

Estudio energético del proceso de obtención de panela en dos variedades de *Saccharum officinarum* L. (caña de azúcar) en la Amazonía Ecuatoriana

Energy Study of the Panela Production Process in Two Varieties of *Saccharum Officinarum* L. (Sugarcane) in the Ecuadorian Amazon

 Víctor González-Rivera¹;  Michael José Albán-Galárraga¹;  Juan González-Rivera²;
 Irene Hidalgo-Guerrero³

¹Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad-Ecuador

²Universidad Estatal Amazónica, Puyo-Ecuador

³Compañía Nacional de Químicos Ambientales, Quito-Ecuador

Correspondencia: vgonzalezr@upse.edu.ec

Recibido: 06 Agosto 2024

Aceptado: 27 Diciembre 2024

Disponible: 28 Febrero 2025

Cómo citar / How to cite

V. González-Rivera, M. J. Albán-Galárraga, J. González-Rivera, and I. Hidalgo-Guerrero, "Estudio energético del proceso de obtención de panela en dos variedades de *Saccharum officinarum* L. (caña de azúcar) en la Amazonía Ecuatoriana," *Tecnológicas*, vol. 28, no. 62, e3197, 2025. <https://doi.org/10.22430/22565337.3197>



Resumen

La Amazonía Ecuatoriana es una región en la que se cultiva *Saccharum officinarum* L. para la producción de panela. Tradicionalmente, este proceso dependía del uso de leña como fuente de energía para la concentración del jugo. Esta práctica generaba un impacto ambiental y afecta la calidad del producto final. El objetivo de esta investigación fue demostrar las ventajas de implementar nuevas tecnologías en la producción panelera. La metodología empleada consistió en la evaluación del proceso energético utilizado en 36 fábricas paneleras de la Amazonía ecuatoriana que utilizaban métodos tradicionales con hornillas. El estudio se enfocó en dos variedades de caña cultivadas en el país: Puerto Rico y Limeña. Se evaluó el índice de madurez y las características físicas de ambas variedades. Adicionalmente, se llevó un ensayo a nivel de laboratorio donde se concentró el jugo de caña utilizando vapor generado por calderas, con el objeto de comparar la eficiencia de este método con el tradicional. Para cada proceso se realizó un balance de masa y energía. Los resultados indicaron que la eficiencia global promedio en el sistema de hornilla fue del 58,50 %, mientras que en el sistema de caldera alcanzó un 83,50 %. En conclusión, estos resultados demostraron que la utilización de calderas en la producción de panela es significativamente más eficiente energéticamente que el método tradicional de hornillas, con la obtención de un incremento positivo del 25 % en la eficiencia global. Esta mejora tecnológica no solo disminuye los impactos ambientales asociados con la producción panelera, sino que también representa una oportunidad para incrementar los ingresos de los productores al optimizar los recursos energéticos.

Palabras clave

Biomasa, caña de azúcar, eficiencia energética, producción de panela, tecnologías limpias.

Abstract

The Ecuadorian Amazon is a region where *Saccharum officinarum* L. is cultivated for panela production. Traditionally, this process relied on the use of firewood as an energy source for juice concentration. This practice generated an environmental impact and affected the quality of the final product. The objective of this research was to demonstrate the advantages of implementing new technologies in panela production. The methodology employed consisted of evaluating the energy process used in 36 panela factories in the Ecuadorian Amazon that used traditional methods with furnaces. The study focused on two cane varieties cultivated in the country: Puerto Rico and Limeña. The maturity index and physical characteristics of both varieties were evaluated. Additionally, a laboratory-scale trial was conducted where cane juice was concentrated using steam generated by boilers, with the aim of comparing the efficiency of this method with the traditional one. For each process, a mass and energy balance were performed. The results indicated that the average overall efficiency in the furnace system was 58,50 %, while in the boiler system it reached 83,50 %. In conclusion, these results demonstrated that the use of boilers in panela production is significantly more energy efficient than the traditional furnace method, with a positive increase of 25 % in overall efficiency. This technological improvement not only decreases the environmental impacts associated with panela production but also represents an opportunity to increase producers' incomes by optimizing energy resources.

Keywords

Biomass, sugarcane, energy efficiency, panela production, clean technologies.

NOMENCLATURA

E	Entrada
G	Generación
S	Salida
C	Consumo
M_0	Masa
M_{CN}	Masa de la cachaza negra
M_V	Masa del vapor de agua
C_p	Calor específico
ΔT	Incremento de la temperatura
λ_{Ev}	Calor latente de vaporización
Q_{GB}	Calor generado por el bagazo de caña de azúcar
Q_{GL}	Calor generado por la leña de pigüe
Q_{GCl}	Calor consumido en el clarificador
Q_{GEv}	Calor consumido en el evaporador
Q_{GC}	Calor consumido en concentrador
ε	Eficiencia

1. INTRODUCCIÓN

Debido a los efectos negativos en la salud, los consumidores buscan cada vez más alternativas al azúcar refinado, impulsando un aumento global en la demanda de sustitutos naturales del azúcar [1]. En este contexto, el azúcar de caña no centrífugo (NCS, por sus siglas en inglés) surge como un edulcorante natural crucial en los países en desarrollo [2]. El NCS, un producto sólido no refinado procedente de la concentración del jugo de caña de azúcar es considerado por los consumidores como una opción más saludable y segura en comparación con el azúcar refinado [3], [4]. El proceso de producción se inicia con la extracción del jugo de caña de azúcar mediante trituración mecánica, seguido de la eliminación de impurezas y clarificación [5]. Posteriormente, el agua se evapora abiertamente hasta alcanzar una

concentración de 88–94°Brix, lo que resulta en un producto caramelizado caliente que se solidifica al enfriarse [1], [6], [7].

