 1, en la Resolución No. 779/2006 se estableció en 0,2 mg/kg la cantidad máxima admisible de Plomo y en 0,1 mg/kg la cantidad máxima de Arsénico, mientras se advierte que la panela no debe contener colorantes ni bióxido de azufre (SO₂).

Dentro de los requisitos sanitarios que debe cumplir la panela producida y comercializada en Colombia está la prohibición del uso de sustancias químicas tóxicas con propiedades blanqueadoras y colorantes. En la Resolución No. 779 de 2006 se prohibió además la producción de panela con azúcar, mieles procedentes de ingenios azucareros, mieles de otros trapiches paneleros, jarabe de maíz, otros endulzantes y panelas devueltas que tengan incidencia sobre la inocuidad y calidad de la panela.

Es oportuno anotar, que la Organización Mundial de Aduanas (OMA) al definir un estándar básico para el azúcar de caña obtenido sin centrifugación optó por el grado de polarización, que en estado seco debe oscilar entre 69° o más, pero menos de 93°. Otra característica del producto definida por la OMA es que éste debe contener únicamente micro cristales naturales xenomórficos, de forma irregular, invisibles a la vista, cubiertos por residuos de melazas y otros constituyentes de la caña de azúcar.

Se resalta, de otra parte, el hecho de que la norma colombiana no mencionó los grados de polarización de la panela, pero sí reclamó el cumplimiento de condiciones básicas del proceso de producción, entre ellos el que la distribución de planta debe tener un flujo secuencial del proceso de elaboración con el propósito de prevenir la contaminación cruzada, que los trapiches deben contar con los equipos, recipientes y utensilios que garanticen las buenas condiciones sanitarias en la elaboración de la panela incluyendo los molinos. Señaló la norma en cita, que las paredes de la sala de proceso deben estar limpias y en buen estado, sus pisos deben ser lavables, de fácil limpieza y desinfección. Además, éstos no deben ser porosos, ni absorbentes y estar libres de grietas y perforaciones.

Como se sabe, las condiciones de la mayoría de los trapiches colombianos para el 2006 distaban diametralmente de las señaladas en la norma. En las imágenes 1 y 2 se pueden observar las condiciones en la entrada de las hornillas, de las pailas, paredes y pisos de un trapiche tradicional antes de iniciar procesos de reconversión tecnológica.

Imagen 1. Exterior de hornilla panelera alimentada con bagazo de caña. Trapiche tradicional del Municipio de Villeta – Cundinamarca.



Imagen 2. Interior de trapiche tradicional antes de su reconversión tecnológica. En la imagen trapiche ubicado en Sandoná - Departamento de Nariño, 2013 [15].

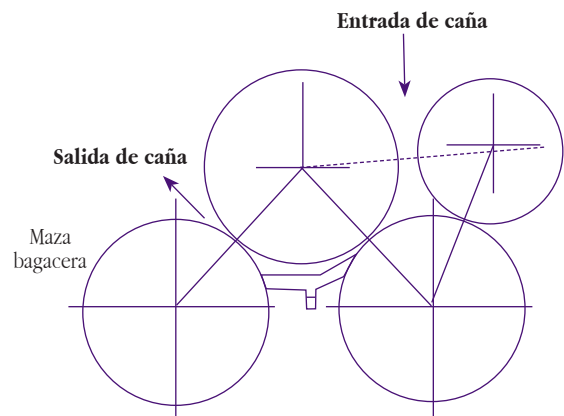


Factores tecnológicos de la producción de panela

El uso de procesos mecánicos para la extracción de jugos de la caña de azúcar es una práctica milenaria originaria de India y el sur de Asia. En el continente americano el uso de molinos para la extracción del jugo de la caña de azúcar se remonta al siglo XVI [16] con el establecimiento de las primeras minas de cobre en Santiago de Cuba [17] lo que facilitó la fabricación local de molinos para extraer el jugo de caña de azúcar. Desde entonces, se trabaja en la optimización de los molinos buscando maximizar la extracción de sacarosa de la caña de azúcar y minimizando el consumo de energía y los costos de mantenimiento.

