

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
PROGRAMA DE POSGRADO**

**Análisis de la gestión integral de la energía y su impacto económico en dos trapiches
paneleros del Valle del Cauca-Colombia**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado
Como requisito para optar por el grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

en Economía, Desarrollo y Cambio Climático

Raquel Vélez Peña

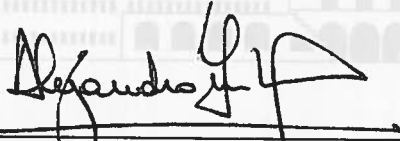
Turrialba, Costa Rica

2020

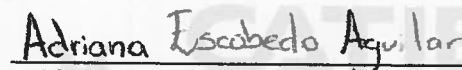
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN ECONOMÍA, DESARROLLO
Y CAMBIO CLIMÁTICO**

FIRMANTES:



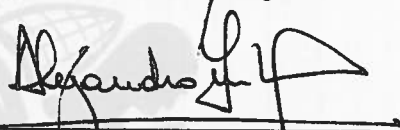
Alejandro Imbach, Dr.H.C.
Director de tesis



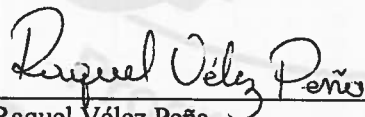
Adriana Escobedo, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Angela Díaz, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Alejandro Imbach, Dr.H.C.
Decano, a.i. Escuela de Posgrado



Raquel Vélez Peña
Candidata

AGRADECIMIENTOS

A Dios, mi Padre, por este regalo.

A mi familia, por creer siempre en mis capacidades y apoyarme en todos mis proyectos.

A mis profesores Alejandro, Adriana y Ángela y a la profesora Isabel Gutiérrez por su ayuda.

A Blue, por estar ahí para mí y hacer parte de este logro.

A Álvaro Quintero, Coordinador regional Fedepanela.

A Dr. Mario Sandoval, por su apoyo incondicional.

A Jhon Jairo Millán, colega que se interesó por la investigación y fue de gran ayuda.

A Jairo Andrés Rojas, colega y amigo

A los gerentes y subgerentes de los trapiches objeto del estudio.

La presente investigación fue posible gracias a la beca entregada por AGROSAVIA, a quienes extiendo mi agradecimiento, especialmente a la Dra. Sonia Ospina, al Dr. Gonzalo Rodríguez Borray y al Dr. Jader Rodríguez.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE ECUACIONES	VII
GLOSARIO Y UNIDADES.....	IX
RESUMEN EN ESPAÑOL Y PALABRAS CLAVES.....	X
ABSTRACT AND KEY WORDS	X
1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1 ANTECEDENTES	- 1 -
1.1.1 Breve reseña de la caña de azúcar en Colombia.....	- 1 -
1.1.2 La Panela como producto derivado de la caña de azúcar	- 2 -
1.1.3 Agroindustria panelera en Colombia.....	- 3 -
1.1.3.1 Principales hitos ambientales y dificultades	- 4 -
1.2 JUSTIFICACIÓN	- 7 -
1.3 IMPORTANCIA.....	- 8 -
2. OBJETIVO GENERAL.....	- 9 -
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	- 9 -
3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	- 10 -
4. MARCO TEÓRICO	- 11 -
4.1 Eficiencia energética en Colombia	- 11 -
4.2. Proceso de producción de panela.....	- 12 -
4.3 Eficiencia energética de la producción de panela	- 14 -
4.4. Nuevos paradigmas de la investigación en panela.....	- 16 -
5. METODOLOGÍA	- 19 -
5.1. Área de estudio	- 19 -
5.2 Etapas de la investigación.....	- 20 -
5.2.1. Etapa I: Selección de casos de estudio.....	- 20 -
5.2.2 Etapa II: Materiales y métodos	- 21 -
5.2.3. Etapa III: Análisis de la información	- 22 -

6. RESULTADOS	- 22 -
6.1. Caracterización del proceso de producción	- 22 -
6.1.1. Balances de materia y energía globales	- 26 -
6.2. Caracterización de la eficiencia energética y la gestión ambiental	- 30 -
6.3. Escenarios de gestión eficiente de la energía y ahorro económico.....	- 36 -
6.4. Análisis financiero	- 40 -
6.4.1. Estado de resultados.....	- 40 -
6.4.2 Valor actual neto (VAN).....	- 42 -
6.4.3. Análisis beneficio/costo (B/C).....	- 42 -
6.4.4. Análisis de sensibilidad	- 43 -
7. CONCLUSIONES	- 44 -
8. BIBLIOGRAFÍA	- 47 -
9. ANEXOS	- 52 -

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Objetivos y preguntas de investigación generadas para la investigación	- 10 -
Cuadro 2. Composición del melote de caña (% base fresca).....	- 13 -
Cuadro 3. Indicadores productivos clave en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia	- 24 -
Cuadro 4. Comparación de las instalaciones de producción en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia	- 25 -
Cuadro 5. Resumen de volúmenes de producción en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia	- 26 -
Cuadro 6. Indicadores para calcular GEI por kg de panela para tecnología de evaporación cerrada (T1) y abierta (T2).....	- 28 -
Cuadro 7. Caracterización de la gestión ambiental en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia	- 30 -
Cuadro 8. Caracterización de variables y proyectos de optimización energética de dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia	- 31 -
Cuadro 9. Índices de consumo de electricidad en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia	- 32 -
Cuadro 10. Resultados de los escenarios de gestión eficiente de la energía y ahorro económico de dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia.....	- 37 -
Cuadro 11. Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III).....	- 38 -
Cuadro 12. Coeficientes (BLUP) de los efectos aleatorios del modelo ajustado	- 39 -

Cuadro 13. Comparación del estado de resultados financieros según el análisis realizado en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia.....	- 40 -
Cuadro 14. Resultados del análisis de sensibilidad del trapiche panelero T1, Valle del Cauca, Colombia.....	- 43 -
Cuadro 15. Resultados del análisis de sensibilidad del trapiche panelero T2, Valle del Cauca, Colombia.....	- 43 -
Cuadro 16. Comparación factores de costos, gastos y estado de resultados de dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia	- 52 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Dinámica de entre los distintos eslabones de la cadena productiva de la panela en Colombia.....	- 4 -
Figura 2. Enfoque de la economía ambiental neoclásica.....	- 18 -
Figura 3 Enfoque de la Economía Ecológica.....	- 18 -
Figura 4. Localización geográfica del Valle del Cauca, Colombia	- 19 -
Figura 5. Etapas de desarrollo de la investigación.....	- 20 -
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de panela con tecnología vapor seguido en dos trapiches paneleros del Valle del Cauca, Colombia	- 23 -
Figura 7. Balances de masa y energía global del trapiche T1 durante el periodo PI (2016-2017), Valle del Cauca, Colombia	- 28 -
Figura 8. Balances de masa y energía global del trapiche T1 durante el periodo PII (2018-2019), Valle del Cauca, Colombia	- 29 -
Figura 9. Balances de masa y energía global del trapiche T2 durante el periodo PI (2016-2017), Valle del Cauca, Colombia	- 29 -
Figura 10. Balances de masa y energía global del trapiche T2 durante el periodo PII (2018-2019), Valle del Cauca, Colombia.....	- 30 -
Figura 11. Diagrama de Pareto de consumo de electricidad del trapiche panelero T2, Valle del Cauca, Colombia.....	- 33 -
Figura 12. Tendencia de consumo y producción del trapiche T1 durante el período I, Valle del Cauca, Colombia	- 34 -
Figura 13. Tendencia de consumo y producción del trapiche T1 durante el período II, Valle del Cauca, Colombia.....	- 34 -
Figura 14. Tendencia de consumo y producción del trapiche T2 durante el período I, Valle del Cauca, Colombia	- 35 -
Figura 15. Tendencia de consumo y producción del trapiche T2 durante el período II, Valle del Cauca, Colombia.....	- 35 -
Figura 16. Relación entre la energía (kW/h) y la producción de panela (toneladas) de dos trapiches (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia	- 38 -

Figura 17. Estado de resultados del análisis financiero del trapiche panelero T1, Valle del Cauca, Colombia.....	- 41 -
Figura 18. Estado de resultados del análisis financiero del trapiche panelero T2, Valle del Cauca, Colombia.....	- 42 -

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. % Extracción del molino o en peso.....	- 26 -
Ecuación 2. Flujo másico de jugo crudo o guarapo.....	- 26 -
Ecuación 3. Flujo másico de cachaza.....	- 26 -
Ecuación 4. Volumen de agua maceración.....	- 26 -
Ecuación 5. Flujo másico de bagazo.....	- 26 -
Ecuación 6. Energía del combustible.....	- 26 -
Ecuación 7. Potencia de la caldera.....	- 27 -
Ecuación 8. Vapor generado en calderas.....	- 27 -
Ecuación 9. Eficiencia térmica global.....	- 27 -
Ecuación 10. Energía utilizada.....	- 27 -
Ecuación 11. Calor latente de vaporización.....	- 28 -
Ecuación 12. Calor sensible.....	- 28 -
Ecuación 13 Modelo de regresión lineal.....	- 36 -
Ecuación 14. Ecuación de tendencia modelo ajustado T1.....	- 39 -
Ecuación 15. Ecuación de tendencia modelo ajustado T1.....	- 39 -

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AGROSAVIA: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (antes CORPOICA)

CENICAÑA: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia

CIAT: Centro Internacional de Agricultura Tropical

CIMPA: Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Industria Panelera

COLCIENCIAS: Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación

DANE: Dirección Nacional de Estadística, Colombia

EE: Eficiencia energética

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

FEDEPANELA: Federación Nacional de Paneleros, Colombia

IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

ICONTEC: Instituto Colombiano de Normas Técnicas

INVIMA: Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos, Colombia

RCH: rendimiento de caña por hectárea

RCHM: rendimiento de caña por hectárea mensual

Minagricultura: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia

Minambiente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

MGIE: Modelo de Gestión Integral de la Energía

NAMA: Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiada

SAC: Sociedad de Agricultores de Colombia

SGA: Sistema de Gestión Ambiental

SGE: Sistema de Gestión de la Energía

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia

URE: Ley 697 de 2001 Sobre el Uso Racional de la Energía en Colombia

PHVA: Planificar, hacer, verificar y actuar

SINAB: Sistema Nacional de Bibliotecas Universidad Nacional de Colombia

GLOSARIO Y UNIDADES

Cachaza: barro y materiales extraños disueltos, presentes en el jugo de caña crudo

Guarapo: jugo crudo de caña

Grados Brix (°Brix): indicador de concentración de sacarosa

Panelería: espacio dedicado dentro de la fábrica o planta de producción para procesar las mieles hasta el punto de panela, desde la concentración hasta el batido, moldeo y enfriamiento

Planta: instalaciones de la fábrica donde se procesan las mieles de la caña

Punteo: operación manual por medio de la cual el operario detecta el punto de concentración de la miel en el que se debe bajar del tacho para el batido

Rendimiento en campo: toneladas de caña de azúcar por hectárea en el terreno de siembra

Rendimiento en panela: cantidad de kilos de panela obtenidas por tonelada de caña molida y procesada

Tacho: contenedor de capacidad variable utilizado en la etapa de concentración de mieles hasta 96° Brix.

Trapiche: Es el nombre tradicional con el que desde hace siglos se designa a las instalaciones agroindustriales donde se procesa la caña para la preparación de las mieles y elaboración de la panela. Técnicamente el “trapiche” es el molino de caña, que en tiempos antiguos se construía en madera y era accionado manualmente o por animales. Los molinos de caña modernos son de tracción mecánica eléctrica.

Unidades

t: toneladas

kg: kilogramos

kWh: kilovatios hora

kJ: kilojulios

kcal: kilocalorías

BHP: *boiler horse power*

lbv/h: libras de vapor por hora

Psi: *pouns force per square inch* (libras fuerza por pulgada cuadrada)

ha: hectáreas

RESUMEN EN ESPAÑOL Y PALABRAS CLAVES

Esta investigación tiene un enfoque mixto, donde se involucran variables cualitativas y cuantitativas con el propósito de describir y explicar el impacto económico de la gestión eficiente de la energía en la producción de panela en dos trapiches del Valle del Cauca, considerando aspectos ambientales. Se encontró que el impacto de la energía en los costos totales de producción, solamente representa un 2% en el trapiche 1 y un 6% en el trapiche 2. Sin embargo, ambientalmente juega un papel importante, porque está relacionado con el uso de los combustibles, el consumo mensual de electricidad y su consecuente impacto ambiental por la generación de GEI. La eficiencia térmica global del trapiche 1 es del 80%; mientras que para el trapiche dos es del 43%. Los ahorros estimados por reducción de la energía no asociada a la producción representan únicamente el 0,4% sobre los costos totales. Adicionalmente, se encontró que en ambos trapiches los ingresos se incrementan en cerca de 1,6% gracias al diseño y puesta en marcha del filtro de cachaza. A pesar de la afectación en los ingresos provocada por la crisis de mercado en 2018, ambos casos mantuvieron su utilidad y siguen en operación con valores actuales netos positivos. Las relaciones beneficio costo de cada empresa también resultaron viables pero los márgenes son muy estrechos.

Panela, trapiche panelero, gestión integral de la energía, eficiencia térmica global, GEI, generación de residuos.

ABSTRACT AND KEY WORDS

This research has a mixed approach, where qualitative and quantitative variables are involved in order to describe and explain the economic impact of efficient energy management in two panela factories in Valle del Cauca, including environmental aspects. It was found that the impact of energy on total production costs only represents 2% in mill 1 and 6% in mill 2. However, environmentally it plays an important role, because it is related to the use of fuels, monthly electricity consumption and its consequent environmental impact from the generation of GHG. The overall thermal efficiency of mill 1 is 80%; whereas for mill two it is 43%. Estimated savings from non-production energy reduction specifically represented 0.4% of total costs. In addition, they find that in both mills, revenues increased by about 1.6% thanks to the design and implementation of the "cachaza filter". Despite the impact on revenues caused by the market crisis in 2018, both cases maintained their utility and continue to operate with positive net present values. The cost benefit ratios of each company were also viable but the margins are very narrow.

Panela, panela factories, comprehensy energy management, overall thermal efficiency, GHG. waste generation.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 Breve reseña de la caña de azúcar en Colombia

La historia de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) data de tiempos muy antiguos, su origen exacto no está determinado. Según Osorio Cadavid (2007), el texto más antiguo en el que se hace referencia es el Código de Manú, texto escrito por el primero de estos personajes heroicos de la India, más de mil años antes de la era cristiana (Osorio Cadavid 2007). Así, algunos autores mencionan que es originaria del nordeste de la India, específicamente de la provincia de Bengala, otros dicen que fue domesticada en el archipiélago de Melanesia en Nueva Guinea 8.000 a 15.000 años a. C., y que se extendió luego a las islas vecinas (Filipinas, Borneo, Sumatra), la China y la India. Alejandro Magno llevó la caña a Persia hacia el año 331 a. C., y fueron los árabes quienes la expandieron a Egipto, Arabia, Palestina y Siria para terminar finalmente en África y España. En 1493, Cristóbal Colón en su segundo viaje la trajo a América (Aguirre Restrepo 1976, Mintz 1996, Osorio Cadavid 2007, Cenicaña 2014).

De acuerdo con revisiones históricas recopiladas en distintas fuentes, la caña se introdujo en Colombia por primera vez en 1510 a Santa María La Antigua del Darién; llegando al Valle del Cauca en 1570. De esto hablan historiadores como Víctor Manuel Patiño: *“La caña vino a Colombia en el año 1538 a través del puerto de Cartagena y dos años después en 1540 entró por Buenaventura al valle geográfico del río Cauca; en el Valle del Cauca, la caña de azúcar se puede observar desde épocas tan tempranas como el siglo XVI, cuando Sebastián de Belalcázar introdujo la gramínea desde Santo Domingo y la sembró en su estancia situada en cercanías a lo que hoy es Jamundí. La caña criolla que trajeron los españoles a finales del período colonial, llegó de las Guayanas; la caña Tahití o Otahití fue introducida al Valle entre 1802 y 1808. Entre 1930 y 1932 llegó la variedad POJ 2878, que hoy persiste en muchas zonas cañicultoras de Colombia, plantándose inicialmente en la margen izquierda del río Cauca, en Arroyohondo y Cañas Gordas, lugares muy cercanos a Cali, donde operan sendos trapiches paneleros”* (Restrepo 2007, Osorio Cadavid 2007, Cenicaña 2014).

Por su parte Aguirre Restrepo (1976) menciona: *“a Colombia es posible que haya sido traída entre 1510 y 1515 y el primer ingenio de azúcar (azúcar de horma, o de pilón, o de pan), de que se tenga noticia fue establecido alrededor de 1570 sobre el Río Amaime en las cercanías de la ciudad de Palmira”*.

Hoy en Colombia el cultivo de la caña de azúcar se presenta en 28 de sus 32 departamentos. Según la información reportada por la Dirección Nacional de Estadística en la Encuesta Nacional Agropecuaria 2017 (DANE 2017), dentro de los cultivos permanentes, la caña ocupa el tercer lugar en extensión con 490.000 hectáreas. El cultivo de café ocupa el primer lugar con 814.000 hectáreas sembradas y la palma de aceite ocupa el segundo con 517.000 hectáreas.

Con respecto a la superficie de caña sembrada, el 43% se dedica a la producción de panela con un rendimiento promedio del 6,41 toneladas de panela por hectárea y el 57% a la producción de azúcar (DANE 2017).

El Centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia (Cenicaña) en sus 72 años de trabajo en el Valle del Cauca, ha desarrollado 150 variedades, 100 de ellas para el sector panelero. El 96% del área sembrada en el Valle del río Cauca presenta alguna de estas variedades. En sus recomendaciones agronómicas, Cenicaña advierte que cultivar más del 60% de cobertura con una sola variedad, presiona a los patógenos de la caña provocando mayor incidencia de plagas y enfermedades. La siembra de una variedad nueva cuesta actualmente alrededor de 10 a 12 millones de pesos por hectárea (Cenicaña 2019).

1.1.2 La Panela como producto derivado de la caña de azúcar

Durante el procesamiento de la caña se obtienen diferentes derivados. Uno de ellos es la “*panela*”, que es la forma más primitiva de azúcar y se obtiene por la evaporación del jugo crudo hasta transformarse en mieles sólidas, conservando todos los componentes nutricionales como minerales, vitaminas, fibras y micronutrientes que no están presentes en el azúcar blanco refinado. La FAO la denomina “*azúcar no centrifugado*” para clasificarlo como un tipo de azúcar integral que no sigue las etapas de refinación convencional donde se cristaliza la sacarosa presente en el jugo y se separa de los demás componentes alimenticios (Rudas y Forero 1995, FAO 2004, Osorio Cadavid 2007, Castellanos *et ál.* 2009, Durán Castro 2010).

Además de ser un alimento de origen natural, a la panela se le reconocen importantes beneficios medicinales como exfoliante y cicatrizante natural de la piel y para curar resfriados y gripe y por lo tanto, también es considerada como un bioinsumo útil en la industria farmacéutica, medicinal y cosmética (Rudas y Forero 1995, FAO 2004, Jaffé 2015, Velásquez *et ál.* 2019).

La panela se conoce con diferentes nombres y presentaciones alrededor del mundo. En Colombia es común encontrarla en bloques de diferentes formas, granulada o en polvo y en forma líquida o miel. En México, tiene forma de cono y recibe el nombre de piloncillo; en Costa Rica es de forma trapezoidal y se conoce como tapa dulce. Otros nombres existentes son empanizao en Bolivia; rapadura en Brazil y Argentina; Chancaca en Perú y Chile y papelón en Venezuela. En algunos países asiáticos como la India y Pakistán se conoce como gur o jaggery; en Filipinas como muscovado y Kokuto en Japón (FAO 2004, Velásquez Arredondo *et ál.* 2005, Castellanos *et ál.* 2009, Jaffé 2013, 2015, Gutiérrez-Mosquera *et ál.* 2018, Velásquez *et ál.* 2019).