El NCS tiene un alto contenido de microcristales de sacarosa (85 %), junto con un 7 % de azúcares reductores (glucosa y fructosa). Además, tiene una gran cantidad de minerales, incluido potasio (531 mg/100 g), calcio (103 mg/100 g) y fósforo (58 mg/100 g), y vitaminas E (56 mg/100 g) y C (4 mg/100 g). También contiene ácidos orgánicos, 67 aminoácidos y antioxidantes flavonoides y su color varía según el pH y la presencia de flavonoides en la caña de azúcar [8], [9]. En función de la composición de los elementos constitutivos, la panela se puede considerar como un alimento funcional, sin embargo, se requiere mayor investigación para mejorar y fortalecer el uso de NCS [10].

El NCS es un edulcorante tradicional mínimamente procesado reconocido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés). Es un producto sólido y sin refinar, con un sabor y aroma únicos [11], además, debido a su bajo costo, es una fuente fácilmente accesible de energía y nutrientes, particularmente para las personas de bajos ingresos que viven en áreas rurales donde se produce [2]. La panela, también conocida como "chancaca" o "raspadura" en algunos países de América Latina, es un tipo de azúcar integral natural que no se centrifuga ni refina [12]. Colombia produce alrededor de dos millones de toneladas anuales de panela [13], este volumen equivale al 48 % del área total sembrada con caña de azúcar en el país [14]. Colombia es el segundo país productor de NCS después de la India [15] y ocupa el primer lugar a nivel mundial en términos de consumo [16]. En la actualidad, la producción mundial de NCS es de alrededor de 12,000 kt/año y los mayores productores son India (60 %), Colombia (14,9 %) (0,95 kg ACN/45 kg de jugo), Pakistán (5 %), China (3,9 %) y Brasil (3,7 %) [17]. El NCS, apreciado por su valor nutricional, se consume a nivel mundial como edulcorante o ingrediente en diversos productos alimenticios y bebidas [4]. Son precisamente sus propiedades nutraceuticas, atribuidas a los compuestos fenólicos característicos de los productos mínimamente procesados de caña de azúcar, las que juegan un papel fundamental en la aceptación del consumidor. Además de su valor como edulcorante, el NCS conserva minerales y vitaminas presentes en la caña de azúcar, como calcio, hierro y potasio. Estos nutrientes, junto con los compuestos fenólicos, le confieren propiedades antioxidantes y antiinflamatorias que se asumen que tienen beneficios para la salud.

La provincia de Pastaza en el Ecuador es una de las principales productoras de caña de azúcar, con una superficie cultivada de 6,354 hectáreas [18]. Sus derivados, como panela en bloques y granulada, representa el 10,35 % de la producción de panela a nivel nacional debido a sus 10 fábricas con tecnología mejorada [19]. La innovación de la tecnología genera una mejor calidad del producto, una mayor eficiencia de producción y un menor impacto ambiental, es decir, mayor competitividad y sostenibilidad socioambiental [20]. La industria panelera en Ecuador se está modernizando, un proceso destinado a mejorar la competitividad del sector y garantizar su sostenibilidad a largo plazo, pero en la provincia persisten 78 pequeñas fábricas que se oponen al cambio tecnológico y continúan con el uso de la tecnología tradicional, como extracción de jugo de caña en trapiches de masa y evaporadores abiertos en hornillas horizontales con fuente de energía de bagazo, leña, o una combinación de ambos; esta tecnología tradicional presenta baja eficiencia energética [21], [22].

El estudio tuvo como objetivo evaluar alternativas tecnológicas para el aprovechamiento del vapor de agua y la energía total que genera el sistema de producción de panela. Se realizó un balance de masa y energía en cada etapa del proceso, con el fin de analizar el problema del bajo rendimiento energético en estos sistemas artesanales. El uso de equipos eficientes para la transferencia de energía reducirá los impactos negativos y la contaminación ambiental, satisfaciendo la demanda energética del sistema. Se propone utilizar diésel, bagazo de caña de azúcar y otros productos de la biomasa renovable como combustible en un sistema de caldera mixta. La implementación de estas tecnologías permitirá reducir las emisiones contaminantes y un producto final de mayor calidad, libre de cenizas y partículas de la combustión. La mejora del rendimiento energético en la producción de panela es una alternativa viable para mejorar la sostenibilidad del sector.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Proceso

El estudio se llevó a cabo en dos etapas.

1. Evaluación de la eficiencia energética en un sistema de caldera:

Se realizó en el laboratorio de agroindustrias de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Estatal Amazónica. Se analizó el aprovechamiento del vapor generado por el sistema de caldera para la producción de panela.

2. Evaluación de la eficiencia del sistema tradicional de hornillas:

Se realizó en 36 de las 78 pequeñas fábricas de panela que utilizan este sistema en la provincia de Pastaza, Ecuador. La selección de las fábricas se realizó mediante un proceso aleatorio y con la participación activa de las asociaciones de cañicultores y paneleros de la provincia de Pastaza.

Esta investigación permitió obtener información de los mecanismos y medios de operación de los procesos, fundamentalmente de las eficiencias energéticas de dos sistemas de producción de panela: uno moderno con caldera y otro tradicional con hornillas. Los resultados del estudio pueden ser utilizados para mejorar la eficiencia energética en la producción de panela y contribuir a la sostenibilidad del sector.