En cuanto a la capacidad extractiva de los molinos, debe señalarse que hoy se considera aceptable lograr entre el 50% y 70% de extracción de jugos en la primera molida (Tabla 2). La optimización de esta operación se logra mediante el tándem de molinos cañeros [18], aunque persisten problemas relacionados con el desgaste y la falla de los materiales en los ejes de los molinos debido al rozamiento entre piezas y a la presión hidráulica [19], además de la corrosión que pueden causar los jugos de la caña de azúcar sobre los materiales [20]. En la figura 2 se presenta el esquema de distribución de las fuerzas de un molino de caña de azúcar de cuatro mazas denominadas así: cuarta, superior, cañera y bagacera. Las mazas soportan las cargas y esfuerzos desde y hacia las mazas del molino.

Figura 2. Esquema de distribución de fuerzas en un molino de caña de azúcar de cuatro mazas.



Cabe señalar que la oferta tecnológica de molinos de caña para la industria azucarera es más amplia en Australia, Brasil e India. En este último país al proceso unitario de extracción de jugos de caña panelera se logró integrar el tándem de hasta tres molinos, logrando el 75% de extracción de jugos. En Colombia, el tándem por sus costos no se ha incorporado al proceso de producción de panela; aquí, grupos de investigación de la Universidad del Valle y de la Universidad Nacional de Colombia, así como centros de I+D independientes (tales como CIMPA y CIDEA) desarrollan investigación aplicada en torno a los molinos y hornillas paneleras. Últimamente, dominan los proyectos adelantados en la modalidad de trabajos de grado en universidades de Bogotá, Boyacá y Santander, además de múltiples estudios apoyados por Fedepanela, Corpoica y Colciencias, dirigidos al análisis de la cadena productiva de la panela, la eficiencia de procesos unitarios [22], [23] y la diversificación de la oferta panelera con nuevos productos y modelos de negocios alrededor de la panela granulada y bebidas a base de panela.

Tabla 2. Oferta tecnológica de molinos de caña de azúcar (trapiches paneleros) en el mercado local.

Molino	Capacidad [kg caña /h]	Extracción %	Potencia HP
Panelero R8S	1500	55-70	13
Panelero R12ACR	1800	55-70	15
Panelero R15ACR	2500	55-70	n.r.

Con todo, los procesos unitarios críticos en la producción de panela siguen siendo los de evaporación, concentración, punteo y batido, debido a la obsolescencia tecnológica de las plantas en cuanto al diseño, mantenimiento y operación [22].

La reconversión tecnológica de unidades agroindustriales procesadoras de caña panelera para lograr un proceso continuo, eficiente y limpio fue promovida por la FAO, desde el 2004, como estrategia de diversificación de ingresos en las áreas rurales de América Latina [24], no obstante pocos procesadores han accedido a los recursos necesarios para tal reconversión. En Colombia

con recursos del Gobierno de Finlandia se logró mejorar la eficiencia energética de hornillas paneleras en cuatro trapiches ubicados en el Departamento de Cundinamarca, lo que convirtió a estos trapiches en proyectos piloto que desde el 2012 intentan replicarse en Cauca, Huila y por supuesto, en más trapiches de Cundinamarca.

Eficiencia térmica de las hornillas paneleras

Para la evaporación de los jugos extraídos de la caña se requiere energía y en los trapiches paneleros tradicionales ésta es suministrada en forma de calor obtenido por combustión de partículas de biomasa (bagazo, leña y llantas de desecho) en lecho fijo. Los hornos utilizados para este propósito, denominados hornillas paneleras, se construyen de manera empírica y en el contexto local los más eficientes resultan ser los que tienen cámaras de combustión tipo Ward-CIMPA [25], [26] (Tabla 3). Estas últimas, fueron diseñadas por el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Industria Panelera (CIMPA) con recursos del Gobierno holandés y el apoyo del ICA.

Tabla 3. Cámaras de combustión más utilizadas en producción de panela en Colombia.