Según Jaffé (2013), 25 países producen panela; sin embargo, la producción mundial se concentra en ocho. En primer lugar está India seguido por Colombia. En tercer lugar se ubica Pakistán y en el cuarto China, seguido por Brasil, Bangladesh, Myanmar y Filipinas (Jaffé 2013).

1.1.3 Agroindustria panelera en Colombia

La producción de panela es una de las agroindustrias rurales de mayor tradición en Colombia; además es un agronegocio de gran interés desde el punto de vista de seguridad alimentaria y sostenibilidad ambiental que constituye un renglón económico representativo del país porque aporta el 1,4% al PIB agropecuario y vincula el 12% de la mano de obra campesina, siendo después del café la actividad que más empleo rural genera actualmente con cerca de 287.000 empleos directos (García *et ál.* 2011, Minagricultura 2018, Gutiérrez-Mosquera *et ál.* 2018, Rodríguez Borray *et ál.* 2020).

Colombia es el segundo productor de panela en el mundo con un volumen de producción cercano a 1,8 millones de toneladas para el año 2018, que representan el 16% de la producción mundial (FAO 2020), y el primero en consumo per-cápita con 25 kg/ habitante-año en promedio, pues es considerada un alimento fundamental en la canasta de alimentos básica. La producción de panela constituye un sector productivo en Colombia. Los principales departamentos productores son Boyacá, Cundinamarca, Cauca, Antioquia Santander Nariño y Valle del Cauca (FAO 2004, Castellanos *et ál.* 2009, Minagricultura 2018, Rodríguez Borray *et ál.* 2020).

Los procesos de elaboración de panela han evolucionado poco en el tiempo, sin dejar de depender en esencia del conocimiento tradicional para dar el punto a las mieles de caña hasta su solidificación. Tanto el cultivo de la caña, como su transformación y comercialización de forma generalizada, se realizan en una misma unidad de producción denominada trapiche. Actualmente el país cuenta con cerca de 20.000 trapiches paneleros, los cuales en su mayoría conservan un sistema de producción artesanal de pequeña escala¹ (Rudas y Forero 1995, FAO 2004, Castellanos *et ál.* 2009, Gutiérrez-Mosquera *et ál.* 2018, Rodríguez *et ál.* 2018).

La cadena productiva de la panela involucra diferentes actores sociales privados y públicos que van desde los productores de caña, trapiches procesadores, comercializadores (actores directos); los intermediarios del sistema de transporte de caña, venta de agroinsumos entre otros servicios (actores indirectos); hasta los consumidores finales. También comprende los sistemas de apoyo, que abarcan el marco jurídico y reglamentario y las distintas organizaciones vinculadas al gobierno nacional. Entre ellas se destaca la Federación Nacional de Productores de Panela **Fedepanela**, entidad gremial que se encuentra presente en 14 departamentos donde se concentra el 90% de la producción de panela en el país y brinda servicios de apoyo a los pequeños productores paneleros (IICA 2001, Castellanos *et ál.* 2009, Fedepanela 2019 b). En la Figura 1 se ilustra la dinámica entre los distintos eslabones de la cadena.

¹ En Colombia AGROSAVIA clasifica a los productores de acuerdo a los volúmenes de producción de panela así: pequeños 50-100 kg/h; medianos productores 100-220 kg/h y grandes > 220 kg/h (Rodríguez *t ál.* 2018).

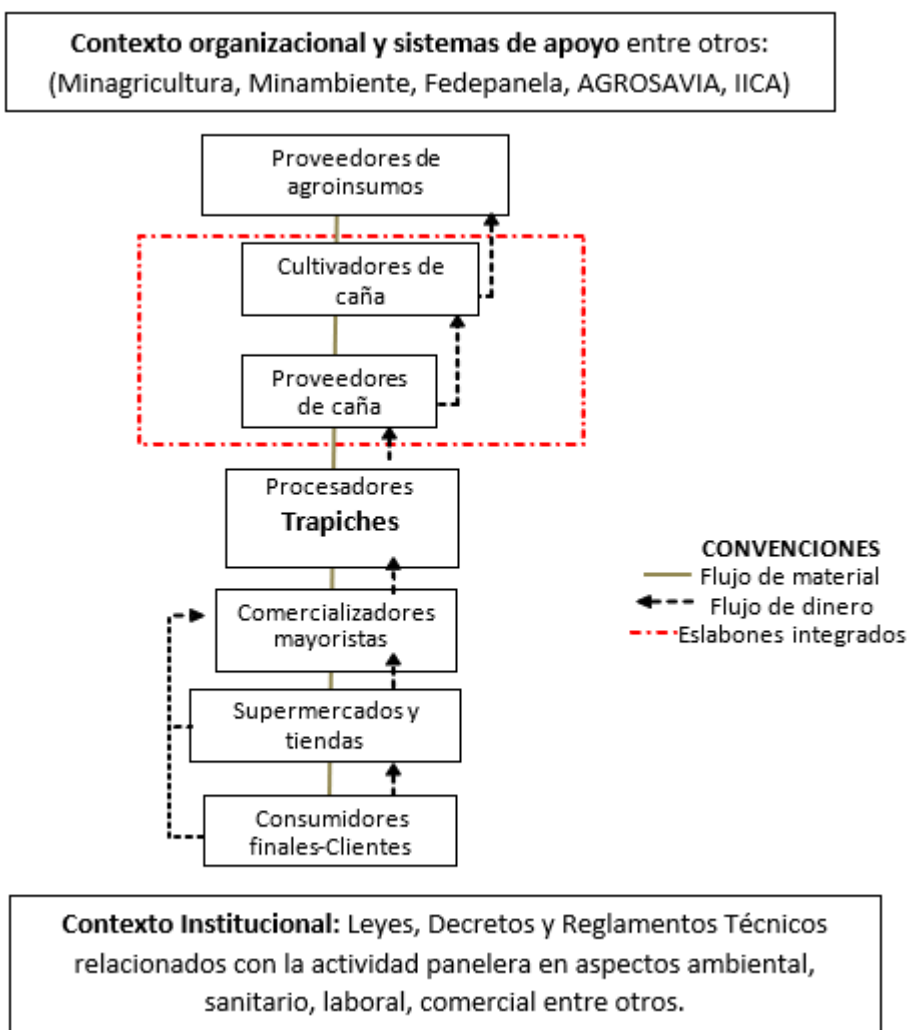


Figura 1 Dinámica de entre los distintos eslabones de la cadena productiva de la panela en Colombia

Fuente: Elaborado con base en IICA 2001 y Castellanos *et ál.* 2009:25

1.1.3.1 Principales hitos ambientales y dificultades

Hitos ambientales

De acuerdo con Acosta *et ál.* (1978), se estimaba que a nivel nacional las hornillas paneleras consumían anualmente el equivalente a 1'000.000 de árboles de cinco años de edad; por otro lado, la eficiencia en la molienda no permitía una eficiente utilización del bagazo como combustible, por lo que el proceso de deforestación para el abastecimiento de leña incidió en la tecnificación de los trapiches. “En la medida en que se avanzó en la construcción de hornillas que operaban con petróleo, en la modificación en la evaporación abierta a fuego directo, y el trabajo con menos operarios, se aumentó la producción por hora” (Acosta *et ál.* 1978).

En 1986 se creó el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Industria Panelera (CIMPA), como parte de un estudio adelantado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en el marco del Convenio de cooperación entre Colombia y Holanda para mejorar la agroindustria de la panela en Colombia. En principio, se dispuso la Cuenca del río Suárez (ubicada en los departamentos de Boyacá y Santander), como escenario piloto para el desarrollo de las tecnologías CIMPA que permitieran hacer más eficiente el procesamiento de la panela, y 10 años más tarde se extendió a Cundinamarca. (Rodríguez y Gottret 2000, Durán Castro 2010).

Las preocupaciones ambientales relacionadas con esta actividad, impulsaron las iniciativas de la nueva tecnología, buscando mitigar el impacto ambiental de las hornillas paneleras. Adicionalmente, para optimizar la extracción del jugo en el trapiche, se recomendó el montaje de molinos de tres mazas y, para trapiches de alta capacidad, la instalación de un segundo molino en serie. Además se plantearon recomendaciones de carácter agronómico y social, tales como aumentar la eficiencia en la labor de transporte de la caña, la cual representaba más del 15% de los costos de producción, mejorar el nivel de vida de los productores y trabajadores de esta agroindustria y aumentar los rendimientos agrícolas y de procesamiento, así como el aprovechamiento de subproductos (Rodríguez y Gottret 2000).

Se concluyó, en particular para mejorar la eficiencia energética del proceso, la necesidad de desarrollar modelos de hornillas que eliminaran el uso de leña y otros combustibles adicionales al bagazo, mediante el rediseño de las cámaras de combustión y la instalación de chimeneas para optimizar la velocidad de los gases calientes. Esta tecnología se conoce como hornillas tipo Ward-CIMPA y resultaron ambientalmente amigables por la reducción de monóxido de carbono al 1% (Rodríguez y Gottret 2000, García 2004, Guerrero y Escobar 2015).

Para el año 2002, el Ministerio del Medio Ambiente (Minambiente) expidió la “*Guía Ambiental para el subsector Panelero*” con la activa participación de la Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC) y de Fedepanela. Esta guía aborda aspectos relacionados con el uso de recursos, generación de subproductos sólidos, efluentes líquidos y emisiones atmosféricas; monitoreos ambientales del suelo; del paisaje, del componente social, de la actividad productiva y finalmente de los trámites ante la autoridad ambiental relacionada con la planeación y gestión ambiental necesaria para establecer el Sistema de Gestión Ambiental (SGA) dentro del trapiche. Este documento está abierto para consulta en el sitio *web* de la federación (Fonseca 2002).

Por su parte, el Ministerio de Protección Social expidió la Resolución No. 779 de 2006 sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización de la panela. ICONTEC, en el año 2009, publicó la Norma Técnica Colombiana NTC 1311 de carácter obligatorio, donde dicta los requisitos de calidad del producto. Hoy dentro del marco jurídico (leyes, decretos y resoluciones) relativo a esta actividad productiva, existen normas para los aspectos comercial, sanitario y laboral (Agudelo *et ál.* 2017).

En el año 2016, el gobierno encabezado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, priorizó el subsector de la caña de azúcar para la producción de panela para el desarrollo de una Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiada (NAMA, por sus siglas en inglés), con el fin de cumplir con la meta contra el cambio climático acordada en la COP 21 de París. El nombre de la NAMA es: “*Estrategia de Desarrollo baja en emisiones para la cadena de producción de la panela en Colombia*”. Su implementación se proyecta al 2030, y busca la reconversión productiva y tecnológica de 250.000 hectáreas sembradas de caña; tiene como meta pasar de casi 20.000 trapiches ineficientes a 8.000 trapiches mejorados técnica, energética y ambientalmente, así como mejorar la rentabilidad del negocio y la calidad del producto final. Se estima que tiene un costo aproximado de 167 millones de dólares (Agudelo *et ál.* 2017).

En síntesis, este marco normativo sumado con los objetivos de país propuestos por la NAMA Panela, que se orienta a la reconversión tecnológica de trapiches ineficientes, ofrecen escenarios de oportunidades para el desarrollo de proyectos tendientes a ayudar a las organizaciones paneleras a posicionar su negocio con estándares de calidad y sostenibilidad.

Dificultades del gremio

La mayoría de los establecimientos de producción artesanal de panela en Colombia, se basan en una economía de subsistencia. Esto se debe al alto grado de informalidad ya que más del 70% no cuentan con figura de representación legal constituida, gran parte de la mano de obra es familiar y afronta muchas dificultades para modernizar su producción y expandir sus mercados (IICA 2001, FAO 2004, Guerrero y Escobar 2015).

De acuerdo con Ramírez Gil (2017), dentro de las principales problemáticas, además del bajo nivel tecnológico de los trapiches, están la falta de asistencia técnica; baja asociatividad y mercadeo; fluctuación de los precios de venta de la panela en el mercado; ausencia de relevo generacional y la incapacidad técnica de los pequeños productores de cumplir con la legislación sectorial. Por lo tanto, este autor plantea, como alternativas para mejorar la sostenibilidad de la producción, la reconversión tecnológica del proceso productivo, la diversificación de la producción y el diseño de políticas de desarrollo para toda la cadena (Ramírez Gil 2017).

Actualmente el sector panelero se encuentra atravesando una crisis que ha requerido la urgente atención e intervención del gobierno nacional. La sobreoferta del producto ha ocasionado una baja constante en el precio de venta afectando a los productores. Para abril del 2019 se calculaban pérdidas de \$710 COP por kilo de panela (\$0,217 USD²) (Fedepanela 2019a).

² Tasa de cambio promedio para el año 2019 \$ COP 3.281 por \$ USD

Es sabido que el cierre de derretideros ilegales³ (Ley 40 de 1990 y la Resolución 779 del 2006, prohíben la producción de panela con azúcar); la competencia desleal en precios y las importaciones innecesarias de jarabe de maíz y azúcar subsidiada, son cuestiones discutidas desde hace más de 30 años (Rudas y Forero 1995, IICA 2001, Cruz 2013).

Por su parte, Guerrero y Escobar (2015) y Vélez Peña *et ál.* (2016) mencionan que dada la condición de atraso tecnológico, la mayoría de trapiches en el país opera por fuera del marco jurídico establecido tanto en gestión ambiental como a nivel de eficiencia energética. Adicionalmente hay desconocimiento de sistemas alternativos de autogeneración y falta de asistencia técnica, lo cual hace ineficiente la producción desde el punto de vista técnico y ambiental (Guerrero y Escobar 2015, Vélez Peña *et ál.* 2016).

Por otro lado, la falta de evolución del enfoque de cadena productiva de la panela hacia cadenas de valor, ha dificultado la implementación de medidas encaminadas al fomento de las exportaciones. Hoy sólo se exporta el 1% de la producción nacional. La promoción al consumo y diversificación del producto como insumo en diferentes industrias, depende de los esfuerzos de toda la cadena (IICA 2001, Osorio Cadavid 2007, Castellanos *et ál.* 2009, Guerrero y Escobar 2015, Minagricultura 2018).

Por lo anterior, los esfuerzos recientes del gobierno nacional apuntan a la aprobación del proyecto de Ley 156 de 2018 “*por medio de la cual se generan incentivos a la calidad, promoción al consumo y comercialización de panela, mieles paneleras y sus derivados, así como la reconversión y formalización de los trapiches en Colombia y se dictan otras disposiciones*”, el cual se encuentra actualmente en debate en el senado de la República⁴.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Diferentes autores tales como Restrepo (2007); Ramírez Gil (2017), Guerrero y Escobar (2015), Gutiérrez-Mosquera *et ál.* (2018), entre otros, señalan que el denominador común de la agroindustria panelera en América Latina y el Caribe es el bajo nivel tecnológico, lo que conlleva a una baja eficiencia y poca calidad del producto. Así mismo se considera que en general la tecnología utilizada ha variado muy poco desde los tiempos de la colonia, por lo que se requiere un gran esfuerzo físico en los procesos de producción y se le considera “*una actividad ruda, de escasa eficiencia y poca rentabilidad*” (Aguirre Restrepo 1976, Rodríguez y Gottret 2000, Blanco 1999, Restrepo 2007; Ramírez Gil 2017, Guerrero y Escobar 2015, Gutiérrez-Mosquera *et ál.* 2018).

³ Según Rudas (1995) e IICA (2001) son establecimientos ilegales que falsifican panela a partir de azúcar blanco, generando competencia desleal en precios y sobreoferta.

⁴ Vale la pena mencionar que este proyecto de ley ha sido objeto de fuertes críticas por parte de los productores paneleros a nivel nacional. <https://lasillavacia.com/silla-santandereana/los-paneleros-duque-gano-quitandole-alas-paloma-72413>

En Colombia, la investigación en este campo ha sido adelantada y liderada por AGROSAVIA en las principales regiones productoras de panela del país. Hoy hay 6.201 hectáreas de caña de azúcar ubicadas en la zona de ladera del Valle del Cauca dedicadas a la producción de panela, en las cuales AGROSAVIA ha hecho parte en trabajos con pequeños productores. Sin embargo, la participación de grandes productores tecnificados de la zona plana en proyectos de investigación es escasa.

En la zona plana del Valle del Cauca se concentran 12 trapiches tecnificados, con sistemas de vapor y modelos empresariales sofisticados que facilitan y mejoran los procesos de producción y gestión, lo cual parece ser más sostenible que en otras regiones del país. El desarrollo tecnológico de estos trapiches se ha visto favorecido no sólo por la cercanía con los ingenios azucareros y la estructura vial para el transporte de caña, sino también por un cambio paradigmático de los cañicultores que fueron adaptando sus procesos con nuevas prácticas y equipos que mejoraron sus rendimientos y su eficiencia energética. Estos cambios también han sido catalizados por la asociatividad entre productores que fueron expandiendo no solo sus cultivos⁵, sino su capital social, mediante la vinculación de trabajadores calificados de manera formal en diferentes áreas del proceso (FAO 2004, Osorio Cadavid 2007, Castellanos *et ál.* 2009, Agudelo *et ál.* 2017).

Por lo anterior es necesario capitalizar las experiencias de los productores que han desarrollado diversas capacidades organizativas, gerenciales y toma de decisiones a fin de inducir cambios positivos a través del intercambio con pequeños y medianos productores desarticulados, promoviendo la formación y creación de conocimiento, así como el fortalecimiento del capital social, el cual juega un papel más importante que el físico y financiero por las características de esta actividad rural que es esencialmente artesanal (Prins 2011, Requier-Desjardins y Rodríguez-Borray 2004).

1.3 IMPORTANCIA

La producción de panela consiste básicamente en un proceso de evaporación de agua de los jugos de la caña de azúcar, lo cual desde el punto de vista termodinámico, hace de la energía el factor clave de la eficiencia. El desarrollo tecnológico que se ha venido implementado por parte de expertos, se enfoca en mejorar la eficiencia energética a través de cambios técnicos en sistemas de combustión tradicional. Sin embargo, falta evolucionar hacia una cultura operativa y organizacional, donde las buenas prácticas sean igualmente importantes (García *et ál.* 2011, Guerrero y Escobar 2015, Vélez Peña *et ál.* 2016, Gutiérrez-Mosquera *et ál.* 2018).

⁵ Vale la pena tomar en cuenta que, a pesar del pujante progreso panelero y azucarero en la región del Valle, surgen preocupaciones en torno a su crecimiento utilizando grandes extensiones de tierra y dejando el campo en manos de pocos dueños, así como, la transformación del paisaje en monocultivos extensivos de caña, desplazando cultivos como frutales, maíz, plátano y yuca.

Los sistemas de gestión ofrecen la posibilidad de hacer control y monitoreo de indicadores, y seguimiento de las acciones correctivas, bajo la premisa de que lo que no se mide, no se puede gestionar ni gerenciar. En temas energéticos, la norma internacional en sistemas de gestión de la energía ISO 50001, ofrece los lineamientos que permiten avanzar en temas de eficiencia energética en las empresas, logrando con ello cobeneficios productivos, sociales y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al calentamiento global (Prías y Campos 2013).

No obstante que los trapiches tecnificados del Valle del Cauca no están incluidos dentro de las acciones previstas a nivel nacional dentro de la NAMA panela, por considerarse sofisticados y con enfoque de economía empresarial, pueden servir como referente en temas de eficiencia y gestión energética y ambiental para el modelo de producción tradicional. Esto dado que: *“la innovación no se limita a cambios tecnológicos, también se refiere a las dimensiones organizativa, normativa, conceptual y metodológica”* (Prins 2011).