2.2 Selección de las materias primas y del material para la combustión

La selección de la caña de azúcar para la producción de panela se realizó de acuerdo con la metodología propuesta por [23], quien determinó que esta operación es de gran utilidad en la actividad productiva de la agroindustria panelera. La caña de azúcar al tiempo de cosecha debe encontrarse fisiológicamente en una óptima madurez, entre 16 y 24°Brix, lo cual se determinó mediante un refractómetro de bolsillo. °Brix es la cantidad de sólidos solubles en solución. El grado de madurez está en dependencia de la edad de las plantaciones y del número de sequías (drenajes). Por las condicionales edafoclimáticas de la Amazonía ecuatoriana, estas pueden retardar o acelerar la maduración de la caña. Además, se consideraron otras variables agronómicas como el grosor del tallo, la limpieza del mismo (libre de hojas y materiales extraños) y el almacenamiento, que no debe ser mayor a 24 horas al tiempo de procesamiento. Es importante destacar que la selección de la caña no es un proceso aislado, sino que debe estar integrado con las demás etapas de la producción para garantizar la calidad de la panela.

Para fortalecer la información, en el presente estudio también se aplicó una encuesta a 36 productores de panela con el objetivo de conocer su experiencia en cuanto al grado de madurez de la caña y su rendimiento productivo por variedad. La encuesta categorizó el estado de la caña en tres estratos: bueno, regular y malo. A partir de esta clasificación, los productores, en función de su experiencia, indicaron qué variedad de caña tiene mejor rendimiento en producción. Esta información fue valiosa para complementar la selección de la caña de azúcar, puesto que no solo se considera el estado de madurez, sino que, también, la experiencia de los productores en cuanto al rendimiento de las diferentes variedades de caña, en función de los manejos de los cultivos.

De esta manera, se seleccionó la variedad de caña de azúcar con el mejor rendimiento en producción, lo que se traduce en unos mayores ingresos económicos y un mayor desarrollo socioeconómico de los cañicultores.

2.3 Variables para el balance termodinámico

Para evaluar el aprovechamiento energético de los sistemas de caldera mixta y hornillas se analizaron las siguientes variables durante las diferentes etapas de cocción de la panela: temperatura, masa de vapor producido, masa de jugo de caña de azúcar y su concentración en grados °Brix. Esto permitió determinar el consumo de combustible, un parámetro esencial para el análisis energético del proceso de producción de panela. La evaluación se realizó siguiendo el esquema presentado en la Figura 1.

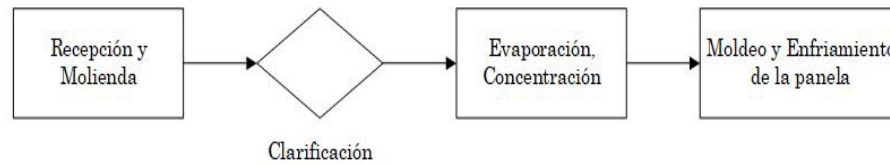


Figura 1. Diagrama simplificado de los procesos tecnológicos fundamentales de la producción de panela. Fuente: elaboración propia.

2.4 Balance de masa y energía

Para comparar la eficiencia energética de las dos tecnologías (caldera mixta y hornillas) se realizaron balances de masa y energía. En el caso del sistema tradicional, se consideraron las diferentes biomásas utilizadas como combustible: madera de pigüe, bagazo de caña, aserrín, etc.

Las etapas de evaporación y concentración de los jugos consisten en eliminar el agua presente en el jugo mediante la transferencia de energía térmica. El contenido de sólidos solubles al inicio de esta fase estaba entre 16°Brix y 22°Brix, y al final se alcanzaban concentraciones entre 90°Brix y 94°Brix, llegando al punto de miel. Las mieles alcanzan una temperatura promedio de 120 °C. Las ecuaciones de balance de masa y energía para los dos sistemas se presentan en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Ecuaciones de balance de masa y energía en la producción de panela para el sistema tradicional (hornillas). Fuente: elaboración propia.

	Ecuaciones	Referencia
Balance de masa	$E + S = S + C$	[24]
Balance de masa en función de °Brix	$M_0 * °Brix_0 = M_1 * °Brix_1 + M_{CN} * °Brix_{CN}$	[22]
Calor consumido en el proceso	$Q_C = Q_G = MCp(\Delta T) + E\lambda_{Ev}$	[25]
Calor específico en función de °Brix	$C_p = 1 - 0,0056 * °Brix$	[26], [27]
Calor total consumido en los procesos	$Q_{TC} = Q_{GCl} + Q_{GEv} + Q_{GC}$	
Calor cedido por los combustibles	$Q_{LIB} = M_{comb} * Cp_{comb}$	[25]
Balance de calor cedido por los combustibles	$Q_{LIB} = Q_{GB} + Q_{GL}$	
Pérdidas de gases calientes por la chimenea (30%)	$Q_{pCH} = \frac{Q_G * 30\%}{100}$	[28]
Pérdidas por combustión incompleta (4,5 %)	$Q_{pCI} = \frac{Q_G * 4,5\%}{100}$	[28]
Pérdidas por paredes y piso del ducto (7 %)	$Q_{pPPD} = \frac{Q_G * 7\%}{100}$	[28]
Eficiencia térmica	$\varepsilon = \frac{Q_C}{Q_L} * 100\%$	[25]

Tabla 2. Ecuaciones de balance de masa y energía en la producción de panela para el sistema de caldera. Fuente: elaboración propia.