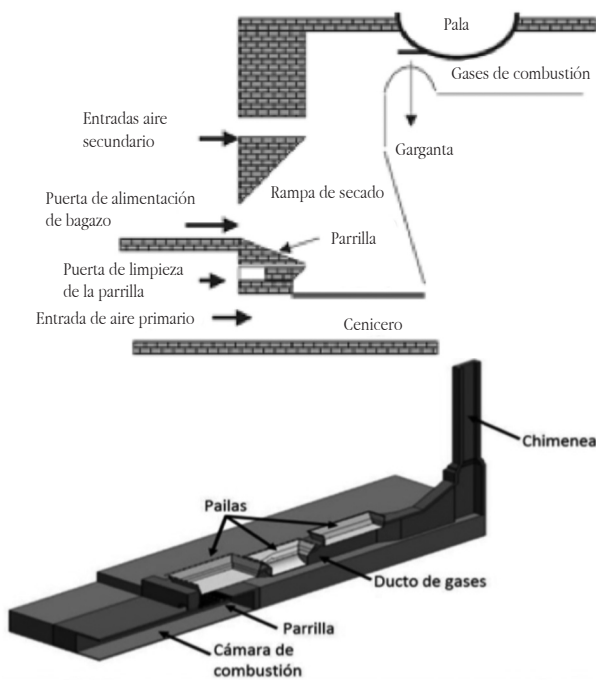
Cámara	Temperatura de combustión °C	% CO liberado
Tradicional	650-850	6-10
Tradicional mejorado	850-950	4-5
Tipo Ward – CIMPA	1200	1

En el marco de la cooperación internacional entre Colombia y Holanda el CIMPA mejoró el diseño de las calderas de cocción del jugo de caña y aseguró que el bagazo generado en la molienda pudiese integrarse al proceso de combustión sin que estuviera completamente seco. Esta innovación llamada cámara Ward se compone de un conjunto de calderas que bajan de nivel a medida que se va purificando el jugo y una chimenea de similar altura. La cámara diseñada por el CIMPA fue optimizada con variaciones en la entrada de la cámara de combustión y en la chimenea; la versión mejorada se conoce

como cámara Ward-CIMPA, ésta alcanza una temperatura de combustión de 1200 grados centígrados y es más amigable con el medio ambiente al integrar totalmente el uso del bagazo y liberar apenas un 1% de monóxido de carbono.

Análisis del problema

Figura 3. Esquema de hornilla panelera con cámara de combustión tipo Ward-CIMPA, ducto de gases y chimenea.



Antes de continuar es preciso anotar que la producción de panela mantiene su carácter de empresa familiar, el número de grandes unidades de producción es bajo. En Colombia para el año 2005, las grandes paneleras apenas alcanzaban el 5% y para éstas y las medianas, son más favorables las condiciones para acceder a recursos para la reconversión tecnológica de sus hornillas y pailas. De lo anterior se sustrae que en la mayoría de las unidades de producción de panela, se presentan los siguientes eventos no deseables:

- Emisiones atmosféricas como resultado del uso de motores Diésel en los molinos de caña.
- Agotamiento de recursos naturales, principalmente madera, para alimentar las hornillas paneleras.

- Contaminación de fuentes de agua con el vertimiento de cachaza y lodo de caña.
- Contaminación del aire con gases de combustión y cenizas.

A los eventos de riesgo ambiental señalados previamente, deben sumarse otros eventos de riesgo operacional asociados a la falta de integración de los procesos de producción y a la obsolescencia tecnológica; tales eventos son precursores de peligros para la salud y seguridad de los operadores de los molinos, hornos y pailas. En este punto es válido recordar que durante la molienda los operarios están expuestos a largas jornadas de trabajo en ambientes ruidosos [25] y de altas temperaturas.

Pero los eventos adversos que enfrentan los procesadores de caña panelera no se limitan a los ya señalados. Debe tenerse en cuenta, que la falta de automatización y control en procesos y operaciones genera una inadecuada dosificación de insumos, como el bagazo – suministrado a la cámara de combustión- y las sustancias clarificantes– sobre los jugos-. La falta de automatización y de control dificulta la trazabilidad interna de la panela.

Como si fuera poco, la pobre integración de los procesos unitarios propicia pérdidas energéticas, estimadas en pérdida de calor por transferencia de calor a las paredes de la cámara de combustión, la no captura de calor residual al interior del ducto de gases y pérdida de temperatura de los gases expulsados por la chimenea. Se estimó que la pérdida de calor alcanza el 41%. Adicionalmente, tal como se registra en la Tabla 4, el proceso aplicado para obtener panela genera residuos que no se están recuperando, ni aprovechando: agua, cenizas, gases de combustión. Por el contrario, estos residuos contaminan el ambiente.