Estos trapiches se conocen como *“pequeños ingenios paneleros”*, ya que a diferencia de los procesos de tecnología tradicional, presentan procesos con tecnologías de vapor que mejoran la eficiencia energética y permiten controlar las variables de proceso. Adicionalmente, son plantas de producción que emplean motores eléctricos para mover los molinos de caña, recuperan la cachaza que es el principal efluente contaminante del proceso y por su eficiencia energética algunos de ellos sólo emplean bagazo como combustible (Castellanos *et ál.* 2009, Agudelo *et ál.* 2017). Teniendo en cuenta lo anterior, es importante analizar como estos trapiches paneleros del Valle del Cauca utilizan y administran los recursos energéticos asociados a la producción de panela de una manera integral, con el fin de identificar oportunidades de mejora en el proceso productivo y aspectos que se puedan transferir a otras organizaciones paneleras.

Esta investigación busca aportar información productiva, ambiental y económica a partir de dos casos de estudio, a fin de impulsar la innovación y sostenibilidad de la agroindustria panelera en Colombia considerando que: *“Aumentar la capacidad de adaptación e innovación es más importante que la adopción puntual de una nueva tecnología”*(Prins 2011).

2. OBJETIVO GENERAL

Estimar la eficiencia de la gestión energética y su impacto económico y ambiental en dos trapiches tecnificados del Valle del Cauca.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar la eficiencia energética para estimar los ahorros potenciales económicos y energéticos.
2. Cuantificar la generación de residuos y su impacto en los ingresos.
3. Obtener el VAN y la relación B/C mediante un análisis de sensibilidad comparando el escenario base con escenarios a diferentes niveles de ingresos y costos.

3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Cuadro 1. Objetivos y preguntas de investigación generadas para la investigación

Objetivos	
<p>General</p>	<p>Estimar la eficiencia de la gestión energética y su impacto económico y ambiental en dos trapiches tecnificados del Valle del Cauca.</p>
	<p>Preguntas de investigación</p>
<p>Objetivo específico 1: Caracterizar la eficiencia energética para estimar los ahorros potenciales económicos y energéticos.</p>	<p>¿Cómo es el proceso productivo? ¿Cuál es el volúmen de produccción mensual en toneladas de panela? ¿Cuáles son los equipos de mayor consumo de electricidad? ¿Qué proyectos de optimización energética ha implementado la empresa? ¿Qué tipo de control hace la empresa a los consumos energéticos? ¿Qué tipo de combustibles utiliza? ¿Qué tipo de variables se pueden monitorear para gestionar la eficiencia energética del proceso? ¿Cuál es la relación entre el consumo de electricidad y el nivel de producción? ¿Cuál es el porcentaje de energía no asociada a la producción? ¿De cuánto es el ahorro económico alcanzable a partir de la gestión energética en el proceso productivo? ¿Qué factores influyen en el proceso para generar los mayores ahorros?</p>
<p>Objetivo específico 2: Cuantificar la generación de residuos y su impacto en los ingresos.</p>	<p>¿Qué tipos de residuos genera el proceso? ¿En que cantidades se generan? ¿Qué tipo de manejo hace la empresa de los residuos que genera y qué impacto tiene ese manejo en los ingresos? ¿Cuáles son los motivos por los cuales genera este tipo de tratamientos? ¿Qué prácticas de gestión ambiental implementa?</p>

	¿Cuál tecnología utiliza más intensamente los recursos naturales?
Objetivo específico 3: Obtener el VAN y la relación B/C mediante un análisis de sensibilidad comparando el escenario base con escenarios a diferentes niveles de ingresos y costos.	¿En qué medida se preocupa el gerente de la empresa por los costos energéticos? ¿Cuánto impacta el precio de la energía y combustibles en la estructura de costos? ¿Cuál es el impacto económico de la eficiencia energética en el proceso productivo? ¿Cómo varía el VAN de la empresa? ¿Cuál es la relación B/C?

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Eficiencia energética en Colombia

De acuerdo con la Ley 697 de 2011, la eficiencia energética (EE) es un *“Asunto de interés social, público y de conveniencia nacional fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales”* (Ley 697 2001).

La misma ley define la EE como la *“reducción del consumo de energía manteniendo los mismos servicios energéticos sin disminuir nuestro confort y calidad de vida protegiendo el medio ambiente asegurándole abastecimiento y fomentando un comportamiento sostenible en su uso”*(Ley 697 2001). De acuerdo con Prías y Campos (2013), la EE en los procesos productivos en términos generales está relacionada con las inversiones a nivel tecnológico, con la gestión y desarrollo de buenos hábitos en su uso y el máximo aprovechamiento de los recursos. Esto a su vez genera co-beneficios ambientales, sociales y mejora la competitividad de la economía (Prías y Campos 2013).

El Modelo de Gestión Integral de la Energía (MGIE), propuesto por Campos *et ál.* (2008), es el resultado de una alianza estratégica entre la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y Colciencias⁶, que consiste en una serie de procedimientos basados en el ciclo planificar, hacer, verificar y actuar (PHVA) de las normas internacionales cuya implementación conducen al establecimiento de un Sistema de Gestión de la Energía (SGIE) a nivel empresarial. Lograr la eficiencia energética requiere de gestión y control tanto del recurso energético como del sistema mismo (Campos *et ál.* 2008).

La Norma Técnica Colombiana NTC ISO 50001 brinda información para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía, brindando herramientas

⁶ Dejó de funcionar oficialmente el 5 de diciembre de 2019, cuando se creó el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Minciencias (<https://es.wikipedia.org/wiki/Colciencias>).

que se convierten en el medio fundamental para incluir la eficiencia energética en los esquemas organizacionales de las empresas. La norma parte de la identificación de la situación actual de consumo energético de las industrias, mediante la construcción de una línea base de consumo y el establecimiento de indicadores de desempeño y variables de control que deben ser monitoreadas para alcanzar la máxima eficiencia energética respecto a la línea base (Campos *et ál.* 2008).

De acuerdo con Vélez Peña *et ál.* (2016), el nivel de desarrollo técnico-organizativo y el enfoque de economía empresarial que presenta un grupo de productores de panela a escala semindustrial en el Valle del Cauca, sugieren que se podría llegar a facilitar la integración del SGIE al modelo de gestión administrativa de estos trapiches. Con ello se buscaría eliminar el uso improductivo de la energía, así como alcanzar el consumo y costos mínimos sin sacrificar la productividad ni la generación de empleo (Vélez Peña *et ál.* 2016).

4.2. Proceso de producción de panela

El proceso de elaboración de la panela inicia en el campo con el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), el cual requiere de terrenos adecuados para su desarrollo, así como de agroinsumos y mano de obra necesarios para el corte, levante y transporte o apronte de la misma hasta el trapiche. Las etapas de producción pueden variar dependiendo de su grado de tecnificación o industrialización (Osorio Cadavid 2007, Durán Castro 2010, Rodríguez Borray *et ál.* 2020).

Una vez la caña es alistada para la molienda, en algunos trapiches tecnificados pasa por una operación previa de desfibrado, en la cual se parte en trozos más finos para optimizar la extracción del jugo; pero generalmente esto no ocurre en pequeños trapiches por lo que el tallo pasa entero por los molinos. Como resultado de la molienda, se separa el jugo crudo de caña o “guarapo” del bagazo o material vegetal del tallo. Este jugo sin clarificar se compone de sólidos disueltos (18%-22%), sólidos insolubles ($\leq 15\%$), y agua (75%) aproximadamente (Osorio Cadavid 2007, Durán Castro 2010).

El bagazo, dependiendo de la eficiencia y cantidad de molinos, puede variar su contenido de humedad entre 40-50% y es reutilizado como biocombustible en las hornillas y calderas para la generación de vapor (en el caso de trapiches tecnificados). La combustión genera la energía térmica necesaria en las etapas de beneficio del jugo de caña que conducen a la producción de panela en el siguiente orden: prelimpieza, clarificación; evaporación del agua y concentración de las mieles (Osorio Cadavid 2007, Durán Castro 2010, Castellanos *et ál.* 2009).

La evaporación del jugo (~80% agua), es la operación que mayor cantidad de energía consume. Sin embargo, en procesos tradicionales no se considera como un foco de atención por el desconocimiento de la energía potencialmente útil entregada por el vapor de agua, el cual se desperdicia calentando el ambiente y debido a que el combustible no representa un gasto económico, ni siquiera se contabiliza.

El jugo pasa a la etapa de limpieza y clarificación en tanques donde mediante la adición de cal (con el propósito de regular la acidez de los jugos a un valor de pH de 5,8) y flocculantes químicos o naturales (mucílagos vegetales obtenidos de la maceración de las cortezas de árboles como balso (*Eleocharphus popayanensis*), cadillo (*Triumfetta lapulla*) y guácimo (*Guacimo ulmifolia*), se separa por decantación de la cachaza (Osorio Cadavid 2007, Durán Castro 2010).

De acuerdo con Sarria *et ál.* (1990), la cachaza es un subproducto de naturaleza coloidal con un 20% de materia seca, compuesto por sacarosa, azúcares reductores y algo de ceniza y proteína. Su aprovechamiento en la alimentación de cerdos y pollos de engorde es una alternativa de aprovechamiento que requiere previamente tratamiento térmico del subproducto, debido a su fácil fermentación y su alto contenido de agua. El método de conservación consiste en someterla a deshidratación por calor, produciendo un material más estable y de fácil manejo denominado melote, el cual se puede conservar por más de tres meses (Sarria *et ál.* 1990). En el Cuadro 2 Se presenta la composición del melote de caña.

Cuadro 2. Composición del melote de caña (% base fresca)

Humedad	51,7	Nitrógeno	0,2
°Brix	41,0	Fósforo	0,31
Pol	34,6	Potasio	0,32
Pureza	35,0	Calcio	0,49
Azúcares reductores	6,8	Magnesio	0,14
Sacarosa	30,0	Manganeso	65 ppm
Proteína	3,5	Zinc	48,8 ppm
Grasa	3,1	Hierro	92,5 ppm
Ceniza	2,5	Cobre	10,1 ppm
pH	6,3		

Fuente: Tomada de Sarria *et ál.* 1990:2

El jugo limpio (16–20°Brix) (% sólidos solubles), pasa a evaporación la cual se puede efectuar al vacío, pero que generalmente se realiza abierta, siendo menos eficiente. En sistemas de evaporación cerrada de múltiple efecto, se ha demostrado que se obtiene mayor eficiencia térmica global (63%), se requiere menos combustible y se generan menos emisiones de GEI (Rodríguez *et ál.* 2018).

La temperatura de ebullición de los jugos es de 96-97°C y a partir de esta, se obtiene la miel o meladura (68-70°Brix). A las mieles en ebullición (120-125°C) se le adiciona grasa vegetal (cera de laurel) para controlar la espuma y evitar que se pegue en el recipiente y se queme; posteriormente, pasan a la etapa de concentración o punteo hasta alcanzar 91-92 °Brix. Finalmente se mece en bateas manualmente hasta una concentración de 93-94°Bix, pasa a moldeo donde se deja reposar mientras se enfría y finalmente a empaque y embalaje para su posterior comercialización en diferentes presentaciones (Osorio Cadavid 2007, Durán Castro 2010, García *et ál.* 2011, Gallardo García 2017, Gutiérrez-Mosquera *et ál.* 2018).

4.3 Eficiencia energética de la producción de panela

En Colombia, la eficiencia térmica de los procesos de producción está determinada por las tecnologías presentes en los trapiches, las cuales a su vez dependen de la capacidad de producción. Por lo general los pequeños productores requieren de combustibles adicionales al bagazo, tales como llantas usadas, leña y carbón cuyo uso implica impacto negativos al ambiente (Guerrero y Escobar 2015, Rodríguez *et ál.* 2018, Velásquez *et ál.* 2019). La eficiencia térmica del proceso es mayor en la medida que se aumenta el % de extracción en peso del jugo de la caña, se reduce la humedad de bagazo y el contenido de fibra en caña sea alto (Durán Castro 2010).

En los trapiches de producción artesanal, la hornilla panelera cuenta con una cámara de combustión y el área de transferencia de calor está justo encima de la llama, donde se ubican las pailas o contenedores del jugo. Con el fin de mejorar la eficiencia energética a nivel nacional, desde hace un poco más de tres décadas, el CIMPA en Colombia, propuso nuevos diseños de cámaras de combustión, pailas, parrillas y sistemas de aislamiento así como ductos para las chimeneas. Así mismo, la FAO desde el año 2004 ha promovido estas iniciativas (Rodríguez y Gottret 2000, García 2004, FAO 2004, García *et ál.* 2011, Guerrero y Escobar 2015).

Existen diferentes trabajos (Solano y Cifuentes 2004, Velásquez *et ál.* 2006, García *et ál.* 2011), donde se han realizado mediciones energéticas así como modificaciones tecnológicas en hornillas paneleras, encontrándose que: i) La baja eficiencia energética se debe principalmente a la evaporación abierta, que desaprovecha el vapor que sale de las pailas (79 kg de agua por cada 100 kg de jugo), el cual trasmite a la atmósfera un calor cercano a 179.330 kJ/100 kg de jugo (García *et ál.* 2011). ii) El consumo de combustible es de 0,6 kg de leña-llanta por kg de panela en hornillas tradicionales vs 0,1 kg leña/kg de panela en hornillas CIMPA (Solano y Cifuentes 2004). iii) La eficiencia térmica de las hornillas oscila entre el 15 y 30%, las pérdidas por chimenea son del 30%; la temperatura de salida de los gases de combustión está entre 450 y 700°C; los porcentajes de exceso de aire son menores del 20% o mayores del 100%; la formación de CO alcanza un valor promedio de 10% y las pérdidas por las paredes son del 7% (Velásquez *et ál.* 2006).

De acuerdo con Rodríguez *et ál.* (2018), las principales diferencias en cuanto a la eficiencia térmica de los procesos tradicionales versus los tecnificados, se presentan en la combustión y evaporación. En las otras etapas, la clarificación, concentración, molienda y caldera, los equipos y método utilizado son muy similares en las dos tecnologías. Estos autores, evaluaron siete tecnologías diferentes para la producción de panela, encontrando que la mayor eficiencia térmica global se da en sistemas de evaporación cerrada de efecto múltiple en trapiches tecnificados, donde se alcanza una eficiencia del 63%; se requiere menos combustible y por ende se disminuye el impacto ambiental (Rodríguez *et ál.* 2018).

La tecnología de evaporación cerrada múltiple efecto, difiere de la tecnología a vapor abierta, en la temperatura de evaporación, que disminuye por el efecto de vacío en los cuerpos evaporadores lo cual implica un gran ahorro energético. Adicionalmente se aprovecha el vapor latente de un efecto a otro. Según López Zaraza (2016), la cantidad de gases de combustión generados por unidad de bagazo quemado, es igual en la tecnología de vapor abierta y en la de evaporación cerrada. En su estudio, para una capacidad de producción de 225 kg panela/h encontró el indicador 0,148 kW/kg panela y 9,88 lb vapor/kg panela (López Zaraza 2016).

Según Guerrero y Escobar (2015), las operaciones críticas del proceso son la evaporación, concentración y punteo de las mieles. A su vez, la instalación de un tándem de molinos, mejora la extracción de jugos y la automatización del suministro de bagazo mejora la combustión. Por lo cual, la tecnificación de los trapiches resulta imperativa desde el punto de vista de su eficiencia técnica (Guerrero y Escobar 2015).

Por otra parte Gutiérrez Mosquera *et ál.* (2018), indican que es necesario estudiar a profundidad la transferencia de calor del proceso, con el fin de diseñar las mejoras más adecuadas desde el punto de vista técnico favoreciendo la calidad del producto y sus derivados. También advierten que muchas propuestas de reconversión tecnológica requieren energía eléctrica de calidad en las instalaciones y su implementación puede resultar costosa (Gutiérrez-Mosquera *et ál.* 2018).

En un caso de estudio en el Valle del Cauca, Vélez Peña *et ál.* (2016), mediante la aplicación de las herramientas del modelo MGIE, estimaron un potencial global de ahorro energético de 81.970 kWh/año mediante reducción de la variabilidad operacional, de la planeación de la producción y de la mejora de la capacidad técnica-organizativa de la empresa. Adicionalmente, se encontró que en promedio el indicador de consumo de bagazo en caldera es de 1,6-1,8 kg bagazo/kg de panela, con una eficiencia del 50% en términos de consumo de combustible (Vélez Peña *et ál.* 2016).

Por otro lado, en la India la producción de “jaggery” es típicamente una actividad rural de pequeña escala, que enfrenta desafíos en su mejoramiento productivo, financiero y especialmente en términos de su eficiencia energética (Sardeshpande *et ál.* 2010). Los procesos tradicionales de producción, ante la insuficiencia de bagazo, emplean algodón y otras biomásas de la soya como combustible adicional para la generación de energía térmica del proceso, incluso se ha encontrado el uso de llantas usadas lo cual representa un aumento en los costos de producción. En cuanto al consumo de bagazo se reporta el indicador de 2,39 kg/kg de panela (Sardeshpande *et ál.* 2010, Shiralkar *et ál.* 2014).

Para diferentes autores, la eficiencia térmica en la producción tradicional de *jaggery* en India es muy baja, y el costo del bagazo es una tercera parte de lo que cuestan otros tipos de combustibles, por lo cual su disponibilidad desempeña un rol importante en el desarrollo económico de las zonas rurales de la India, donde 2,5 millones de personas viven de esta actividad (Shiralkar *et ál.* 2014, Jakkamputi y Mandapati 2016, Kumar y Kumar 2018).

Sardeshpan *et ál.* (2010), mediante balances de materia y energía evaluaron las pérdidas

energéticas en hornillas paneleras tradicionales. Encontraron que el gasto de energía teórico requerido por el proceso es únicamente el 29% de la energía total provista por la combustión del bagazo. Las pérdidas principales se presentan en el flujo de calor que se disipa al ambiente en los gases de chimenea y las pérdidas en las paredes de la hornilla. Adicionalmente demostraron que controlando el oxígeno durante la combustión, se logra reducir el indicador de consumo de 2,39 kg de bagazo/kg de panela a 1,73 kg de bagazo/kg panela (Sardeshpande *et ál.* 2010).

Shiralkar *et ál.* (2014) encontraron que el exceso de aire disminuye la temperatura de la combustión y reduce la tasa de transferencia de calor a los jugos. Su disminución es una estrategia para incrementar la eficiencia en la utilización del bagazo cerca del 46%. A su vez, estos autores indican los usos potenciales de este y de su actual bajo costo; no obstante mencionan que dado que no se considera un *comodity*, los productores no se preocupan por la eficiencia energética de sus procesos ni por el impacto ambiental derivado de la utilización de combustibles adicionales (Shiralkar *et ál.* 2014).

De acuerdo con Kumar y Kumar (2018), a pesar de que se ha demostrado la posibilidad de mejorar la transferencia de calor, modificando la configuración de las pailas de las hornillas tradicionales, esto no representa un mejoramiento significativo del consumo de bagazo en el proceso; es sólo un esfuerzo por alcanzar una producción eficiente. La escasa infraestructura dificulta los procesos de comercialización y exportación, así como los bajos precios para los distribuidores y el *marketing*. Según estos autores, los cambios estructurales o "mejoras" en los sistemas tradicionales de producción, pueden sugerir la necesidad del establecimiento de plantas de producción de mayor escala, las cuales podrían resultar económicamente viables y rentables para empresarios, campesinos y clientes (Kumar y Kumar 2018).