	Ecuaciones	Referencia
Balance de masa	$E + S = S + C$	[24]
Balance de masa en función de °Brix	$M_0 * {}^{\circ}Brix_0 = M_1 * {}^{\circ}Brix_1 + M_{CN} * {}^{\circ}Brix_{CN}$	[22]
Calor específico en función de °Brix	$C_p = 1 - 0,0056 * {}^{\circ}Brix$	[26]
Calor consumido en el proceso	$Q_C = M_V * \lambda_v$	[29]
Cálculo de la masa de vapor	$M_V = \left[\frac{M * C_p(\Delta T) + E \lambda_{Ev}}{\lambda_v} \right] * 1,08$	[30]
Calor total consumido en los procesos	$Q_{TC} = Q_{GCl} + Q_{GEv} + Q_{GC}$	
Calor cedido por los combustibles	$Q_{L\dot{I}B} = M_{comb} * Cp_{comb}$	[25]
Eficiencia térmica	$\varepsilon = \frac{Q_C}{Q_L} * 100\%$	[25]

Se utilizaron 2000°kg de caña de azúcar recolectada en los campos de la provincia de Pastaza. La caña se seleccionó en función del índice de madurez, color y grosor de los tallos, siguiendo los criterios establecidos por [31].

En la Tabla 1 se encuentran las ecuaciones de cálculo para el balance de masa y energía del sistema tradicional. La Tabla 2, por su parte, presenta otro conjunto de ecuaciones para el balance de masa y energía, utilizadas en el sistema de caldera como innovación tecnológica en la producción panelera de la provincia de Pastaza.

Los poderes calóricos de los residuos o subproductos forestales utilizados como fuentes de energía en el sistema de producción de panela se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Poder calorífico de algunos residuos. Fuente: adaptada de [32].

Desecho	PCS = Poder calorífico superior	PCI = Poder calorífico inferior
	(kJ/kg)	(kJ/kg)
Madera seca pigüe	4450	4130
Madera verde pigüe	3780	3430
Serrín húmedo pigüe	2000	1788
Serrín seco	3500	3120
Viruta seca	3200	3125
Biomasa, residuos industriales urbanos y otros	1309	800

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Selección de materias primas y preferencia de los productores por variedad de caña de azúcar en función de calidad, rendimiento y consumo

En la Tabla 4 se incluye el estado de las dos variedades de caña empleadas, categorizadas por los 36 productores encuestados. Destaca que el 55,56 % de los productores calificaron la variedad Limeña como buena, con base en su experiencia, frente al 50 % que indicaron lo mismo para la variedad Puerto Rico. En cuanto a la calidad del jugo obtenido, medida por su contenido en azúcar expresado en grados °Brix, la variedad Limeña fue la que dio mejores resultados, con un 47,22 % de productores encuestados que la calificaron como buena, frente a un 38,89 % que dijeron lo mismo para la variedad Puerto Rico. La variedad Limeña también destacó entre los encuestados por su constitución suave, lo que la hace más preferida para el

consumo humano, con un mejor rendimiento en la producción de jugo y un mejor producto final, así como por su facilidad de venta.

Tabla 4. Calificación por los productores encuestados del estado de la caña de azúcar y del jugo empleados como materias primas además de los materiales de combustión utilizados.

Fuente: elaboración propia.

Diagnóstico energético	Estado de madurez de las variedades de caña %		Calidad del jugo obtenido		Calidad del combustible utilizado en las hornillas %		
	Puerto Rico	Limeña	Puerto Rico 16,25°Brix	Limeña 17,13°Brix	Bagazo de caña	Madera y astilla de pigüe	Aserrín de pigüe
Bueno	50,00	55,56	38,89	47,22	15,79	55,56	50,00
Regular	33,33	27,78	50,00	38,89	57,89	33,33	36,11
Malo	16,67	16,67	11,11	13,89	26,32	11,11	13,89
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

3.2 Recurso forestal utilizado como fuente de energía

En la Tabla 4 se incluyen los resultados de la cantidad y calidad de la biomasa utilizada como fuentes de energía o combustible en hornillas. Se determinó que la madera empleada es fundamentalmente astillas y serrín de pigüe, cubriendo aproximadamente el 95% de las necesidades energéticas en el proceso actual de producción de panela. Al ser el pigüe (*Piptocoma discolor*) la cual pertenece a la familia Asterácea, una especie considerada de rápido crecimiento e invasora en los bosques húmedos tropicales de la Amazonía ecuatoriana [33], el empleo de esta biomasa en el proceso de producción de panela es atractivo en los sistemas tradicionales. Sin embargo, en la actualidad, la madera de pigüe es muy apetecida por las industrias madereras [34]-[36], implicando en un corto plazo incremento de precios de la especie forestal lo que la ubicaría fuera del alcance de los pequeños productores.

3.3 Sistemas de evaluación energética

En la Tabla 5 se presenta el consumo de energía y el rendimiento energético en cada uno de los procesos que intervinieron en la elaboración de la panela para las variedades de caña estudiadas, empleando las tecnologías de hornilla y caldera mixta. El consumo de energía fue muy similar en las dos variedades de caña de azúcar empleadas. En hornillas, el consumo fue de 5612,75 MJ/kg para la variedad Puerto Rico y 5612,50 MJ/kg para la variedad Limeña. En calderas, se encontró un consumo de 7347,5 MJ/kg para la variedad Puerto Rico y 7347,08 MJ/kg para la variedad Limeña.

Tabla 5. Consumo y aprovechamiento de la energía en los procesos de producción de la panela.

Fuente: elaboración propia.