Tabla 4. Entradas y salidas del proceso tradicional de transformación de caña de azúcar en panela

Entrada	Proceso unitario	Salida
Caña de azúcar	Extracción de jugos	Jugo de caña Bagazo
Jugo de caña Clarificante (Balso) Calor	Clarificación	Jugo (pH 5,5) Cachaza negra Cachaza blanca

Entrada	Proceso unitario	Salida
Jugo (pH 5,5) Óxido de calcio Calor	Encalado	Jugo (pH 6,4)
Jugo (pH 6,4) Calor	Evaporación	Mieles
Mieles	Batido	Panela

Todo lo señalado aporta información para calificar el proceso tradicional de obtención de panela, como un proceso poco eficiente desde el punto de vista energético y ambiental. Con esto se configura un problema que para ser abordado puede ordenarse por factores: tecnológicos, de los recursos naturales y del trabajo; todos igualmente críticos por las repercusiones sobre la calidad de vida de las familias rurales que tradicionalmente se han dedicado a transformar la caña de azúcar en panela.

Se listan ahora algunas alternativas de baja complejidad que permitirían avanzar en la solución de la situación problema relacionada con los factores tecnológicos:

- Mejorar la distribución de la planta.
- Diseñar sistemas para la dosificación del bagazo.
- Diseñar sistemas automáticos de almacenamiento y suministro de bagazo.
- Diseñar sistemas para optimizar la combustión.
- Integrar materiales que faciliten la recuperación del calor residual.
- Diseñar sistemas de control de velocidad para los gases que la chimenea.
- Implementar una gestión integral de los residuos del proceso (Lodo de bagazo, ceniza, gases de combustión).
- Automatizar el suministro de recursos y materiales al proceso de clarificación, encalado y evaporación.
- Automatizar el proceso de batido.

Conclusiones

El proceso de producción de panela establecido en varios países de Latinoamérica desde el siglo XVI, mantiene su carácter artesanal, con mínima integración tecnológica,

control y automatización. Al tratarse de una cadena agroindustrial que genera trabajo y sustento a miles de familias rurales conviene diversificar la producción, lo que obliga a acelerar la reconversión tecnológica y la trazabilidad interna de la panela.

Los molinos, cámaras de combustión, pailas y palas usados en diferentes operaciones unitarias del proceso panelero ofrecen grandes oportunidades de mejora a nivel de diseño, operación y mantenimiento, constituyéndose este proceso productivo en un campo fértil para el diseño y desarrollo de proyectos de investigación, desarrollo e innovación.

Dentro de los aspectos críticos del proceso predominan la pérdida de calor que bordea el 41%, la falta de automatización en operaciones unitarias, el alto riesgo operacional y ambiental.

El acceso a recursos para la reconversión tecnológica de las hornillas pasa por el análisis económico y financiero de los esquemas de reconversión, los cuales son escasos o no se han divulgado en la prensa.

Referencias

- [1] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. República de Colombia, «Sector Panelero Colombiano», Bogotá, 2006.
- [2] A. Nath, D. Dutta, P. Kumar y J. Singh, «Review on Recent Advances in Value Addition of Jaggery based Products», *Journal of Food Processing & Technology*, vol. 6, n° 4, p. 4, marzo 2015.
- [3] Superintendencia de Industria y Comercio, «Estudios de Mercado. Cadena productiva de la panela en Colombia 2010 -2012», SIC, Bogotá, 2012.
- [4] Comité Nacional del Codex Alimentarius de Colombia, «Propuesta de norma internacional codex para la panela», Bogotá, 2010.
- [5] Panela Monitor, «Estudio del mercado de la panela en Colombia y el mundo», 2012.
- [6] S. Anwar, «Microwave oven method can effectively be used for determination of moisture», *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 5, n° 4, pp. 472-478, diciembre 2010.