4.4. Nuevos paradigmas de la investigación en panela

Estudios recientes (Rodríguez *et ál.* 2018 y Velásquez *et ál.* 2019), tratan sobre la presencia de un compuesto pre-cancerígeno denominado "acrilamida", el cual se forma a altas temperaturas de concentración de las mieles para elaboración de panela (115-125°C); así que concentrar las mieles a menor temperatura, es el reto para evitar la formación de este. Una posible solución es empacar al vacío la miel y comercializarla como panela líquida, lo cual significa incurrir en transformaciones tecnológicas del proceso y mayor investigación en esta materia (Rodríguez *et ál.* 2018, Velásquez *et ál.* 2019).

De acuerdo con Velásquez *et ál.* (2019) y Jaffé (2015), la panela es un producto rico en propiedades alimenticias, medicinales y útil como bioinsumo o materia prima de otros productos con valor agregado. En sus revisión, estos autores visibilizan y promueven su consumo a nivel internacional, y lo consideran promisorio desde el punto de vista alimenticio. Sin embargo, su calidad y seguridad depende de distintas variables del proceso sobre las cuales generalmente no

se tiene control, como consecuencia de las características de producción, que dependen esencialmente de conocimientos empíricos y artesanales (Jaffé 2015, Velásquez *et ál.* 2019).

Por su parte, Guerrero y Escobar (2015) mencionan que la baja tecnificación del proceso tradicional de producción de panela en Colombia, no facilita la estandarización e incide directamente en la rentabilidad, la trazabilidad y calidad del producto final imponiendo retos a su sostenibilidad. Por lo anterior lo califican poco eficiente técnica y ambientalmente y señalan además, que los principales impactos ambientales se deben al agotamiento de los recursos naturales por el uso de madera, agua y a la generación de residuos contaminantes que no se aprovechan como gases, cenizas y lodos. Finalmente, proponen automatizar el suministro de recursos e implementar una gestión integral de los residuos (Guerrero y Escobar 2015).

Diferentes autores a nivel mundial como Jakkamputi y Mandapati (2016), Kumar y Kumar (2018), Venkata Sai y Reddy (2020), sugieren que los gobiernos y los investigadores deben promover el uso de energía solar para precalentar los jugos en el proceso de producción de panela, como estrategia para mejorar la eficiencia térmica global, así como el impacto ambiental por reducción de emisiones y con el fin de mejorar la rentabilidad (Jakkamputi y Mandapati 2016, Kumar y Kumar 2018, Venkata Sai y Reddy 2020).

Venkata Sai y Reddy (2020), mediante la instalación de un sistema con energía solar, demostraron una reducción del 71% en el gasto de energía total del proceso de pequeña escala y un retorno de inversión de 13 años (Venkata Sai y Reddy 2020). También se ha demostrado que el contenido de humedad inicial del bagazo (entre 40-50%), puede reducirse al 8-10% secándolo al sol en áreas abiertas (Jakkamputi y Mandapati 2016).

Por otro lado, Requier-Desjardins y Rodríguez-Borray (2004), introducen el concepto de Capital Natural Crítico (CNC) en su estudio del impacto ambiental de los sistemas de producción tradicional de panela, indicando la importancia de preguntarse si el enfoque más adecuado para abordar este tema, es el que plantea la economía ambiental o si por el contrario debería ser el enfoque de la economía ecológica el que debe trazar el conducto regular para contrarrestar dichos impactos. También se preguntan si el nivel local, al cual se desarrolla la actividad panelera en Colombia, podría representar una restricción al concepto de CNC al involucrar la dimensión geográfica con variables de tipo social que únicamente tiene sentido en ese contexto socio-económico (Requier-Desjardins y Rodríguez-Borray 2004).

La economía ambiental neoclásica considera que los sistemas económicos son el centro del debate, los recursos ambientales son ilimitados, la tecnología lo arregla todo y monetizar arregla los problemas de sostenibilidad (Figura 2).

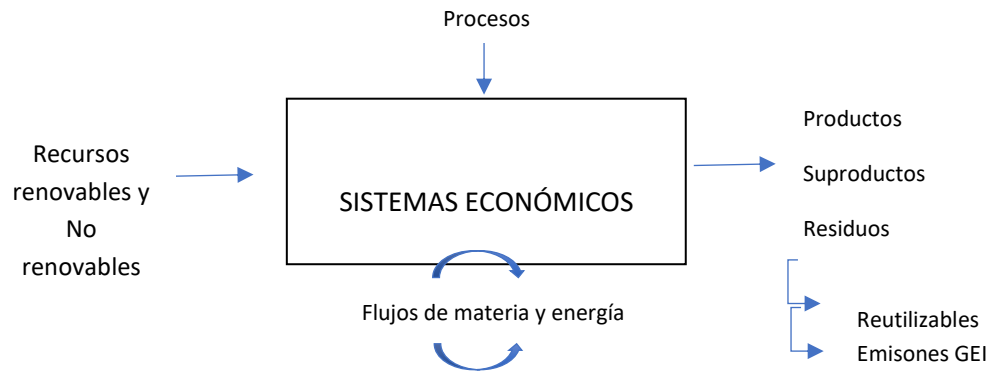


Figura 2. Enfoque de la economía ambiental neoclásica

Fuente: La elaboración de la figura se realizó con base en la explicación presencial del Dr. Gonzalo Rodríguez Borray, coautor del estudio citado.

Por su parte, según se ilustra en la Figura 3, la economía ecológica afirma que el subsistema económico depende de los recursos finitos de la biósfera y que existen parámetros no monetarios para definir esa sostenibilidad. Por tanto los precios son un tema coyuntural, mientras que lo ecológico no (Requier-Desjardins y Rodríguez-Borray 2004).

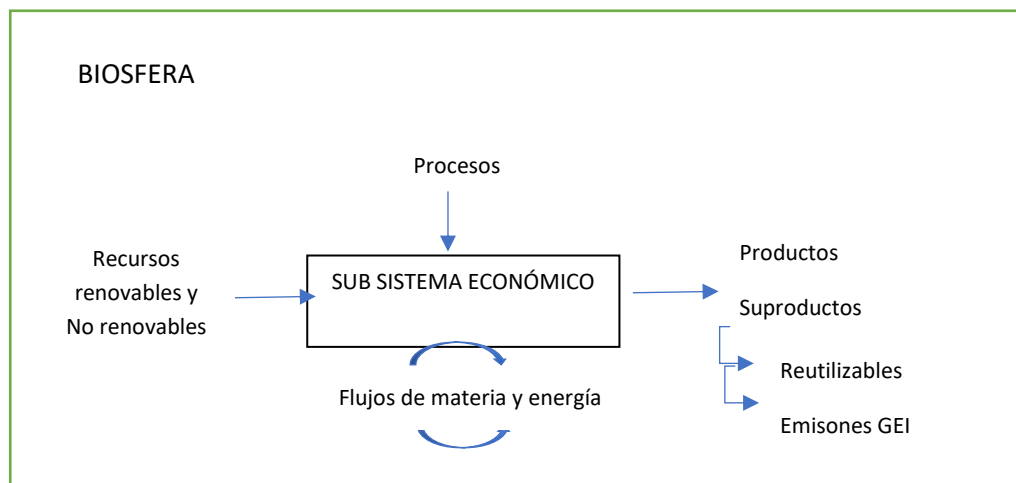


Figura 3 Enfoque de la Economía Ecológica

Fuente: La elaboración de la figura se realizó con base en la explicación presencial del Dr. Gonzalo Rodríguez Borray, coautor del estudio citado.

5. METODOLOGÍA

5.1. Área de estudio

La fase de campo se desarrolló en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, ubicado en un territorio que va desde la costa del Pacífico y continúa hacia el oriente, pasando la Cordillera Occidental y el valle del río Cauca, hasta la Cordillera Central con 22.195 km². La Figura 4 presenta la localización geográfica de este departamento y la ubicación de los casos de estudio.

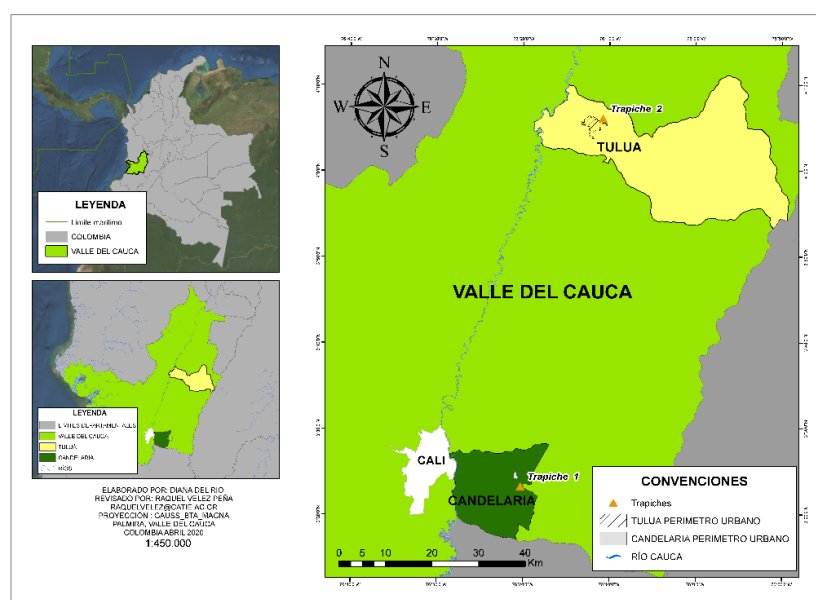


Figura 4. Localización geográfica del Valle del Cauca, Colombia

De acuerdo con cifras del Fedepanela, en Colombia cerca de 366 trapiches se encuentran en el departamento del Valle del Cauca. Sin embargo, para efectos de la presente investigación se tomó como población objeto de estudio 12 de ellos que están ubicados en la zona plana.

En estos trapiches la topografía ha facilitado el acceso a tecnologías, permitiendo el mejoramiento de su infraestructura. Además, han mejorado sustancialmente las capacidades de producción, así como la eficiencia energética de los procesos y cuentan con registros históricos que facilitan los análisis propuestos en la presente metodología.

De estos 12 trapiches se seleccionaron dos casos por referencias, uno ubicado en el municipio de Candelaria al sur del departamento (identificado como **T1**) y el otro localizado al norte, en el municipio de Tuluá (**T2**). Se definió como límites del sistema, desde la llegada de la caña al trapiche hasta la salida de panela de la fábrica.

5.2 Etapas de la investigación

La investigación se desarrolló en tres etapas, como se ilustra en la Figura 5.



Figura 5. Etapas de desarrollo de la investigación

5.2.1. Etapa I: Selección de casos de estudio

En esta primera etapa se realizó una revisión de literatura utilizando la documentación disponible en la Biblioteca Conmemorativa Orton, así como los accesos a recursos electrónicos y bases de datos. También se consultó el material bibliográfico relacionado con el tema de estudio del repositorio institucional de instituciones como AGROSAVIA, Cenicaña, CIAT, FAO, Minagricultura y SINAB.

Se definió a los 12 grandes trapiches paneleros ubicados en la zona plana del Valle del Cauca como la población objetivo, dado que presentan niveles de organización de figuras empresariales lo cual permite la implementación de sistemas de gestión de calidad, ambiental y de la energía, facilitando el procedimiento de caracterización energética del presente estudio.

Las características de interés para la selección de las empresas fueron:

- ✓ Localización geográfica en la zona plana del Valle del Cauca uno al norte y otro al sur
- ✓ Tamaño-volumen de producción kg/h
- ✓ Tiempo de dedicación a la actividad
- ✓ Materia prima y que procesen únicamente la cantidad de caña de azúcar autorizada por la Ley 40 de 1990 (menos de 10 t/ hora).
- ✓ Posibilidad de contraste en tecnologías (evaporación abierta vs cerrada)

Se definió en conjunto con el director regional de Fedepanela, los posibles trapiches a ser estudiados y se preparó una carta firmada por el director de tesis destinada a siete de ellos. La meta inicial acordada para la realización de la investigación fue de tres casos de estudio. Sin embargo, dado el carácter confidencial de la información requerida por parte de las empresas,

finalmente mediante el método de cadena de recomendación⁷, se consiguió la efectiva participación de dos de ellos, los cuales se denominaron T1 en el caso del trapiche 1 y T2 en el caso del trapiche 2.

5.2.2 Etapa II: Materiales y métodos

Con el fin de diagnosticar el comportamiento de cada trapiche en relación al uso y administración de la energía en sus procesos, se emplearon las herramientas⁸ propuestas por UPME *et ál.* (2006) y Campos *et ál.* (2008). Se realizaron entrevistas semiestructuradas a los subgerentes, técnicos y expertos en las oficinas de cada empresa y se aplicó una encuesta adaptada con base en la propuesta metodológica, la cual se presenta la sección de anexos. La encuesta diseñada sirve para efectuar la caracterización energética, ambiental y económica de un trapiche panelero y se divide en cinco aspectos: i) Datos generales de la empresa; ii) Organización de la planta; iii) Proceso productivo; iv) Diagnóstico ambiental y v) Diagnóstico asociado al consumo energético incluyendo información financiera.

Se utilizó el *software* de caracterización energética especializado UPME *et ál.* (2006), para establecer los ahorros potenciales tanto energéticos como económicos. El análisis se hizo partiendo de registros históricos mensuales de consumo de electricidad vs producción en toneladas de panela para el periodo 2016-2017 y 2018-2019. Para verificar la relación que existe entre estas dos variables y analizar el ajuste del modelo, se utilizó InfoStat para correr las regresiones lineales y determinar las líneas base y meta.

Posteriormente, se programaron visitas de trabajo a las plantas de producción y se realizaron recorridos para observar las tecnologías presentes, identificar puntos de fugas, precisar los usos de la energía y entender como las rutinas operativas impactan el consumo.

Adicionalmente se realizaron balances de materia y energía para cada año con el fin de cuantificar la generación de productos, subproductos y residuos de los procesos y estimar el impacto en los ingresos. También se calculó la eficiencia térmica global de cada proceso.

Finalmente, se realizó un análisis financiero utilizando información confidencial del estado de resultados de ambas empresas. Para acceder a estos datos se siguió el protocolo de consentimiento informado. Se calculó el valor actual neto (VAN), la relación beneficio/costo (B/C) y se realizó un análisis de sensibilidad para analizar como varía el VAN a partir de los ingresos, los costos y los gastos (Gittinger 1982). El análisis de sensibilidad se realizó utilizando la herramienta Excel de Microsoft Office.

⁷ Esta metodología también se conoce con el nombre de “bola de nieve”, y hace parte de los tipos de muestreo no probabilístico característicos de trabajos de investigación cualitativa.

⁸ Diagrama energético productivo de la empresa; censo de carga; diagrama de Pareto y estratificación; diagrama energía - producción vs tiempo; diagrama energía vs producción; diagrama IC vs producción; gráfico de tendencia del consumo energético (UPME *et ál.* 2006, Campos *et ál.* 2008).

5.2.3. Etapa III: Análisis de la información

El primer paso fue la transcripción de los datos tomados en campo, de las encuestas y entrevistas. Posteriormente se realizó una revisión conjunta del reporte inicial por parte de informantes clave. Una vez validados los datos se procedió con los análisis, los cuales se dividieron en dos periodos: 2016 - 2017 y 2018 - 2019. Los resultados del análisis del año 2016 y el el 2017 se denominó período I y el análisis de los años 2018 y 2019, período II.

La estimación de los ahorros potenciales tanto energéticos como económicos, se realizaron mediante análisis de correlación entre la energía eléctrica (expresada en kWh mensuales) y la producción (en toneladas de panela). Se utilizó la regresión lineal como método estadístico para determinar el porcentaje de energía que no está asociada a los volúmenes de producción para cada período analizado. El objetivo es reducir este porcentaje de energía eléctrica mediante mejores prácticas operativas y así alcanzar el ahorro propuesto.

En lo referente a los estados de resultados, los ingresos se consideraron como el 100% y los costos, gastos, EBITDA y utilidad neta se consideraron como porcentajes integrales de esos ingresos. Los datos obtenidos corresponden al número de cajas vendidas y los precios unitarios por caja; se trabajó a precios constantes. El período analizado fueron los años 2016, 2017, 2018 y 2019, tomándose para efectos del análisis de forma acumulada. En cuanto al valor actual neto (VAN), la relación B/C y el análisis de sensibilidad, los resultados se presentan en términos de +1 (para proyectos viables) y -1 (para proyectos no viables). La tasa de descuento aplicada fue del 10%.

6. RESULTADOS

6.1. Caracterización del proceso de producción

El proceso de producción se dividió en cinco etapas: i) la molienda de la caña, la cual se realiza en un tándem de tres molinos eléctricos que operan a 440 voltios accionados por un operario; ii) la limpieza y clarificación del jugo; iii) la evaporación del jugo clarificado; iv) la concentración del jugo en mieles hasta el punto de panela y v) el empaque y comercialización del producto terminado. Para ambos casos de estudio, la dinámica de trabajo consistió (por lo general), en dos turnos de molienda de caña (12 horas cada uno) y un turno diurno de producción de panela (12 horas), quedando remanentes de mieles de un día para otro. En la Figura 6 se presenta el diagrama de flujo del proceso tecnificado a vapor característico de los casos de estudio.

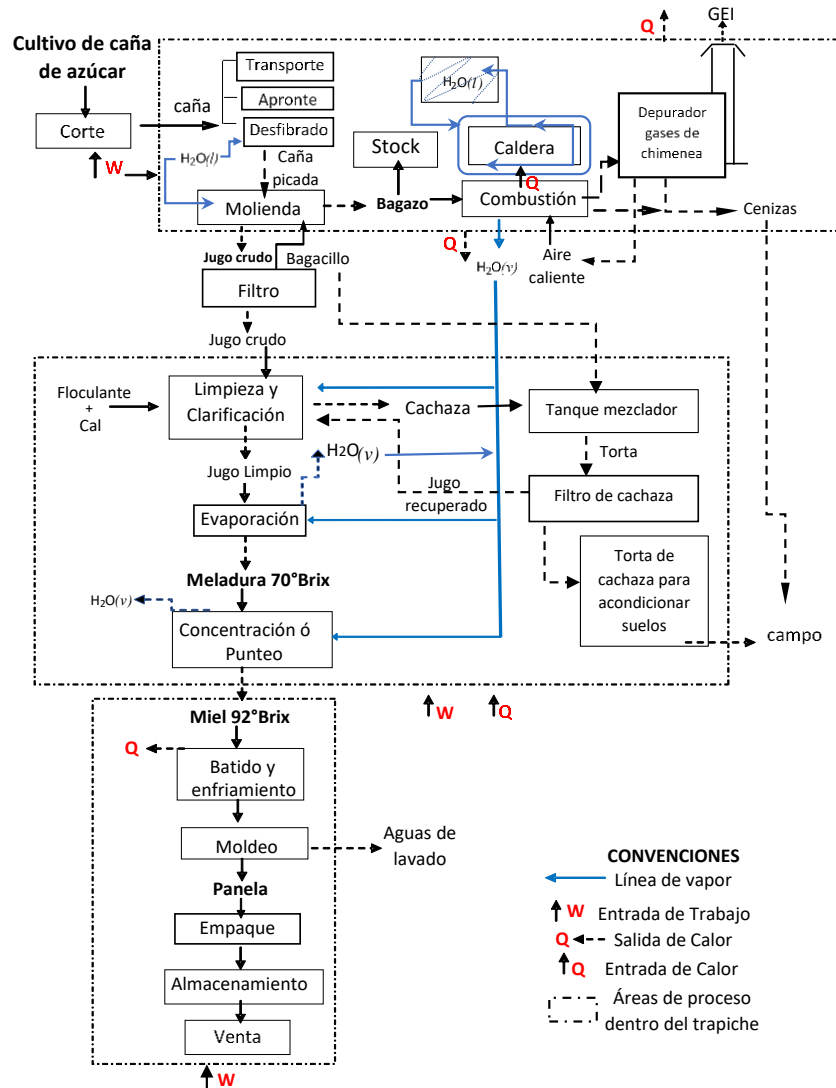


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de panela con tecnología vapor seguido en dos trapiches paneleros del Valle del Cauca, Colombia

Fuente: Adaptado de Vélez Peña *et ál.* 2016

Como resultado de la molienda se obtiene el jugo crudo de caña o “guarapo” y como residuo el bagazo. Para aumentar aún más la extracción de sacarosa de la caña, se adiciona un porcentaje de agua caliente a la salida del primero y el segundo molino, proceso conocido como maceración e imbibición. El barro y materiales extraños en los jugos (impurezas flotantes), se retiran mediante filtrado y los residuos disueltos conocidos como “cachaza” se separan por medio del calor por decantación con la ayuda de floculantes naturales y, en menor proporción, de coadyudantes sintéticos.