Energía	Hornillas				Calderas			
	Puerto Rico		Limeña		Puerto Rico		Limeña	
	Q (MJ/kg)	% ε	Q (MJ/kg)	% ε	Q (MJ/kg)	% ε	Q (MJ/kg)	% ε
Energía consumida	2600,25	27,1	2574,1	26,83	2817,64	32,02	2811,06	31,95
Energía desaprovechada	3012,5	31,4	3038,4	31,67	4529,86	51,48	4536,02	51,55
Energía perdida (paredes, chimenea, convección y purga)	3981,48	41,5	3981,48	41,5	1451,87	16,5	1451,87	16,5
Energía neta consumida	5612,75	58,5	5612,5	58,5	7347,5	83,5	7347,08	83,5

3.4 Tecnología tradicional

Los resultados de eficiencia energética del sistema de hornillas fueron de 58,5%, independiente de la variedad de caña de azúcar. Este valor es similar al reportado por [37] quienes en su estudio reportaron eficiencias que variaron entre: 32,53 % considerada como eficiencia baja, 42,59 % regular, 47,52 % media y 63,36 % alta. De estos resultados se puede indicar que los procesos energéticos en sistema de producción de panela no son distintos de otros países.

En las centrales o trapiches paneleros tradicionales, la energía requerida para los procesos de evaporación y concentrado de los jugos de caña es suministrada en forma de calor obtenido por combustión de biomasa forestal (leña de pigüe y bagazo) en lecho fijo. La eficiencia de estos depende mucho del diseño y construcción del tipo de hornos utilizados para tal propósito (hornillas paneleras), los cuales son construidos de forma empírica sin criterio energético. En [38] se presenta una innovación en las cámaras de combustión para usar bagazo de caña pre-seco. La innovación está compuesta por un conjunto de calderas que bajan de nivel a medida que se va purificando el jugo y con una chimenea de similar altura a las tradicionales. Esta versión mejorada se conoce como cámara Ward-CIMPA, la cual alcanza temperaturas de combustión de 1200 °C y es amigable con el medio ambiente, al integrar el uso de bagazo con liberaciones del 1 % de monóxido de carbono (Figura 2). Independiente de las mejoras, se indica que la pérdida de calor es del 41 %, siendo un punto crítico del proceso que predomina en la agroindustria panelera. Este valor es muy similar a los obtenidos en este estudio que es de 41,5 % de pérdidas de calor. Según [39], es fundamental la modernización del sector de NCS de una pequeña escala a una transformación integrada a gran escala en términos de producción mediante intervenciones técnicas rentables y energéticamente eficientes, junto con mejoras tecnológicas en términos de calidad de NCS.

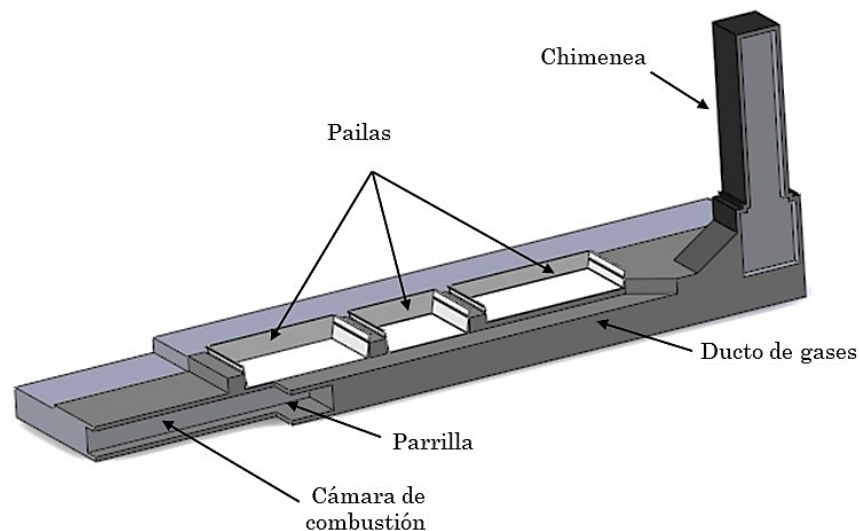


Figura 2. Esquema de hornilla panelera con cámara de combustión tipo Ward-CIMPA, ducto de gases y chimenea. Fuente: [38].

3.5 Tecnología de caldera mixta

La Tabla 5 muestra los resultados de eficiencia del sistema de caldera para las dos variedades de caña de azúcar, la cual fue del 83,5 %. Las calderas son sistemas de combustión de alta eficiencia, y se recomienda que el sector panelero utilice calderas mixtas porque pueden utilizar recursos forestales o desechos agroindustriales y diésel como combustibles para generar calor y vapor. Debido a sus ventajas socioambientales, este tipo de calderas se

utiliza frecuentemente en la industria azucarera, y la tecnología también se adapta a la producción de panela o azúcar no centrifugado. Los hallazgos del presente estudio contrastan con los de [39], que reportaron valores de eficiencia energética del 77,01 %. Además, indican que las pérdidas de recursos energéticos y financieros son causadas por el agua de reposición a la caldera, y el bagazo gastado por pérdida de calor (desaprovechamiento del calor sensible de condensación, purgas, fugas y ausencia de aislamiento).

La energía consumida en los procesos de elaboración de panela fue de 2600,25 MJ/kg en el sistema de hornilla y de 2817,64 MJ/kg en el sistema de caldera. La energía perdida fue del 41,5 % en el sistema de hornillas, mientras que en el sistema de caldera mixta solo llegó al 16,50 %. Esta diferencia se debió a la estructura de los sistemas, por lo que fue necesario tomar en cuenta las pérdidas de energía por paredes, chimenea, radiación, convección y purga. Estos resultados se contrastan con el estudio de CORPOICA – SENA [13], que reportó pérdidas de energía global del 40 % a través de paredes y chimenea en sistemas tradicionales.