- [7] L. Cortez y E. O. Gómez, «A method for exergy analysis of sugarcane bagasse boilers,» *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 15, n° 1, marzo 1998.
- [8] L. C. Pardo Rueda, «Plan de exportación y mercado de la panela granulada en el Reino Unido,» Universidad de la Sabana, Bogotá, 2005.
- [9] Observatorio Agrocadenas Colombia, «Cadena agro-industrial de la panela en Colombia,» Bogotá, 2005.
- [10] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, «Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la panela y su agroindustria en Colombia,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2010.
- [11] Fedepanela , «Fedepanela.org.co,» 11 septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.fedepanela.org.co/index.php/publicacion/noticias/121-primer-contingente-de-panela-colombiana-con-destino-al-africa>. [Último acceso: 3 octubre 2015].
- [12] Proexport Colombia, «Panela, chancaca o raspadura,» Bogotá, 2009.
- [13] Panela Monitor, «Non centrifugal sugar: world production and trade,» 2012.
- [14] «Informativo del Guaico,» [En línea]. Available: <http://informativodelguaico.blogspot.com.co/2014/04/radicaron-perfiles-de-proyectos-de.html>. [Último acceso: 3 octubre 2015].
- [15] A. R. Stevens-Acevedo, «The Machines That Milled the Sugar-Canes,» New Jersey, 2013.
- [16] E. S. LORA, F. P. Arrieta, R. C. Carpio y L. A. H. Nogueira, «Clean production: efficiency and environment,» *International sugar journal*, vol. 102, n° 1219, pp. 343-346, 2000.
- [17] J. E. Gonzales, «Method for producing sugar cane juice.». EU Patente US6245153 B1, 12 junio 2001.
- [18] J. S. R. MURILLO, S. A. R. PULECIO y J. J. C. MARÍN, «Análisis de la confiabilidad de los ejes de molino de caña de azúcar,» *Revista Tecnura*, vol. 8, n° 15, pp. 45-54, diciembre 2004.
- [19] J. A. Gómez, A. L. Gómez y J. J. Coronado, «Análisis del comportamiento a fatiga de un acero AISI 1045 en un ambiente de jugo de caña de azúcar. Scientia et Technica, 2005, vol. 1, no 27.,» *Scientia et Technica*, vol. 1, n° 27, 2005.
- [20] R. Llánes Mancilla, N. Carrillo Mojica, A. Criales Romero y C. Guerrero Useda, «Diseño y aplicación de un instrumento para determinar la obsolescencia tecnológica en industrias paneleras de Gualivá,» IIEC, vol. 3, n° 2, pp. 17-34, 2014.
- [21] M. C. García, «Hornillas Paneleras. Evaluación de su impacto ambiental,» Corpoica, [En línea]. Available: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/hornillas-paneleras-evaluacion-de-su-impacto-ambiental.pdf>.
- [22] FAO, «Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina,» Roma, 2004.
- [23] Z. Sánchez Castro, Sánchez y O. A. Mendieta Menjura, «CASTRO, Zamir Sánchez; MENJURA, Oscar Andrés Mendieta. Ajuste de un modelo matemático para la combustión de bagazo de caña en una cámara Ward-Cimpa. 2014.,» 2014.
- [24] CORPOPICA, Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera, Bogotá, 2007.
- [25] M. L. Vargas Vásquez y L. R. Arenas amaya, «Diagnóstico de las condiciones de trabajo, en los trapiches del municipio de de Chitaraque (Boyacá),» *El hombre y la máquina*, vol. 41, pp. 45-55, abril 2013.
- [26] H. Hurtado Luque, «Química de la agroindustria de la panela,» 8 junio 2013. [En línea]. Available: http://vivelapanela.blogspot.com.co/2013/06/ques-la-panela_3639.html. [Último acceso: 2 octubre 2015].
- [27] R. Kaplinsky, «FASTONLINE.ORG,» 1989. [En línea]. Available: http://www.fastonline.org/CD3WD_40/HDLHTML/ENVMANI/ES/P32.GIF. [Último acceso: 2 octubre 2015].
- [28] L. M. Estrada Marroquín, *Análisis mecánico de las chumazaras y los molinos*, 2013.

Los Autores



María Eugenia Guerrero Useda

Es PhD en Ciencias Físico Matemáticas, Master en Ciencias Físico Matemáticas y Física de Moldova State University. Investigadora adscrita al grupo Agua, Salud y Ambiente de la Universidad El Bosque y docente de los programas de Ingeniería Ambiental y de Bioingeniería de esta Universidad. Correo de contacto: mguerrerou@unbosque.edu.co



Juan Diego Escobar Guzmán

Estudiante de la Facultad de Ingeniería de la Universidad El Bosque, coinvestigador de Investigación. jdescobar@unbosque.edu.co