El bagazo resultante contiene un porcentaje de humedad y es transportado por bandas conductoras hasta los hornos de las calderas para su combustión y generación de vapor. En el Cuadro 3 se presentan los indicadores de proceso clave para cada caso.

Cuadro 3. Indicadores productivos clave en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia

Indicadores clave de proceso	Caso	
	T1	T2
t caña/ha-año (TCH)*	120	130
Molienda (t caña /h)	7-9	5
kg bagazo/kg panela	1,3-1,8	2,8
kg carbón/kg panela	-	0,28
kg panela/t caña	120-125	127-132
kg panela/h	> 1.000	>1.000
Extracción en peso (%)	70,5	70,5 ⁹
Fibra bagazo (%)**	12-14	13-15
Extracción jugo crudo (%)	73	75-80
Humedad bagazo (%)	50	54
Agua maceración (%)***	37	30
Cachaza (%)	1,5	1,5

*Al norte del Valle se presentan rendimientos agronómicos más eficientes gracias a factores geográficos dados por su localización.

** Depende de la variedad de la caña.

***Difusión o maceración: % de agua adicional a alta temperatura con base al peso del jugo crudo para lixiviación e imbibición (caña desfibrada y bagazo fresco respectivamente) con el fin de mejorar % extracción de jugo.

Se encontró que las instalaciones para el procesamiento de la caña de azúcar, una vez esta llega al trapiche hasta la obtención de la panela, se diferencian de un caso a otro principalmente en la etapa de filtrado del jugo y evaporación. Para el caso de T1, esta última etapa, se realiza de forma cerrada aprovechando el calor latente de vaporización del agua, mientras que en el T2 se realiza a presión atmosférica. Las principales diferencias entre los casos se presentan en el Cuadro 4.

⁹ *Compensamos la extracción en molinos con un operario en molino dos y tres que repasa la caña simulando cinco molinos*”(conversación subgerente T2).

Cuadro 4. Comparación de las instalaciones de producción en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia

Etapa del proceso	Caso	
	T1	T2
Molienda		
Descargue de caña	Grúa estática-hilo	Brazo hidráulico
Mesa de caña	sí	no
Picadoras	sí	no
Desfibradoras	sí	no
Conductores de caña y bagazo	5	4
Tándem de molinos	3 de tres mazas c/u	2 de cuatro mazas, 1 de dos mazas
Caldera	Una acua-tubular y una piro tubular	Una mixta
Panelería	T1	T2
Filtro de guarapo	DSM	Malla manual
Limpieza y clarificación	4 contenedores donde se adiciona cal para estabilizar el pH del jugo y floculante natural de balso	2 contenedores donde se adiciona cal para estabilizar el pH del jugo y floculante sintético y guácimo
Filtro de cachaza	sí	sí
Evaporación	Quíntuple efecto al vacío 25 psi. La miel entra a 18°Brix y sale a 68° Brix	1 evaporador abierto donde la miel entra a 50°Brix y sale a 60° Brix
Concentración	4 tachos donde la miel sube de 68°Brix a 92° Brix a presión atmosférica	8 tachos que llevan la miel a 93° Brix a presión atmosférica
Batido, moldeo y enfriamiento	Recuperan aguas de lavado de moldes, condensados y agua utilizada para generar vacío en evaporadores. Reprocesan pedazos sobrantes de panela	Recuperan aguas de lavado de moldes y reprocesan pedazos sobrantes de panela

6.1.1. Balances de materia y energía globales

En el Cuadro 5 se presenta el resumen de los volúmenes de producción por período analizado. Las figuras 7-10 ilustran los balances de masa y energía globales de proceso. Para este fin se utilizó los datos mensuales promedio por período y se mantuvieron constantes los indicadores clave de proceso del Cuadro 3.

Cuadro 5. Resumen de volúmenes de producción en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia

	T1		T2	
	Período I	Período II	Período I	Período II
Producción	Unidad de producción: toneladas de panela (t/mes)			
Mínima	353	233	186	185
Máxima	627	350	295	318
Promedio	473	278	239	246

Periodo I: 2016-2017 y periodo II: 2018-2019

Para el período II, T1 redujo su volumen de producción cerca del 50%

Base de cálculo: masa de caña en toneladas promedio mensual $\dot{m}_c = t/mes$

Ecuación 1. % Extracción del molino o en peso

$$EM = 70,5\%$$

Ecuación 2. Flujo másico de jugo crudo o guarapo

$$\dot{m}_{jc} = \frac{\dot{m}_c (\% EM)}{100}$$

Ecuación 3. Flujo másico de cachaza

$$CH = \dot{m}_{jc} \times 1,5\%$$

Ecuación 4. Volumen de agua maceración

$$v_{H_2O} = \dot{m}_{jc} \times \%^{10}$$

Ecuación 5. Flujo másico de bagazo

$$\dot{m}_{bagazo} = \dot{m}_c - \dot{m}_{jc}$$

Ecuación 6. Energía del combustible

$$Q_c = \dot{m}_{combustible} \times PCI$$

¹⁰ El porcentaje de agua varía en cada caso y se presenta en el Cuadro 3

Donde: Q_c es la energía disponible entregada por el combustible; \dot{m} es el flujo de combustible utilizado y PCI es el poder calorífico a la humedad con la que es utilizado en cada caso (ver Cuadro 3).

En cuanto al uso de combustibles, T1 utiliza 90% bagazo con un PCI de 8141 kJ/ kg y 10% y eventualmente leña. Por su parte T2¹¹ utiliza 10% carbón con un PCI 22.795 kJ/ kg y 90% de bagazo con un PCI de 8024,7 kJ/kg.

Las calderas cuentan con un sistema de inyección de aire caliente. La presión de operación promedio es de 120 Psi. La energía entregada por la caldera corresponde en la mayoría de los casos a la energía aportada por el combustible, la cual se evalúa de acuerdo con la expresión:

Ecuación 7. Potencia de la caldera

$$Q = \dot{m} \text{ combustible} \times PCI \times \eta$$

Donde: η es la eficiencia de la caldera

De la ecuación 7 se calculó el vapor generado por las calderas considerando la siguiente expresión:

Ecuación 8. Vapor generado en calderas

$$v_{H_2O} = Q \times F_e$$

Donde: F_e , es el factor de evaporación a presión atmosférica para el Valle del Cauca (34,5 lbv h/ BHP) (Gallardo García 2017).

La eficiencia térmica global (EE) estimada para T1, fue del 80%; mientras que para T2 fue del 43%. Las ecuaciones para el cálculo se presentan a continuación:

Ecuación 9. Eficiencia térmica global

$$EE = \frac{\text{Energía utilizada } (Q_u)}{\text{Energía disponible } (Q_c)} \times 100$$

Donde: Q_u es la energía utilizada para evaporar el agua en la caldera y tiene que ver con el calor latente y sensible, de acuerdo con la ecuación 10. Q_c es la energía disponible de acuerdo a la ecuación 6.

Ecuación 10. Energía utilizada

$$Q_u = Q_{latente} + Q_{sensible}$$

¹¹ “Tenemos muchos cuellos de botella, como por ejemplo la evaporación abierta que demora más el proceso de concentración ocasionando paradas porque nos llenamos de jugo o de miel. La eficiencia de la caldera y la operación de molinos que funcionan al 60% de la capacidad instalada”. “La producción se ha visto afectada por el mercado lo cual ha modificado los horarios de trabajo y los turnos, ya que en ocasiones trabajar los fines de semana por ejemplo genera pérdidas” (Conversación subgerente T2).

Ecuación 11. Calor latente de vaporización

$$Q_{latente} = h_{fg} * m \frac{vapor}{h}$$

Ecuación 12. Calor sensible

$$Q_{sensible} = C_p H_2O * \frac{m H_2O}{h} * \Delta T$$

Para el cálculo de los gases de chimenea se utilizó los indicadores del Cuadro 6.

Cuadro 6. Indicadores para calcular GEI por kg de panela para tecnología de evaporación cerrada (T1) y abierta (T2).

Índice kg/kg panela producida		
	T1	T2
CO ₂	1,687	2,85
CO	0,071	0,12
O ₂	1,231	2,08
N ₂	7,813	13,2
H ₂ O	1,249	2,11

Fuente: Adaptado de López Zaraza 2016:101-102

Balances de masa y energía global del trapiche T1

Datos promedio período I (2016-2017):

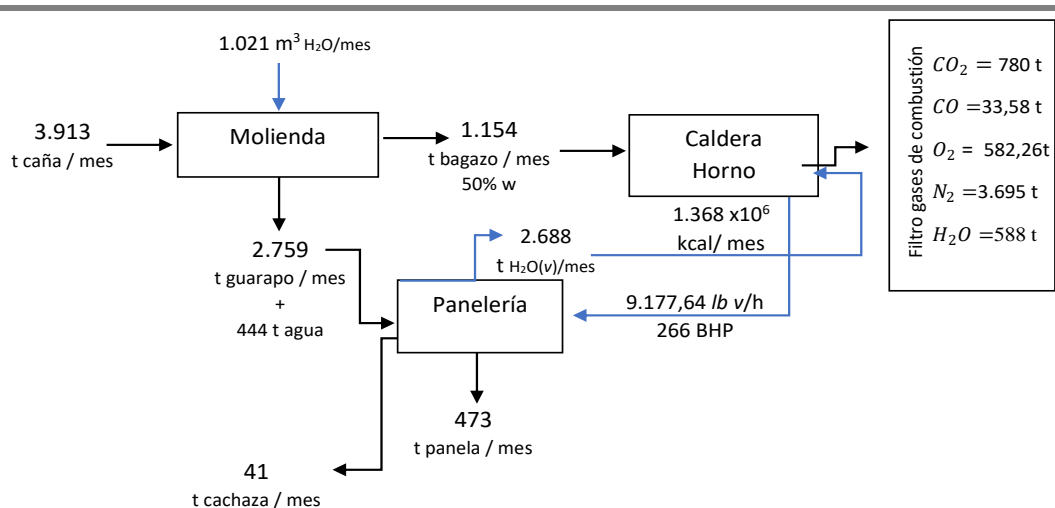


Figura 7. Balances de masa y energía global del trapiche T1 durante el periodo PI (2016-2017), Valle del Cauca, Colombia

Datos promedio período II (2018-2019):

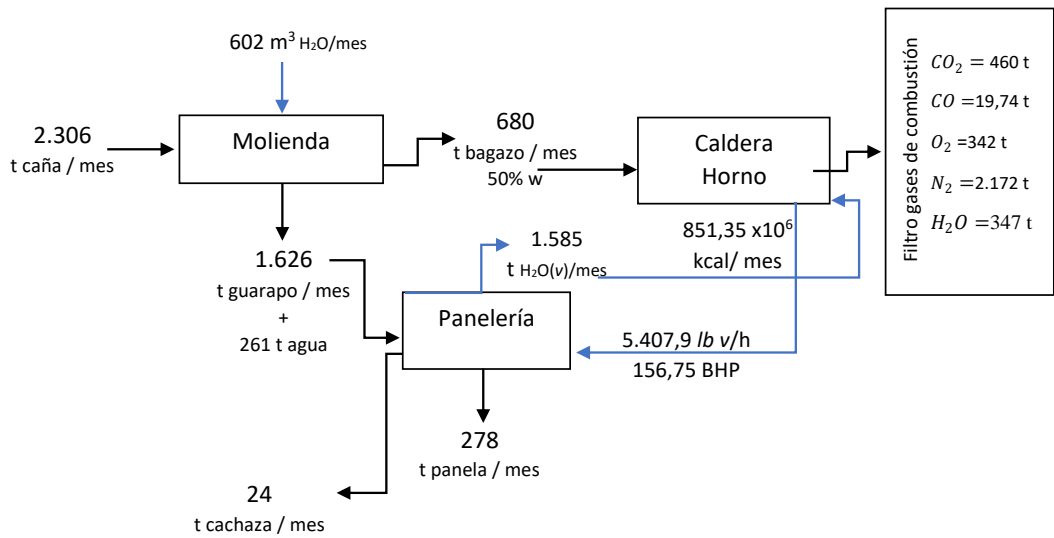


Figura 8. Balances de masa y energía global del trapiche T1 durante el periodo PII (2018-2019), Valle del Cauca, Colombia

Balances de masa y energía global del trapiche T2

Datos promedio período I (2016-2017):

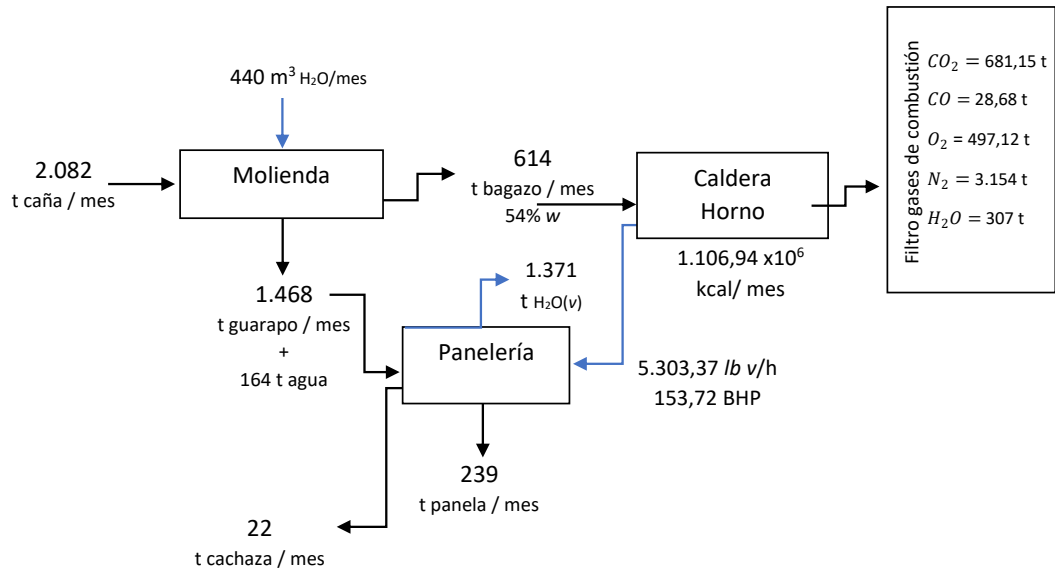


Figura 9. Balances de masa y energía global del trapiche T2 durante el periodo PI (2016-2017), Valle del Cauca, Colombia

Datos promedio período II (2018-2019):

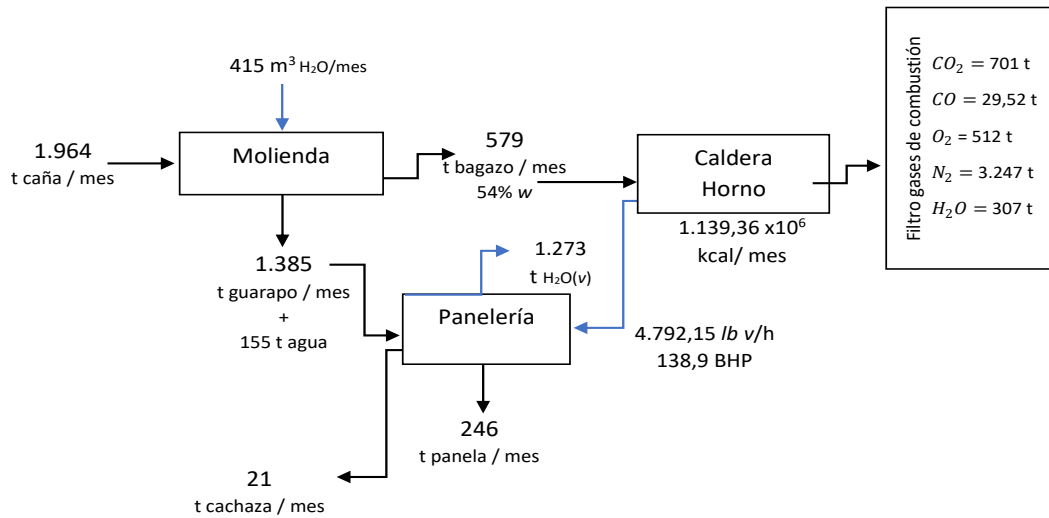


Figura 10. Balances de masa y energía global del trapiche T2 durante el periodo PII (2018-2019), Valle del Cauca, Colombia

6.2. Caracterización de la eficiencia energética y la gestión ambiental

Se encontró que, ambos casos realizan gestión de sus residuos, según se presenta en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Caracterización de la gestión ambiental en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia

Pregunta:	T1	T2
¿La empresa hace manejo, tratamiento y/o disposición final de los residuos generados? ¿Por qué?	Si Para cumplir con la normativa sanitaria y ambiental y ahorrar recursos.	Si Para cumplir con la normativa sanitaria y ambiental y ahorrar recursos.
Efluentes líquidos	No posee permiso de vertimientos ni PTAR ¹² .	Cuenta con PTAR y permiso de vertimientos.
Residuos sólidos	Bodega para separación en la fuente de plásticos, vidrios, papel y cartón.	Bodega de separación. "Tenemos tres aprovechables: cachaza, ceniza y bagazo".
Emisiones atmosféricas	Cumple con la normativa ambiental, gracias a la instalación de un filtro electrostático (ciclón) en la chimenea de la caldera.	A pesar del impacto atmosférico por el uso de carbón, cumplen con la norma de emisiones porque tienen dos ciclones.

¹² Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

El proceso de producción libera vapor a la atmósfera. En el caso del trapiche 1, parte de ese vapor es condensado y recirculado al proceso y se emplea para generar vacío en los cuerpos de evaporación múltiple que operan con este sistema.

Respecto a los efluentes líquidos generados (aguas residuales), se generan en su mayoría como resultado de los procesos de lavado de equipos, aseo y desinfección. Estas aguas de lavado o “aguas dulces”, están constituidos principalmente por sacarosa, grasas, bagacillo y materiales residuales de los procesos de aseo de equipos al interior de la fábrica tales como hidróxido de sodio ó soda cáustica (NaOH). Estas empresas están obligadas a tener un permiso ambiental de vertimientos y deben contar con un sistema de tratamiento.

Durante la semana se generan pedazos sobrantes de panela y aguas dulces resultantes de rutinas de limpieza de los utensilios de trabajo (canastillas, remellones, cocos, palos, moldes), al interior de la zona de procesamiento de mieles (panelería). Estos residuos se acostumbra aprovecharlos reintegrándolos al proceso. La pérdida de sacarosa en los efluentes líquidos aumenta la carga orgánica de estos y representa una disminución de ingresos para el negocio de producción de panela.

Uno de los “tres aprovechables” mencionados por T2, es la cachaza, otra fuente adicional de recuperación de sacarosa. Se encontró que ambos casos cuentan con filtro de cachaza¹³, un equipo adaptado de la industria azucarera y diseñado especialmente para las capacidades de cada uno de los trapiches estudiados. Se encontró que gracias a la operación del filtro se recuperan entre 2 y 3 kg de panela por tonelada de caña.