Las pérdidas por radiación y convección se estimaron en un promedio de 1 % de la energía total, mientras que las pérdidas por purga se estimaron en un 2,5 % de la energía total en los sistemas tradicionales. En la caldera se consideraron pérdidas por radiación y convección de alrededor del 2 % de la energía total, y las pérdidas por purgas se estimaron en un 5 % de la energía total, lo que coincide con estudios previos realizados [40].

El máximo aprovechamiento del consumo de energía en los procesos de clarificación, evaporación y concentración, más la energía remanente o sobrante, fue de un 58,50 % en el sistema de hornillas y de un 83,50 % en el sistema de caldera, resultados muy similares a los obtenidos por [38], quienes indicaron que, en lugar de la evaporación en cuba abierta, las unidades modernas de producción de NCS emplean una caldera con camisa de vapor alimentada por una caldera que opera con bagazo, mejorando así la eficiencia de la producción de NCS entre 2,5 y 3 veces. Lo anterior demuestra la factibilidad del uso de sistemas de calderas que, a pesar de consumir mayor energía (7347,5 MJ/kg) que el sistema de hornillas (5612,75 MJ/kg), hace un uso más racional de la misma, desaprovechando solo 1451,87 MJ/kg, mientras que el sistema tradicional desperdicia 3981,48 MJ/kg.

Es fundamental destacar que la diferencia en el aprovechamiento de energía entre los dos sistemas reside en la forma en que se utiliza el calor generado durante la combustión. En el sistema de hornillas, una gran parte de calor se pierde por radiación y convección al ambiente, mientras tanto el sistema de caldera, el calor es aprovechado de manera más eficientemente para generar vapor y calentar el jugo de caña de azúcar. También, el uso del bagazo como combustible en el sistema de caldera permite aprovechar un subproducto de la producción de caña de azúcar, lo que favorece a la sostenibilidad del proceso.

4. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista energético, la comparación de los sistemas de hornilla tradicional y de caldera mixta, permitieron la determinación del porcentaje de aprovechamiento de la energía y las pérdidas en todo el sistema global de producción de panela. Se cuantificó un ahorro de 2529,61 MJ/kg en el sistema de calderas frente al sistema tradicional, lo cual indica que, técnicamente entre los dos sistemas estudiados, el mejor sistema de producción de panela es el de caldera mixta por brindar un mayor aprovechamiento de la energía (83,5 %) y un producto de mayor calidad para el consumo humano.

Se determinó y seleccionó un equipo del tipo de caldera mixta con capacidades de aprovechar el residuo cañero más conocido como bagazo de caña. De esta manera se mejoró la eficiencia y transferencia de energía para prevenir los impactos negativos en la calidad del producto, y que contribuya al medio ambiente con la satisfacción de la demanda energética del sistema de producción de la agroindustria panelera.

El aprovechamiento del bagazo de la caña de azúcar y otros productos de la biomasa energética renovable como combustibles, que es una etapa inicial que complementa con el

diésel para el encendido del equipo, justifica su denominación como sistema de caldera mixta. La implementación de estas tecnologías permitió reducir las emisiones contaminantes y obtener un producto final de mayor calidad. Este sistema permitió la mejora del rendimiento energético en la producción de panela como una alternativa viable y sostenible para el sector.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Los autores agradecen al personal de las centrales paneleras de la provincia de Pastaza, en especial a la Central Panelera de la parroquia teniente Hugo Ortiz, y a la Universidad Estatal Amazónica por las facilidades de sus laboratorios de Agroindustria para la ejecución y culminación del presente estudio.

6. REFERENCIAS

- [1] J. M. García, P. C. Narváez, F. J. Heredia, Á. Orjuela, and C. Osorio, "Physicochemical and sensory (aroma and colour) characterisation of a non-centrifugal cane sugar ('panela') beverage," *Food Chem.*, vol. 228, pp. 7–13, Aug. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.134>
- [2] A. L. Alarcón, A. Orjuela, P. C. Narváez, and E. C. Camacho, "Thermal and Rheological Properties of Juices and Syrups during Non-centrifugal Sugar Cane (Jaggery) Production," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 121, pp. 76–90, May. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.016>
- [3] Y. Asikin, Y. Nakaza, G. Maeda, H. Kaneda, K. Takara, and K. Wada, "Evaporation Temperature Alters Physicochemical Characteristics and Volatile Maillard Reaction Products of Non-Centrifugal Cane Sugar (NCS): Comparison of Polyethylene Membrane and Retronasal Aroma Simulator Techniques for the Extraction of Volatile Organic Compounds in NCS," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 11, p. 6402, May. 2023. <https://doi.org/10.3390/app13116402>
- [4] K. Kumari Dubey, S. Snigdha Mishra, S. J. Marathe, S. M. Mahajani, A. Arora, and R. S. Singhal, "Incorporation of jaggery in beetroot jam enhances its antioxidant properties with acceptable sensory and physicochemical profile," *Food and Humanity*, vol. 1, pp. 985-995, Dec. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.08.005>
- [5] P. Verma, N.G. Shah, and S.M. Mahajani, "Why jaggery powder is more stable than solid jaggery blocks," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 101, pp. 308-314, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.093>
- [6] M. J. Guerra, and M.V. Mujica, "Physical and chemical properties of granulated cane sugar 'panelas'," *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, vol. 30, no. 1, Jan-Mar. 2010. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=395940099037>
- [7] W. R. Jaffé, "Nutritional and functional components of non centrifugal cane sugar: A compilation of the data from the analytical literature," *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 43, pp. 194–202, Nov. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.06.007>
- [8] K. Thamaphat, B. A. Goodman, P. Limsuwan, and S. Meejoo Smith, "Rapid screening for anthocyanins in cane sugars using ESR spectroscopy," *Food Chemistry*, vol. 171, pp. 123–127, Mar. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.126>
- [9] A. Kumar, and S. Singh, "The benefit of Indian jaggery over sugar on human health," in *Dietary Sugar, Salt and Fat in Human Health*, New York, NY, USA: Elsevier, 2020, pp. 347–359. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816918-6.00016-0>
- [10] V. González Rivera, M. J. Albán Galárraga, E. C. Casco Guerrero, and I. Hidalgo Guerrero, "Critical analysis of the environmental impacts generated by the sugar cane [agroindustry in the province of Pastaza - Ecuadorian Amazon," *Conciencia Digital*, vol. 7, no. 3, pp. 6–25, Jul. 2024. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i3.3070>
- [11] D. H. Flórez-Martínez, C. A. Contreras-Pedraza, and J. Rodríguez, "A systematic analysis of non-centrifugal sugar cane processing: Research and new trends," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 107, pp. 415-428, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.011>
- [12] J. Rodríguez, F. Velásquez, J. Espitia, S. Escobar, and O. Mendieta, "Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization," *Energy*, vol. 152, pp. 858-865, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127>

- [13] F. Velásquez, J. Espitia, O. Mendieta, S. Escobar, and J. Rodriguez, "Centrifugal cane sugar processing: A review on recent advances and the influence of process variables on qualities attributes of final products," *Journal of Food Engineering*, vol. 255, pp. 32-40, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.009>
- [14] O. Mendieta, L. Castro, H. Escalante, and M. Garfí, "Low-cost anaerobic digester to promote the circular bioeconomy in the non-centrifugal cane sugar sector: A life cycle assessment," *Bioresource Technology*, vol. 326, p. 124783, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124783>
- [15] L. F. Gutiérrez-Mosquera, S. Arias-Giraldo, and A. M. Ceballos-Peñaloza, "Advances in traditional production of panela in Colombia: analysis of technological improvements and alternatives," *Ingeniería y competitividad*, vol. 20, no. 1, pp. 107-123, Jan-Jun. 2018. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30332018000100107
- [16] R. M. Ibarra Guevara, J. C. Barrientos Fuentes, and W. A. Gómez Guerrero, "Technical, economic, social, and environmental implications of the organic panela production in Nocaima, Colombia: The ASOPROPANOC case," *Agronomía Colombiana*, vol. 41, no. 1, p. e105356, Jan. 2023. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v41n1.105356>
- [17] A. L. Alarcón et al., "Chemical characteristics and colorimetric properties of non-centrifugal cane sugar ('panela') obtained via different processing technologies," *Food Chem.*, vol. 340, p. 128183, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128183>
- [18] J. Guevarra Blaschke, "Plan de Ordenamiento Territorial de la Provincia de Pastaza, Puyo-Ecuador al Año 2025," Pastaza Gobierno Provincial, Pataza, Ecuador, 2019. <https://patronatopastaza.gob.ec/wp-content/uploads/2022/02/Plan-de-Desarrollo-y-Ordenamiento-Territorial-Pastaza-2019.pdf>
- [19] M. Enríquez, B. Andrade, and J. Morales, "Modelo de gestión asociativo de la asociación de cañicultores de Pastaza," *Reciena*, vol. 2, no. 2, pp. 12-18, Oct. 2022. <https://reciena.esPOCH.edu.ec/index.php/reciena/article/view/72>
- [20] J. P. Alvarado et al., "Evaporation automation at the Central de Mielés de Útica, Colombia, for non-centrifugal sugar cane production: Sustainable optimization strategies," *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 26, p. 101850, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101850>
- [21] D. Marcelo, R. La Madrid, and H. Santamaría, "Evaluación mediante indicadores productivos y energéticos de tres módulos de producción de panela granulada," in *Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013)*, Cancún, Mexico, 2013. <https://www.laccei.org/LACCEI2013-Cancun/RefereedPapers/RP252.pdf>
- [22] H. I. Velásquez Arrendondo, F. Chejne Janna, and A. F. Agudelo Santamaría, "Diagnóstico energético de los procesos productivos de la panela en Colombia," *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, vol. 57, no. 2, Dec. 2004. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v57n2/a07v57n2.pdf>
- [23] W. F. Quezada Moreno, *Guía técnica agroindustrial panelera*, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, 2007. [Online]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/934/1/Gu%C3%ADa%20T%C3%A9cnica%20de%20Agroindustria%20Panelera.pdf>
- [24] R. M. Felder, R. W. Rousseau, L. G. Bullard, and J. A. Newell, *Felder's elementary principles of chemical processes*. Nashville, TN, USA: John Wiley & Sons, 2016. <https://himatekkim.ulm.ac.id/id/wp-content/uploads/2021/06/Felder-R.M-Rousseau-R.W-Elementary-Principles-on-Chemical-Process-3rd-Edition.pdf>
- [25] D. Q. Kern, *Procesos de Transferencia de Calor*, México D.F., Compañía Editorial Continental S.A. de C.V., 1999. https://thunderbooks.files.wordpress.com/2009/06/procesos_de_transferencia_de_calor_-_kern_31_ed.pdf
- [26] E. Hugot, and G. H. Jenkins, "Juice Heating," in *Handbook of Cane Sugar Engineering*, New York, NY, USA: Elsevier, 1960, p. 448. [https://books.tarbaweya.org/static/documents/uploads/pdf/Handbook%20of%20Cane%20Sugar%20Engineering%20by%20E.%20Hugot%20\(z-lib.org\).pdf](https://books.tarbaweya.org/static/documents/uploads/pdf/Handbook%20of%20Cane%20Sugar%20Engineering%20by%20E.%20Hugot%20(z-lib.org).pdf)
- [27] L. A. Iturralde Carrera, E. B. Valuca, and A. R. Espinosa Palenque, "Metodología para balance energético de centrales azucareros," *Ladee*, vol. 2, no. 2, pp. 1-15, Jul-Dec. 2021. <https://doi.org/10.17981/ladee.02.02.2022.01>
- [28] FedePanela "Nota de información de la NAMA (NINO) reconversión productiva y tecnológica del subsector panelero," Federación Nacional de Productores de Panela, Bogotá D. C. Colombia, Nov. 2015. [Online]. Available: https://www4.unfccc.int/sites/PublicNAMA/_layouts/UN/FCCC/NAMA/Download.aspx?ListName=NAMA&Id=146&FileName=NINO%20PANELA%20VFINAL.pdf