En términos de la gestión de la eficiencia energética, se evidenció que ambos casos consideran con un grado alto de importancia, el monitoreo de distintas variables como se muestra en el Cuadro 8. También se encontraron diferencias en términos de proyectos de optimización energética, directamente relacionados con inversiones de capital.

Cuadro 8. Caracterización de variables y proyectos de optimización energética de dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia

	T1	T2	Grado de importancia		
¿Qué tipo de variables se pueden monitorear para gestionar la eficiencia energética del proceso?					
Variables	Descripción		Bajo	Medio	Alto
De proceso	Preparación y molienda de la caña	Continuidad del requerimiento de vapor y funcionamiento de la caldera			X

¹³Consiste en un tambor rotatorio que por efecto de vacío succiona la cachaza y la filtra absorbiendo el jugo o sacarosa y reteniendo la fracción sólida (Durán Castro 2010).

De operación	Limpieza y concentración de jugos y funcionamiento de la caldera	Dosificación de bagazo y carbón en caldera		X	X
Mantenimiento	Cambio de aceite transformadores	Variadores de velocidad arranque de motores-molinos			X
Ambientales	Variedades de caña por el contenido de fibra del bagazo				X
¿Qué proyectos de optimización energética ha implementado la empresa?					
T1: Instalación de variadores de velocidad en los tres motores de los molinos y las dos picadoras. Compra de motor de alta eficiencia (ahorro de 20-21%) para el molino 1. Aumentar el área de evaporación cinco efectos. Diseño de turbogenerador a capacidad de molienda.					
T2: Mantenimiento reducción de vibraciones en motores en funcionamiento (TPM) ¹⁴					

Consumos de electricidad

En las plantas de producción de ambos casos, el consumo de electricidad es fundamental para el funcionamiento de los motores de bombas, ventiladores y molinos. La estructura de medición consiste en un contador general para toda la fábrica y el suministro de energía proviene de la red de interconexión eléctrica nacional. Cada empresa tiene una tarifa por kWh distinta. En el Cuadro 9 se presentan los resultados del índice de consumo (IC) en kWh promedio por tonelada de panela.

Cuadro 9. Índices de consumo de electricidad en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia

Costo promedio kWh/mes (\$ COP)	T1	T2		
Período I: años 2016-2017	347	352		
Período II: años 2018-2019	364	380		
	T1		T2	
	Período I	Período II	Período I	Período II
Consumo	Unidad de consumo: kWh/mes			
mínimo:	66.980	44.395	30.996	40.119
máximo:	106.977	83.353	45.805	58.055
promedio:	84.410	65.291	39.516	48.563
IC kWh/t panela	178,46	234,86	165,34	197,41

Periodo I: 2016-2018 y periodo II: 2018-2019

¹⁴ Mantenimiento productivo total

Teniendo en cuenta la elevación del IC del T1 de un período al otro (32%), se demostró que en la medida que se disminuye la producción, el gasto energético por tonelada de panela aumenta reduciendo la eficiencia energética.

A cada empresa se le solicitó un listado de los motores, su capacidad, consumo y su factor de uso para definir los equipos de mayor consumo. De acuerdo a la ley de Pareto, los resultados se presentan en las figuras 11 y 12. El 80% del consumo de electricidad, en ambos casos, corresponde a los motores del tándem de molinos.

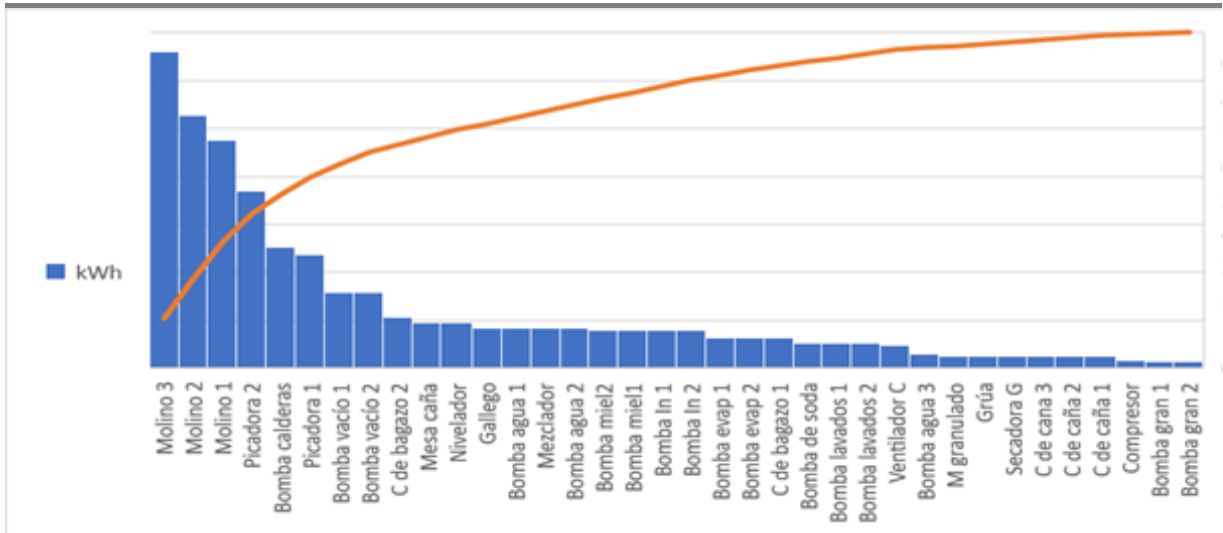


Figura 11. Diagrama de Pareto de consumo de electricidad del trapiche panelero T1, Valle del Cauca, Colombia

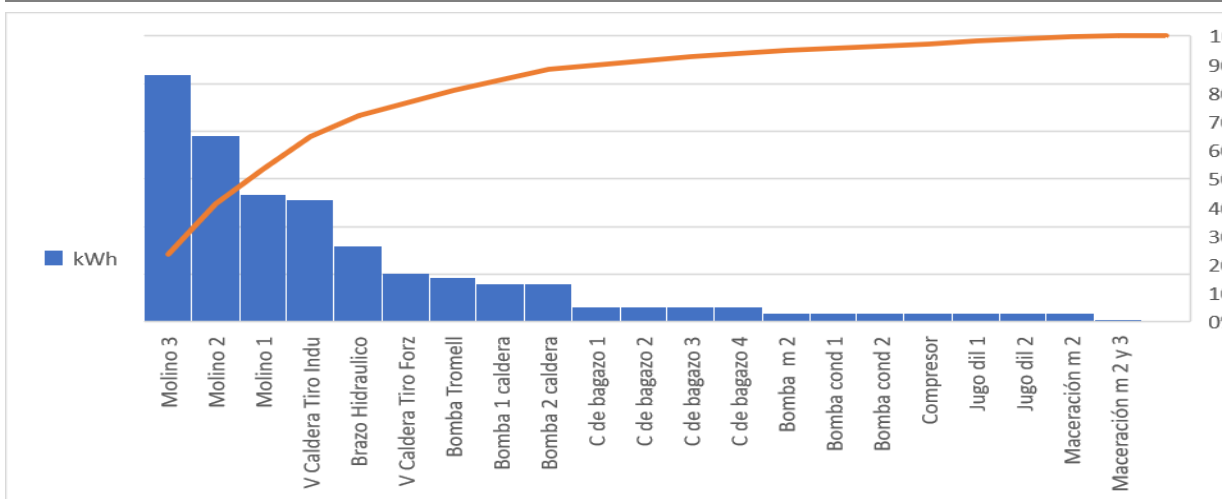


Figura 11. Diagrama de Pareto de consumo de electricidad del trapiche panelero T2, Valle del Cauca, Colombia

Diagnósticos asociados al caso T1 en los dos periodos de estudio

Las líneas de tendencia de consumo y producción en el tiempo, permiten ver el comportamiento simultáneo de las dos variables. Las figuras 13 y 14 muestran las tendencias del caso T1 para cada período estudiado y las Figuras 15 y 16 las del caso T2. Los círculos rojos detectan anomalías debido a variaciones de la producción y el consumo las cuales cada empresa debería analizar detenidamente con el fin de lograr estandarizar su proceso pues se presentaron la mayor parte del tiempo.

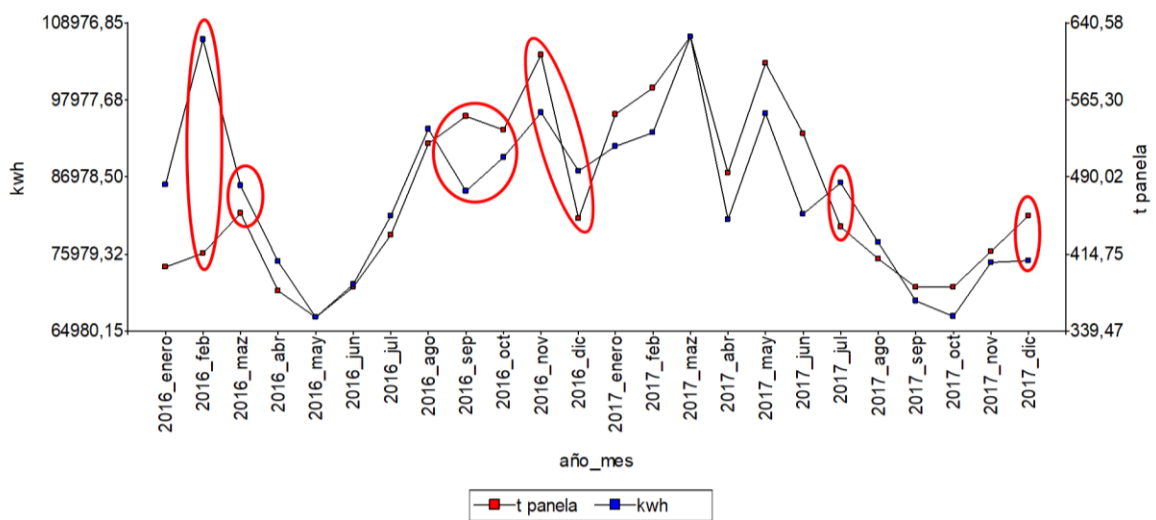


Figura 12. Tendencia de consumo y producción del trapiche T1 durante el período I, Valle del Cauca, Colombia

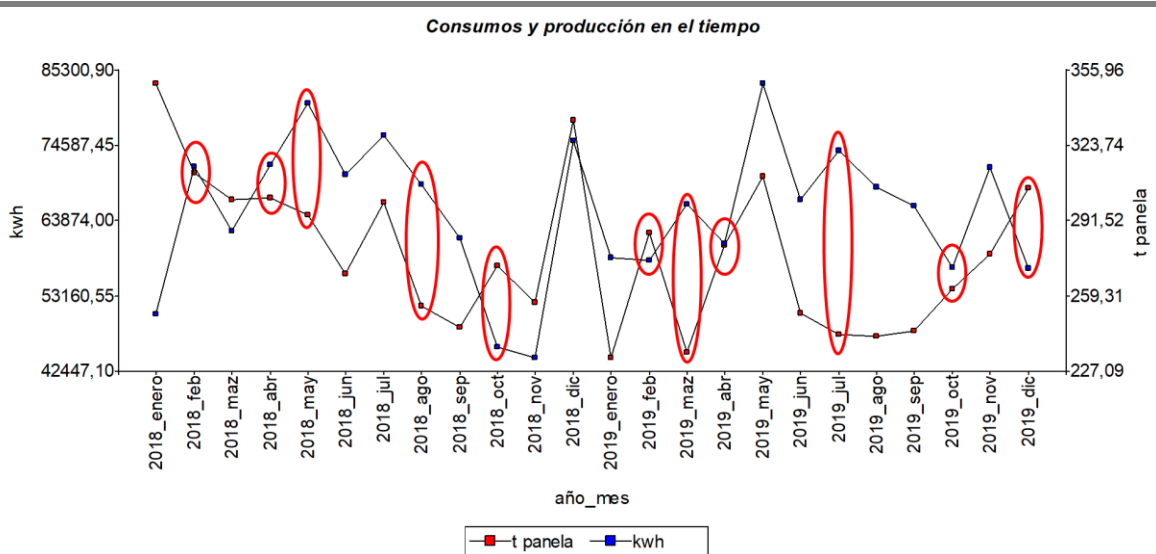


Figura 13. Tendencia de consumo y producción del trapiche T1 durante el período II, Valle del Cauca, Colombia

Diagnósticos asociados al caso T2 en los dos periodos de estudio

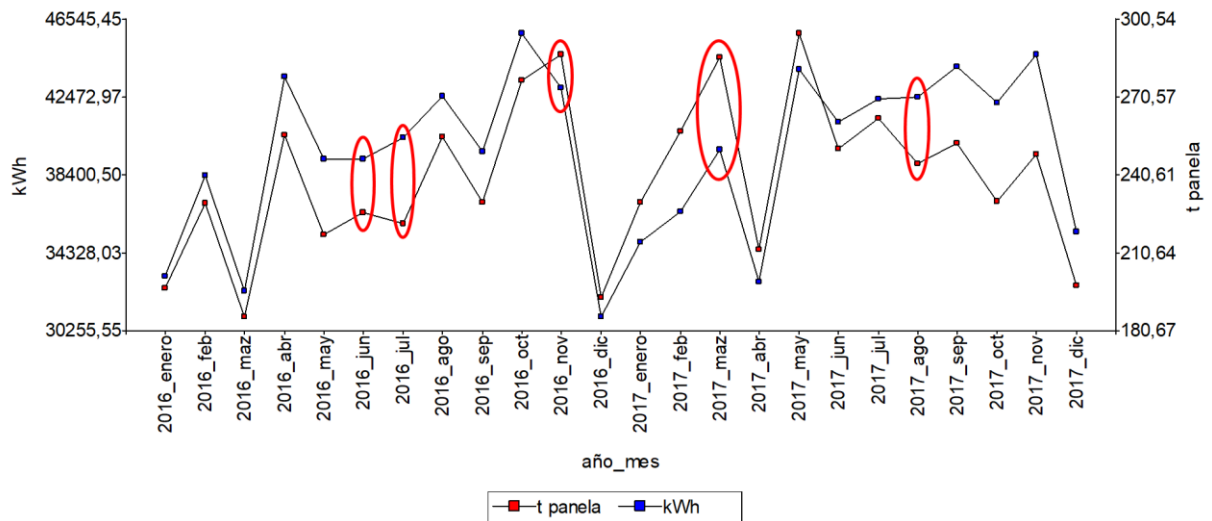


Figura 14. Tendencia de consumo y producción del trapiche T2 durante el período I, Valle del Cauca, Colombia

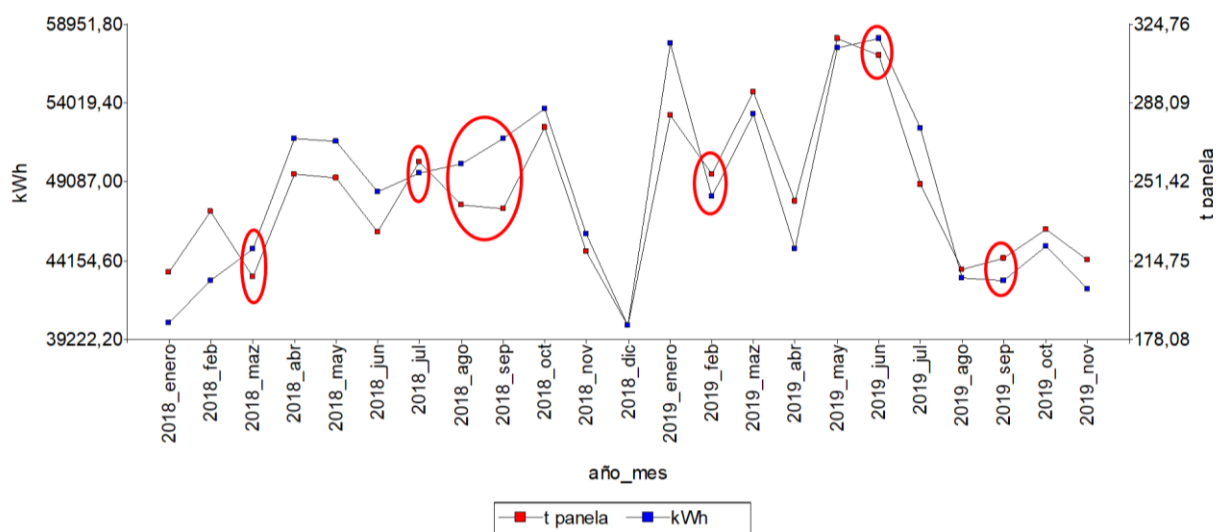


Figura 15. Tendencia de consumo y producción del trapiche T2 durante el período II, Valle del Cauca, Colombia

En las figuras 13-16, se observa un comportamiento extraño en las variaciones de consumo y de producción. En ocasiones, mientras el consumo de electricidad indica una reducción, en la producción se observó aumentos y viceversa. Se esperaría que el consumo disminuya o aumente en una cantidad similar respecto a los niveles de producción. Es necesario entonces, analizaren cada período en particular, los eventos que pudieron haber ocasionado estas variaciones anómalas.

6.3. Escenarios de gestión eficiente de la energía y ahorro económico

Se aplicó la metodología validada a nivel industrial por Campos *et ál.* (2008) a escala agroindustrial para la producción de panela, a fin de validar y aproximar a estas empresas al establecimiento de mejores prácticas y sistemas de gestión que faciliten el monitoreo y seguimiento de indicadores.

En esta etapa se utilizaron dos herramientas para el análisis. Por un lado, InfoStat para elaborar los gráficos de diagnóstico y validar el modelo de regresión lineal; y por el otro, el *software* de caracterización energética, con el cual se estimaron los indicadores de eficiencia energética y el ahorro estimado en pesos colombianos (\$ COP) por reducción de la energía no asociada a la producción.

Análisis de regresión lineal con InfoStat

Ecuación 13 Modelo de regresión lineal

$$E = \beta_0 + \beta_1 P + \varepsilon$$

Donde:

E: consumo de electricidad en kWh

β_0 : consumo de energía eléctrica no asociada a la producción en kWh

β_1 : la pendiente de la recta indica que por un cambio unitario en la producción de panela, el consumo de electricidad aumenta en una tasa dada en kWh/t

ε : es el error aleatorio, independiente, normalmente distribuido con media cero y varianza constante

Análisis con *software* de caracterización energética

A partir de la información reportada en los cuadros 5 y 9, se establecieron las ecuaciones de línea base de consumo para cada período; la línea base filtrada por el método de residuales estandarizados¹⁵ y finalmente la línea meta. El potencial de ahorro por reducción de la energía no asociada a la producción, es la diferencia entre la ordenada al origen de estas dos últimas ecuaciones. En el Cuadro 10 se detallan los resultados en kWh y su equivalencia en \$ COP.

¹⁵ El *software* de caracterización energética filtra los datos atípicos (*outliers*) del modelo de regresión para ajustarlo y mejorar su correlación. En la línea base filtrada en todos los casos, se mejora la correlación inicial r^2 a partir de consumos óptimos a diferentes volúmenes de producción óptima.