- [29] C. J. Geankopolis, "Secado de materiales de proceso," in *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*, 3rd ed. México: Cecsa (Compañía Editorial Continente), 1998, p. 579.
<https://fenomenosdetransporte.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/05/geankopolis.pdf>
- [30] W. L. McCabe, J. C. Smith, and P. Harriott, "Heat transfer to fluids with phase change," in *Unit Operations of Chemical Engineering*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1993, p. 374.
<https://evsujpiche.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/06/unit-operations-of-chemical-engineering-5th-ed-mccabe-and-smith.pdf>
- [31] S. A. Mosquera, J. E. Carrera, and H. S. Villada, "Variables que afectan la calidad de la Panela Procesada en el Departamento del Cauca," *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, vol. 5, no. 1, pp. 21–24, Mar. 2007. Available:
<https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/645/1813>
- [32] J. E. González, C. Morillo Robles, J. García, J. Cárdenas, and D. Oliva, "Determinación del potencial energético del pigüe (Piptocoma Discolor) en la amazonía ecuatoriana," *Ciencia Digital*, vol. 3, no. 1, pp. 376–393, Feb. 2019. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i1.298>
- [33] G. Cañizares-Pentón, M. F. Rivero-Aragón, R. A. Pérez-Bermúdez, and E. González-Suárez, "La gestión energética y su impacto en el sector industrial de la provincia de Villa Clara, Cuba," *Tecnología Química*, vol. 34, no. 1, pp. 13–21, Nov. 2015.
<https://tecnologiaquimica.uo.edu.co/index.php/tq/article/view/356/348>
- [34] J. E. González, A. Papue, V. González, A. Borja, and D. Oliva, "Crecimiento y conservación de Piptocoma discolor (Pigüe) en la provincia de Pastaza, Ecuador," *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, vol. 6, no. 3, pp. 366–379, Sep–Dec. 2018.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2310-34692018000300366&script=sci_arttext
- [35] G. Erazo, J. C. Izurieta, P. Cronkleton, A. Larson, and L. Putzel, *El uso de pigüe (Piptocoma discolor) por los pequeños productores de Napo, Ecuador: Manejo sostenible de una especie pionera de madera para los medios de vida locales*, Bogor, Indonesia: CIFOR, 2014.
http://www.cifor.org/publications/pdf_files/infobrief/4424-infobrief.pdf
- [36] X. Checa, J. Grijalva, R. Ramos, P. Barrera, and R. Limongi, "Situación de los Recursos Genéticos Forestales – Informe País Ecuador," Programa Nacional de Forestería del INIAP, Quito, Ecuador, Technical Report, 2012. <https://www.fao.org/4/i3825e/i3825e20.pdf>
- [37] J. Rodríguez, F. Velásquez, J. Espitia, S. Escobar, and O. Mendieta, "Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization," *Energy*, vol. 151, pp. 858–865, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127>
- [38] M. E. Guerrero-Usedá, and J. D. Escobar-Guzmán, "Eficiencia técnica de la producción de panela," *Revista de Tecnología*, vol. 14, no. 1, pp. 107–116, Feb. 2015.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6041583>
- [39] Venkatesh *et al.*, "Current production strategies and sustainable approaches towards the resurgence of non-centrifugal cane sugar production – a review," *Sustain. Food Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 200–214, Jan. 2023. <https://doi.org/10.1039/d2fb00032f>
- [40] J. Bonilla *et al.*, "Termodinámica de Equipos Industriales: Eficiencia Energética de una Caldera," *Revista Electrónica*, no. 13, pp. 18–34, Jul. 2009.
https://fqsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin13/URL_13_QUI03.pdf

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés en el manuscrito presentado para la publicación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Víctor González-Rivera: revisión de literatura, conceptualización, formulación, diseño de la investigación y redacción del borrador del manuscrito.

Michael José Albán-Galárraga: revisión técnica del manuscrito, recolección de la información en la central panelera en investigación.

Juan González-Rivera: formulación, diseño y desarrollo del proyecto de investigación, recolección de información en laboratorio de agroindustria de la Universidad Estatal Amazónica.

Irene Hidalgo-Guerrero: recolección de información en laboratorio de agroindustria de la Universidad Estatal Amazónica, revisión técnica del manuscrito, discusión y conclusiones.