Cuadro 10. Resultados de los escenarios de gestión eficiente de la energía y ahorro económico de dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia

	T1		T2	
	Período I	Período II	Período I	Período II
Línea base	$E = 38.461 + 97,15P$ $R^2 = 0,52$	$E = 53.189 + 43,62P$ $R^2 = 0,02$	$E = 13.023 + 110,68 P$ $R^2 = 0,61$	$E = 12.587 + 146,79P$ $R^2 = 0,82$
Fiabilidad (%)	83	12,5	79	78
Línea base filtrada	$E = 31.876 + 97,15P$ $R^2 = 0,8$	$E = 139.998 + 43,62P$ $R^2 = 0,46$	$E = 12.541 + 112,34 P$ $R^2 = 0,73$	$E = 12.725 + 145,91P$ $R^2 = 0,9$
Línea meta	$E = 28.670 + 97,15P$ $R^2 = 0,94$	$E = 138.913 + 43,62P$ $R^2 = 0,86$	$E = 10.300 + 112,34 P$ $R^2 = 0,92$	$E = 11.152 + 145,91P$ $R^2 = 0,98$
Energía no asociada a la producción	3.206 kWh/mes equivalentes a \$1'112.484 COP.	1.085 kWh/mes equivalentes a \$4'738.792 COP	2.241 kWh/mes equivalentes a \$788.773 COP.	1.573 kWh/mes equivalentes a \$597.676 COP.
Ahorro (%)	10	0,77	18	12

Periodo I: 2016-2017 y periodo II: 2018-2019

A volúmenes constantes de producción ó producción planificada, el año no debería ser un factor de interés desde el punto de vista del comportamiento del consumo de electricidad. Sin embargo, para el caso de T1 se observó que la drástica disminución o caída en la producción para el período II (2018-2019), debido a la crisis del sector y de mercados, produjo un incremento del 38% en la energía no asociada a producción (pasando de 53.189 kWh a 139.998 kWh). Esto afectó el análisis de los datos evidenciable en el % de fiabilidad y de ahorro estimado (0,77%).

La falta de estandarización del proceso y la alta variabilidad en las operaciones de los motores en las plantas de producción, que en su mayoría es manual e intermitente, explica los bajos coeficientes de determinación R^2 . Para el período I, sólo el 52% de las variaciones en el consumo se explican por cambios en la producción en el caso T1. Por su parte, en el caso T2 es del 61% y del 82% para el período II. Mayor R^2 indica un mejor control operacional.

Ahora bien, de acuerdo con la metodología un modelo con coeficiente de determinación menor de 0,85, no permite hacer proyecciones confiables. Esto aplica para industrias cuyo nivel de estandarización en los procesos, así lo permite. Sin embargo, la agroindustria panelera no tiene un alto grado de estandarización lo que haría recomendable establecer un parámetro menos exigente, el cual debería ser determinado en otras investigaciones. Para los fines de esta investigación se consideró que un nivel admisible de R es 0,49, lo cual equivale a un nivel de correlación del 70%, aceptable para una industria poco estandarizada.

No obstante lo anterior, y con el fin de comparar la relación que existe entre estas dos variables, se realizó una regresión con variables auxiliares *dummy* utilizando un modelo de regresión general y mixto. Este modelo utiliza los datos de los dos trapiches en los cuatro años, permitiendo comparar estadísticamente similitudes y diferencias entre ambos casos a lo largo de esos años. El modelo ajustado considera como efectos fijos: la producción de panela, el trapiche y la interacción entre ambos factores, además, considerando el año como efecto aleatorio. Por otra parte, este modelo debe cumplir con los supuestos distribucionales de los

errores (normalidad y homogeneidad de varianza). En el Cuadro 11 se presentan los resultados de las pruebas de hipótesis marginales entregadas por InfoStat y en la Figura 17 se ilustra la relación entre el consumo y la producción entre los trapiches.

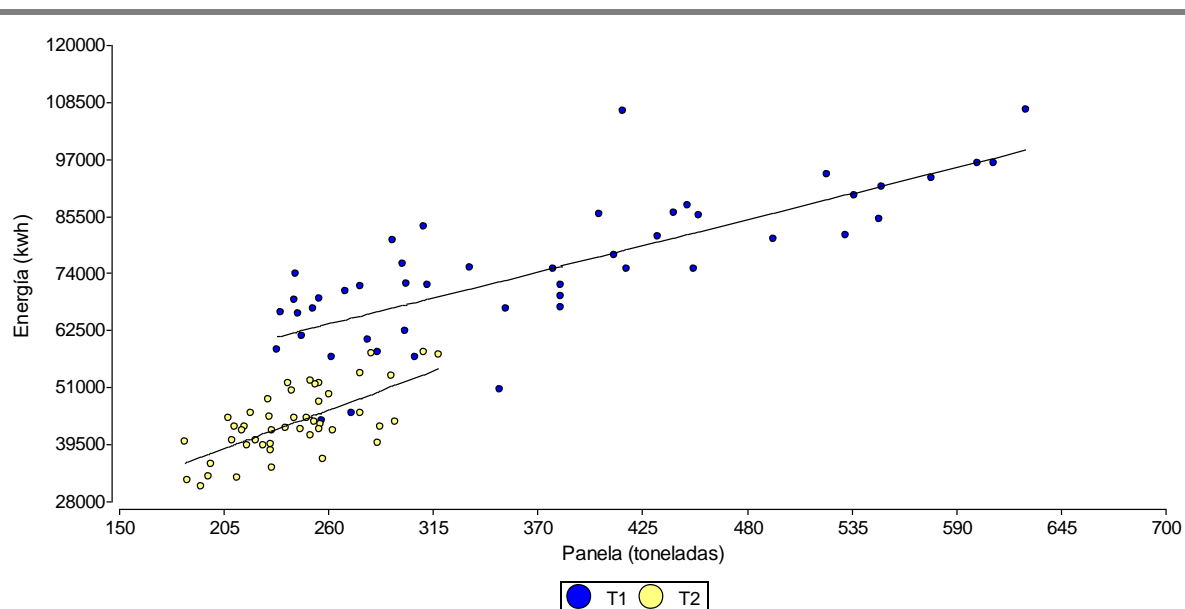


Figura 16. Relación entre la energía (kW/h) y la producción de panela (toneladas) de dos trapiches (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia

En el gráfico se observa que ambos casos presentan una tendencia lineal positiva entre el consumo (kWh) y la producción. Es decir, al aumentar las toneladas de panela producidas, aumenta el consumo de electricidad. La ordenada al origen indica la energía no asociada a la producción.

Para el caso de T1, el rango de producción es mayor y se explica por el comportamiento de la empresa en los dos períodos analizados (redujo cerca del 50% su volumen de producción de un período al otro). El T2 presenta menor consumo energético y volumen de producción, así como una pendiente más inclinada en comparación con T1, la cual puede atribuirse a la diferencia entre las tecnologías presentes en cada caso.

Cuadro 11. Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	88	29.3487	<0,0001
Trapiche	1	88	8,8496	0,0038
t.panela	1	88	225,0514	<0,0001
Trapiche:t.panela	1	88	0,3911	0,5334

De acuerdo con el modelo ajustado, existe efecto significativo (p-valor <0,0001), entre los kWh y las toneladas de panela. La relación es positiva e indica que el 87% de la variabilidad en el consumo de energía, está explicada por cambios en la producción de panela ($R^2 = 0,8761$). Se comprueba que el consumo de energía está en función de la producción. Además, la ordenada al origen o energía no asociada a la producción (p-valor <0,0001), indica que para cada trapiche ese porcentaje es diferente porque son tecnologías distintas.

Por otro lado, no existe interacción entre el trapiche y la covariable toneladas de panela (p-valor 0,5334). Esto se debe a los diferentes rangos en el volumen de producción. El consumo en kWh/t panela (las pendientes), independientemente del trapiche son estadísticamente iguales para ambos casos (p-valor <0,0001). Por un aumento unitario en la producción, el consumo de electricidad aumenta 124 kWh.

Ecuaciones calculadas para los trapiches:

Ecuación 14. Ecuación de tendencia modelo ajustado T1

$$T1: E = 28.106 + 124 P$$

Ecuación 15. Ecuación de tendencia modelo ajustado T1

$$T2: E = 11.168 + 124 P$$

En el Cuadro 12 se presentan los coeficientes (BLUP) de los efectos aleatorios (año), para el modelo ajustado. Los valores negativos corresponden a los años que presentaron consumos de electricidad por debajo del promedio, indicando un mejor comportamiento desde el punto de vista de la eficiencia energética; estos años guardan relación con los de mayor nivel de producción.

Cuadro 12. Coeficientes (BLUP) de los efectos aleatorios del modelo ajustado

	BLUP
2016	-3178, 3535
2017	-4659, 3586
2018	4235, 3089
2019	3602, 4032

6.4. Análisis financiero

En ambos casos, las empresas cuentan con lotes de cultivo de caña propios que abastecen entre el 60% y el 80% de la materia prima. El faltante lo compran a proveedores y vecinos, a quienes brindan asistencia técnica en cuanto a semillas, fertilizantes y pesticidas. A la llegada al trapiche se controla que la caña venga libre de plagas y enfermedades. Cada empresa cuenta con su propio laboratorio de calidad y con instalaciones que cumplen los requisitos.

En cuanto a la estructura organizacional, las empresas cuentan con una junta directiva, gerencia general, revisoría fiscal, asistente de gerencia y jefes de campo, producción y mantenimiento en fábrica quienes a su vez tienen personal a cargo. Cada una genera más de 100 empleos directos. La panela se produce y comercializa en diferentes presentaciones; la venta de los productos se realiza a través de distribuidores.

6.4.1. Estado de resultados

Se realizó un análisis financiero considerando el estado de resultados (pérdidas y ganancias) de cada trapiche para el período 1 de enero de 2016 al 31 de diciembre de 2019. Teniendo en consideración que la información suministrada es de carácter confidencial, los resultados se presentan en términos porcentuales tomando a los ingresos como el número de cajas (de 40 kg para T1 y 24 kg para T2) por el precio unitario en el mercado en ese año, como el 100%. La comparación del estado de resultados se presenta en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Comparación del estado de resultados financieros según el análisis realizado en dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia

Concepto	T1	T2
Ingresos (%)	100	100
Costos (%)	65	77
Gastos (%)	28	21
EBITDA ¹⁶ (%)	8	2
Utilidad neta (%)	2	0,03

Se encontraron algunas diferencias significativas en cuanto al manejo operativo: i) los costos en T1 representan el 65% de los ingresos, lo que permite ver que la empresa genera un margen bruto del 35%. Mientras que en el T2, representan el 77%, doce puntos porcentuales más que en el trapiche 1. Esta diferencia proviene principalmente de la materia prima, pues en el caso del T1, el costo del manejo del cultivo es de un 18% vs un 26% para el T2 y del corte, alce y transporte de la caña (16% vs 17%). ii) El peso de la energía eléctrica en los costos de producción es del 2% (T1) y del 6% (T2). Esto se explica dado que T1 emplea únicamente bagazo como combustible en la caldera y en ocasiones algo de leña; mientras que T2 utiliza carbón. Por su parte, los costos de fabricación en ambos trapiches representaron el 10% de los ingresos.

¹⁶ Utilidad antes de intereses, impuestos, depreciaciones, amortizaciones. Utilidad operativa.

En la sección de anexos se incluye el Cuadro 16, donde se muestra el detalle de cada factor de costos y gastos para cada caso.

Se encontró que los ahorros potenciales alcanzables mediante gestión de la energía eléctrica no asociada a la producción, es del 0,4% sobre los costos totales en ambos casos. Sin embargo, las gerencias se preocupan por el impacto que se genera en su caja por el pago de la factura mensual.

En lo referente a los gastos, en el caso del T1 representan el 28% sobre los ingresos, siendo los tres principales: i) 11% por concepto de ventas; 9% por administración y, iii) 7% por logística. En el caso de T2, representan el 21% sobre los ingresos, siendo los tres principales: i) 5% por ventas (seis puntos porcentuales menos que en T1); 10% por administración y, iii) 5% por logística. Las razones financieras EBITDA/ingresos es del 8% y la de utilidad neta/ingresos del 2% para T1; en el caso del T2 son menores, con un 2% y un 0,03%, respectivamente.

En las figuras 18 y 19 se ilustran los resultados año a año. Por motivos de confidencialidad, se omiten las escalas cuantitativas en dinero.

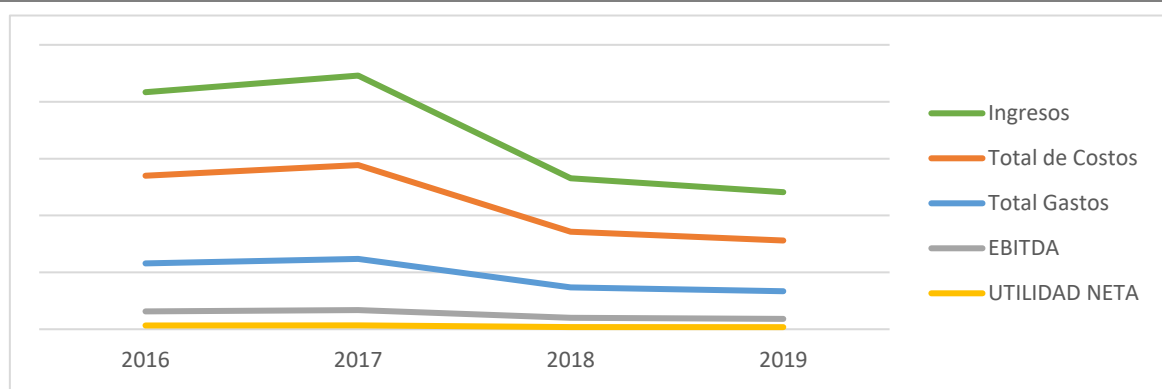


Figura 17. Estado de resultados del análisis financiero del trapiche panelero T1, Valle del Cauca, Colombia

De acuerdo con las cifras presentadas por la empresa T1, se encontró que los ingresos se incrementaron del 2016 al 2017 en un 6,5% (Figura 18). En contraste, para el año 2018 tuvieron una reducción de -40,52% generada por una baja importante en los precios unitarios de venta debido a una sobreoferta del producto en el mercado. En el 2019, la reducción en los ingresos continuó y fue del -9,14% respecto al año anterior. La empresa ajustó sus costos y gastos prácticamente en la misma proporción que los ingresos para compensar la disminución. Esto ayudó a mantener el EBITDA y la utilidad neta positivas y constantes durante el periodo.

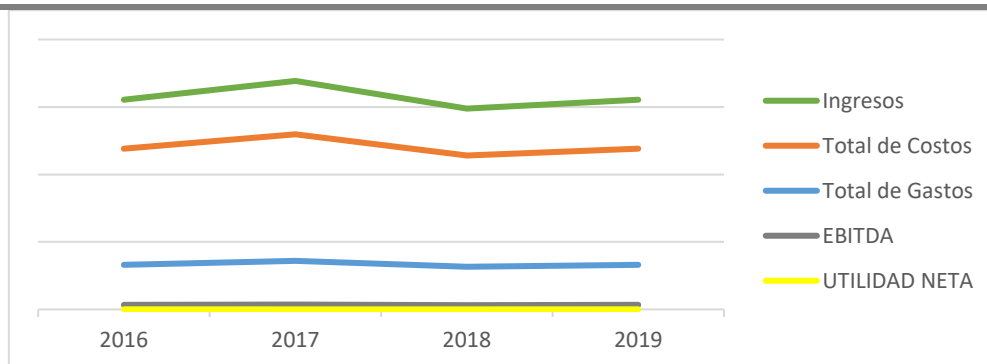


Figura 18. Estado de resultados del análisis financiero del trapiche panelero T2, Valle del Cauca, Colombia

En el caso del T2, y de acuerdo con las cifras presentadas por la empresa, se encontró que los ingresos tuvieron un comportamiento diferente al T1 (Figura 19). Así, del año 2016 al 2017, se dio un incremento del 8,91%. Al igual que en el trapiche 1, en el período del 2017 al 2018 también bajaron, pero solamente en un -12,10%. La causa fue la misma sobreoferta del producto en el mercado que generó una baja importante en los precios unitarios de venta. En el último período (2018-2019), los ingresos se incrementaron en un 4,48%. El trapiche ajustó sus costos de acuerdo a sus ingresos y mantuvo sus gastos constantes. El EBITDA y la utilidad neta también fueron positivas y constantes durante el período.

6.4.2 Valor actual neto (VAN)

Respecto al valor actual neto, su cálculo se realizó considerando el EBITDA con cifras reales de los cuatro años analizados y aplicando una tasa de descuento del 10%. En ambos casos, los valores resultaron positivos ($VAN > 0$). Esto significa que ambas empresas son viables desde el punto de vista financiero. Sin embargo, hay una diferencia considerable entre una y otra debido a los volúmenes de operación. A pesar de que T1 redujo su producción cerca del 50% en el período II (Cuadro 5), su VAN es 45 veces mayor respecto al de T2.

6.4.3. Análisis beneficio/costo (B/C)

Para este análisis se llevaron a valor presente, todos los ingresos y costos de los cuatro años con cifras reales, aplicando una tasa de descuento del 10%. Los valores resultantes fueron 1,08 para el T1 y 1,02 para el T2. Aunque apenas resultan ligeramente mayor a 1, ambos son financieramente aceptables ya que indican que las dos empresas generan ingresos mayores que los costos; así el T1 por cada peso invertido o gastado, genera 0,8 centavos de utilidad, mientras que el T2 genera 0,2; sin embargo, ambos valores indican que las dos empresas trabajan con niveles de rentabilidad neta muy estrechos.

6.4.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó utilizando la herramienta de Excel de Microsoft Office. El rango de sensibilidad fueron del 80% al 120%, tanto para los ingresos como para los costos más gastos. Para determinar los VAN se consideró el EBITDA durante los cuatro años y se descontaron a una tasa del 10%. Los números muestran los VAN resultantes del análisis y significan: i) positivos (1), la empresa es viable desde el punto de vista financiero; ii) negativos (-1), la empresa no es viable desde el punto de vista financiero.

Los resultados se muestran en los cuadros 14 (T1) y 15 (T2).

Cuadro 14. Resultados del análisis de sensibilidad del trapiche panelero T1, Valle del Cauca, Colombia

	Ingresos									
	80%	85%	90%	95%	100%	105%	110%	115%	120%	
Costos	80%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	85%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	90%	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
	95%	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1
	100%	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
	105%	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
	110%	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
	115%	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
	120%	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1

Cuadro 15. Resultados del análisis de sensibilidad del trapiche panelero T2, Valle del Cauca, Colombia

	Ingresos									
	80%	85%	90%	95%	100%	105%	110%	115%	120%	
Costos	80%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	85%	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
	90%	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1
	95%	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
	100%	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
	105%	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
	110%	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
	115%	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
	120%	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1

En ambos casos, los puntos de inflexión se dan en dos sentidos: i) si bajaran los ingresos hasta el 80% y los costos pasaran del 85% al 90% (T1) y del 80% al 85% (T2); y, ii) si subieran los ingresos al 110% (T1) y al 115% (T2) y los costos pasaran del 115% al 120% en ambos trapiches.

7. CONCLUSIONES

Objetivo general

El análisis de la gestión integral de la energía es un tema hasta el momento poco estudiado en agroindustrias no estandarizadas como la panelera. Existe desconocimiento de los cobeneficios ambientales, económicos y sociales de mejorar la administración de los recursos energéticos en el proceso productivo, especialmente en trapiches altamente tecnificados, lo cual indica nuevas oportunidades de investigación. Este trabajo puede servir de referente, ya que aporta información productiva, ambiental y económica a partir de dos casos de estudio, a fin de impulsar la innovación y sostenibilidad en las organizaciones paneleras.

Objetivo específico 1

El proceso productivo en los dos trapiches objeto de estudio es más tecnificado que en el resto del país y su capacidad instalada supera los 1.000 kg de panela por hora. Los motores eléctricos de alta eficiencia del tándem de molinos en serie, son los responsables del 80% del consumo de electricidad mensual en ambos casos. La alta variabilidad en las operaciones de los motores, que en su mayoría es manual e intermitente, explica los bajos coeficientes de determinación ($R^2 = 0,49$) entre el consumo de energía eléctrica y la producción.

La principal diferencia en el proceso en los dos casos de estudio, se presenta en el sistema de evaporación. Para el caso del trapiche 1 (T1), esta se realiza de forma cerrada aprovechando el calor latente de vaporización del agua, con una eficiencia térmica global del 80%, mientras que en el trapiche 2 (T2), se realiza a presión atmosférica siendo menos eficiente (43%). Existen diferentes proyectos de optimización energética que van desde la dosificación del bagazo en la entrada de la caldera, hasta el diseño de turbogeneradores a capacidad de molienda. Sin embargo, ambos casos utilizan combustibles adicionales al bagazo, como leña y carbón en cerca del 10%, lo cual se ve reflejado en el aumento de las emisiones GEI y no se tienen indicadores de seguimiento de eficiencia energética.

La práctica de maceración dificulta el aprovechamiento energético del bagazo como combustible en la caldera, al elevar su contenido de humedad, reduciendo la eficiencia térmica global del proceso. Sin embargo, los productores están más interesados en el proceso de maceración porque aumenta el contenido de extracción de sacarosa de la caña, lo cual representa un impacto positivo en sus ingresos, frente a la eliminación del uso de combustibles adicionales.

Objetivo específico 2

Ambas empresas realizan gestión de sus residuos con el fin de cumplir con la normativa sanitaria y ambiental y ahorrar recursos. Cumplen con el permiso de emisiones atmosféricas y, en menor medida, con el de vertimientos. La pérdida de sacarosa en los efluentes líquidos aumenta la carga orgánica de estos y representa una pérdida para el negocio de producción de panela. Gracias al diseño y puesta en marcha del filtro de cachaza en ambos trapiches, no sólo se reduce

el impacto ambiental, pues además los ingresos se incrementan en cerca de 1,6%. También aprovechan la ceniza y la torta de cachaza como acondicionador de los suelos en campo.

Objetivo específico 3

El impacto económico anual de la energía en los costos totales de producción representa un 2% en el trapiche 1 y un 6% en el 2. Comparativamente con otros factores de costo, no constituye un foco de atención por parte de los productores. Sin embargo, se evidenció preocupación en ambos casos por el monto de pago de las facturas eléctricas mensuales que pueden alcanzar hasta los 10.000 dólares.

Las prácticas operativas en los motores incrementan el consumo de electricidad no asociado a los volúmenes de producción. Los ahorros estimados por reducción de este porcentaje de energía eléctrica, corresponden al 0,4% anual sobre los costos totales anuales. A pesar de que no requiere inversiones de capital, si no que más bien tiene que ver con la adopción de buenas prácticas de uso racional de energía en la operatividad de equipos, este porcentaje de ahorro potencial es poco atractivo para los productores.

La sobreoferta de producción de panela en la industria en el año 2018, provocó la reducción de los volúmenes de producción y disminuciones en los precios unitarios de venta, afectando los ingresos en ambos trapiches. A pesar de esta crisis, mantuvieron su utilidad y siguen en operación aunque trabajan con niveles de rentabilidad neta muy estrechos. Por otro lado, hay una diferencia considerable en la capacidad instalada entre uno y otro trapiche de manera que el VAN del T1 es 45 veces más grande respecto al del T2.

Recomendaciones (trabajos futuros)

Algunos de los principales proyectos de inversión de interés por parte de los productores son: rediseño de la caldera, sistemas de tratamiento de vertimientos, filtros de limpieza del guarapo y desfibradoras de caña. Estos, junto con el filtro de cachaza, apuntan a incrementar los rendimientos. Es interesante explorar el tema de cogeneración y venta de excedentes de electricidad como negocio alternativo a los problemas de precios que enfrenta la agroindustria, para ello es necesario avanzar en investigaciones en sistemas de gestión integral de la energía.

El futuro de la producción de panela en Colombia debería estar enmarcado en investigación que apunte a la diferenciación de los productores a través del etiquetado ecológico, favoreciendo su posicionamiento en el mercado y el aumento en las exportaciones. Así, se podría superar la brecha tecnológica que ha conllevado a la investigación que se limita a proponer mejoras en los sistemas de combustión tradicional. Colombia debe avanzar hacia un nuevo paradigma de producción de panela sostenible, que es aquella que se produce con una menor huella ecológica, mediante un proceso limpio donde se minimicen los residuos sólidos, líquidos y las emisiones; para incursionar en el mercado mundial de productos orgánicos, donde se comercializan productos diferenciados y con valor agregado.

Conclusiones de reflexión

Mientras la mayoría de los trapiches de producción artesanal de panela del país se basan en una economía de subsistencia y afrontan muchas dificultades para modernizar su infraestructura, optimizar su producción y expandir sus mercados, la innovación de un grupo relativamente pequeño de estos establecimientos en el Valle del Cauca los ha convertido en empresas que se alinean con las oportunidades del cambio organizativo e institucional de la economía, para generar empleo formal y creación de nuevos mercados. El estrés y las oportunidades de algunos de estos campesinos emprendedores, amenazados por la gran industria azucarera, los llevó a innovar sus procesos y a ampliar sus cultivos asegurando sus medios de vida y haciéndolos más sostenibles.

La innovación de los trapiches podría mejorar sustancialmente el negocio desde el punto de vista de la sostenibilidad en sus tres dimensiones. Así por ejemplo, la instalación de sistemas de gestión y medidas de reconversión tecnológica como tándem de molinos eléctricos, la automatización del suministro de bagazo, evaporación cerrada de múltiple efecto y la instalación de filtro de cachaza, podrían ser opciones, entre otras, que contribuirían a optimizar la sostenibilidad. Estas son acciones que se han implementado con el paso de los años en el Valle del Cauca sin afectar la generación de empleo, transformando a un grupo relativamente pequeño en plantas de procesamiento de alimentos que generan valor agregado a partir del aprovechamiento de sus residuos, minimizando el impacto ambiental, lo que, contemporáneamente se ha denominado, economía circular.

El actual marco normativo colombiano, sumado con los objetivos de país propuestos por la NAMA Panela, que se orientan a la reconversión tecnológica de trapiches ineficientes, ofrecen escenarios de oportunidades para el desarrollo de proyectos de investigación tendientes a ayudar a las organizaciones paneleras a posicionar su negocio con estándares de calidad y sostenibilidad. En este sentido, implementar sistemas de gestión ofrece la posibilidad de hacer control y monitoreo de indicadores y seguimiento de las acciones correctivas, facilitando la gerencia ambiental y energética de los procesos, así como la trazabilidad y calidad del producto.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, A; Durán, C; Quintero, H. 1978. La modernización de la producción de caña para panela en el Valle geográfico del Río Cauca. s.l., Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira.
- Agudelo, C; García, H; Barragán, I; Castañeda, ML; Rojas, A; Reyes, P. 2017. Caracterización del subsector panelero. Servicios de consultoría para el diseño de la NAMA de reconversión productiva y tecnológica del subsector panelero en Colombia. Entregable N° 1. ONF ANDINA (en línea). Bogotá, Colombia, s.e. Disponible en https://drive.google.com/drive/folders/1840gq2YWx_px1fZQe1ReuYzjviESSTS3.
- Aguirre Restrepo, G. 1976. Historia e importancia del cultivo de la caña de azúcar en Colombia. (en línea). Bogotá, PRODESARROLLO. p. 10. Consultado 24 mar. 2020. Disponible en <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/23116#.Xnlbk46uJcs.mendeley>.
- Blanco, M. 1999. La agroindustria de la panela en América Latina : selección de artículos y fichas de experiencias (en línea). 1 ed. PRODAR-DPH, D de trabajo polo (ed.). San José, Costa Rica, Alternativas para la pequeña agroindustria de la panela en America Latina ALTERSYALC. 104 p. Consultado 29 mar. 2019. Disponible en <http://opac.bibliotecaorton.catie.ac.cr/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=470221>.
- Campos, JC; Lora, E; Meriño, L; Tovar, I. 2008. Sistema de Gestión Integral de la Energía. Guía para la Implementación (en línea). s.l., s.e. Consultado 8 jul. 2019. Disponible en www.digitosydisenos.com.co.
- Castellanos, OF; Torres, LM; Florez, DH. 2009. Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la panela y su agroindustria en Colombia (en línea). Bogotá, Colombia, s.e. Consultado 27 mar. 2019. Disponible en <https://sioc.minagricultura.gov.co/Panela/Documentos/005 - Documentos Técnicos/005 - D.T - Agenda Prospectiva.pdf>.
- Cenicaña (Centro de Investigación de la caña de azúcar, Colombia). 2014. Fechas históricas de la agroindustria de la caña en Colombia – Cenicaña (en línea, sitio web). Consultado 12 mar. 2020. Disponible en <https://www.cenicana.org/fechas-historicas-de-la-agroindustria-de-la-cana-en-colombia/>.
- Cenicaña (Centro de Investigación de la caña de azúcar, Colombia). 2019. Evaluación agronómica de nuevas variedades CC para la producción de panela. *In* Taller Interinstitucional sobre caña de azúcar para la producción de panela. San Antonio de los Caballeros -Candelaria, Colombia, Estación Experimental de Cenicaña.
- Cruz, A. 2013. Continúa sin solución la crisis del sector panelero colombiano (en línea). Cali, Colombia, s.e.; 14 oct. Disponible en <https://www.elpais.com.co/economia/continua-sin-solucion-la-crisis-del-sector-panelero-colombiano.html>.
- DANE (Dirección Nacional de Estadística, Colombia). 2017. Encuesta nacional agropecuaria (ENA) (en línea). s.l., Consultado 24 sep. 2019. Disponible en

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>.

- Durán Castro, N. 2010. Reingeniería panelera. Néstor Dur. Barbosa Santander, Colombia, Buhos Editores. 244 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2004. Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina (en línea). Roma, Italia, . Consultado 14 mar. 2019. Disponible en http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ags/publications/AGSF_WD6s.pdf.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2020. FAOSTAT (en línea, sitio web). Consultado 3 may 2020. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/en/?#data/FBS>.
- Fedepanela (Federación Nacional de Productores de Panela, Colombia). 2019a. Gerente general de Fedepanela hace llamado al gobierno nacional y a los productores frente a la grave crisis panelera (en línea, sitio web). Consultado 7 may 2020. Disponible en <https://fedepanela.org.co/gremio/ente-general-de-fedepanela-hace-llamado-al-gobierno-nacional-y-a-los-productores-frente-a-grave-crisis-panelera/>.
- Fedepanela (Federación Nacional de Productores de Panela, Colombia). 2019b. Quiénes Somos | Fedepanela (en línea, sitio web). Consultado 6 may 2020. Disponible en <https://fedepanela.org.co/gremio/nuestra-federacion/quienes-somos/>.
- Fonseca, S. 2002. Guía Ambiental Para el Subsector Panelero (en línea). Bogotá, s.e. Disponible en https://www.fedepanela.org.co/publicaciones/cartillas/guia_ambiental_panelera.pdf.
- Gallardo García, Y. 2017. Análisis termodinámico de los procesos de vapor involucrados en un trapiche panelero (en línea). s.l., Universidad Tecnológica de Pereira. 70 p. Consultado 12 mar. 2020. Disponible en <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/9024/T664.122G163.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- García, HR; Holguín, AC; López Zaraza, RA; Durán Sánchez, E; Olvera Cardoso, G. 2011. Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugos de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y productividad y disminuir el impacto ambiental en la producción de panela (en línea). s.l., s.e. Consultado 8 jul. 2019. Disponible en <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/1258>.
- García, M. 2004. Hornillas paneleras. Evaluación de su impacto ambiental (en línea). Innovación y Cambio Tecnológico 20:10. Consultado 24 mar. 2020. Disponible en <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/15235#.XnlXKxdEZ8M.mendeley>.
- Gittinger, JP. 1982. Economic analysis of agricultural projects. s.l., John Hopkins University Press.
- Guerrero, M; Escobar, J. 2015. Eficiencia técnica de la producción de panela The technical efficiency of Non Centrifugal Sugar production (en línea). Journal of Technology 14(1):107-116. Consultado 15 sep. 2019. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/304583264_Eficiencia_tecnica_de_la_producci

on_de_panela_The_technical_efficiency_of_Non_Centrifugal_Sugar_production.

- Gutiérrez-Mosquera, LF; Arias-Giraldo, S; Ceballos-Peñalosa, AM. 2018. Advances in traditional production of panela in Colombia: analysis of technological improvements and alternatives. *Ingeniería y Competitividad* 20(1):107-123. DOI: <https://doi.org/10.25100/iyc.v20i1.5233>.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2001. Bases para un acuerdo de desarrollo de la cadena agroindustrial de la panela (en línea). Bogotá, Colombia. Consultado 5 abr. 2019. Disponible en <http://repiica.iica.int/docs/B0126E/B0126E.PDF>.
- Jaffé, W. 2013. Azúcar no-centrifugada (Panela): Producción mundial y comercio (en línea). s.l., s.e. Consultado 14 mar. 2019. Disponible en <http://www.panelamonitor.org/documents/559/azucar-no-centrifugada-panela-produccion-mundial-y/>.
- Jaffé, WR. 2015. Nutritional and functional components of non centrifugal cane sugar: A compilation of the data from the analytical literature (en línea). *Journal of Food Composition and Analysis* 43:194-202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.06.007>.
- Jakkampati, LP; Mandapati, MJK. 2016. Improving the performance of jaggery making unit using solar energy. *Perspectives in Science* 8:146-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.019>.
- Kumar, R; Kumar, M. 2018. Upgradation of jaggery production and preservation technologies (en línea). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96(July):167-180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.053>.
- Ley 697. 2001. Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones (en línea). Colombia, s.e. Consultado 11 may 2020. Disponible en <http://www.secretariasenado.gov.co/leyes/L0697001.HTM>.
- López Zaraza, RA. 2016. Evaluación técnica y económica de la implementación de un sistema de evaporación de múltiple efecto en los procesos productivos de la panela (en línea). Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 133 p. Consultado 12 mar. 2020. Disponible en <bdigital.unal.edu.co/56075/1/1032385252.2016.pdf>.
- Minagricultura (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia). 2018. 002 - Cifras Sectoriales - Panela Diciembre 2018. Sistema de Información de Gestión y Desempeño de Organización de Cadenas (en línea). Bogotá, s.e. Consultado 31 may 2019. Disponible en [https://sioc.minagricultura.gov.co/Panela/Documentos/002 - Cifras Sectoriales/002 - Cifras Sectoriales - 2018 Diciembre Panela.pdf](https://sioc.minagricultura.gov.co/Panela/Documentos/002-CifrasSectoriales/002-CifrasSectoriales-2018DiciembrePanela.pdf).
- Mintz, SW; Sidney W. 1996. Dulzura y poder : el lugar del azúcar en la historia moderna (en línea). Mexico, Siglo Veintiuno. 299 p. Consultado 26 nov. 2019. Disponible en http://catalog.uji.es/record=b1141402~S1*spi.
- Osorio Cadavid, G. 2007. Buenas prácticas agrícolas-BPA-y buenas prácticas de manufactura-BPM-de caña y panela (en línea). Medellín, Colombia, FAO. 202 p. Consultado 31 may. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-a1525s.pdf>.
- Prías, OF; Campos, JC. 2013. Implementación de un sistema de gestión de la energía. Guía con

- base en la norma ISO 50001 (en línea). Bogotá, s.e. Consultado 6 sep. 2019. Disponible en [http://reciee.com/pdf/2013 - Implementación SGIE, Guía con Base ISO 50001 \(1\).pdf](http://reciee.com/pdf/2013 - Implementación SGIE, Guía con Base ISO 50001 (1).pdf).
- Prins, C. 2011. Fuerzas y procesos de innovación tecnológica. Su incidencia en el desarrollo rural (en línea). Plataforma del curso: Desarrollo y Creación de Institucionalidad Rural. p. 1-16. Disponible en <http://campusvirtual.catie.ac.cr/course/view.php?id=59§ion=6>. (Ponencia magistral sobre Innovación y Desarrollo Rural en América Latina, en seminario internacional de la Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia)
- Ramírez Gil, JG. 2017. Characterization of traditional production systems of sugarcane for panela and some prospects for improving their sustainability. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 70(1):8045-8055. DOI: <https://doi.org/10.15446/rfna.v70n1.61763>.
- Requier-Desjardins, D; Rodríguez-Borray, G. 2004. Environmental impact of panela food-processing industry: sustainable agriculture and local agri-food production systems (en línea). *International Journal of Sustainable Development* 7(3):237. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJSD.2004.005956>.
- Restrepo, C. 2007. Historia de la panela colombiana, su elaboración y propiedades (en línea). s.l., s.e. Consultado 14 abr. 2020. Disponible en <http://www.panellamonitor.org/media/docrepo/document/files/historia-de-la-panela-colombiana-su-elaboracion-y-propiedades.pdf>.
- Rodríguez Borray, G; Huertas Carranza, B; Polo Murcia, SM; González Chavarro, CF; Tauta Muñoz, JL; Rodríguez Cortina, J; Ramírez Durán, J; Velásquez Ayala, FA; Espitia González, JJ; Zarazá, López, RA. 2020. Modelo productivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de panela en Cundinamarca (en línea). AGROSAVIA (ed.). Mosquera, s.e., (Colección Transformación del Agro). 180 p. DOI: <https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7403305>.
- Rodríguez, G; Gottret, MV. 2000. Correspondencia entre el desarrollo de tecnología para la agroindustria de la panela con el alivio de la pobreza y la protección del ambiente y los recursos naturales: el caso de la hoya del río Suarez (Colombia) (en línea). *In International Workshop Assessing the Impact of Agricultural Research on Poverty Alleviation*. San José, Costa Rica, Poverty alleviation workshop [on line]. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali. Colombia. p. 28. Consultado 7 jul. 2019. Disponible en http://ciat-library.ciat.cgiar.org/paper_pobreza/073.pdf.
- Rodríguez, J; Fabián, V; John, E; Sebastián, E; Oscar, M. 2018. Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization. *Energy* 152:858-865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127>.
- Rudas, G; Forero, J. 1995. La agroindustria panelera en Colombia. Pequeña producción y relaciones interempresariales (en línea). *In Cuadernos de Desarrollo Rural*. Bogotá, Colombia, Universidad Javeriana. p. 7-17. Disponible en <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/desarrolloRural/issue/view/200>.
- Sardeshpande, VR; Shendage, DJ; Pillai, IR. 2010. Thermal performance evaluation of a four pan jaggery processing furnace for improvement in energy utilization. *Energy* 35(12):4740-4747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.018>.
- Sarria, P; Solano, A; Preston, T. 1990. Utilizacion de jugo de caña y cachaza panelera en la

- alimentacion de cerdos (en línea). *Livestock Research for Rural Development* 2(2). Consultado 8 jul. 2019. Disponible en <https://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd2/2/sarria.htm>.
- Shiralkar, KY; Kancharla, SK; Shah, NG; Mahajani, SM. 2014. Energy improvements in jaggery making process. *Energy for Sustainable Development* 18(1):36-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.001>.
- Solano, S; Cifuentes, P. 2004. Evaluación económica, social, financiera y ambiental de las tecnologías tradicional, CIMPA modificada y a vapor para la producción de panela en el departamento del Valle del Cauca. Tesis de grado (Ingeniero Agrónomo). Palmira, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. .
- UPME (Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia); COLCIENCIAS (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colombia); KAI; GIEN. 2006. Herramientas para el análisis de caracterización de la eficiencia energética (en línea). Bogotá, Colombia, s.e. Consultado 28 may 2019. Disponible en <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/herramientas.pdf>.
- Velásquez Arredondo, H; Agudelo, AF; Álvarez, J. 2005. Mejorando la producción de panela en Colombia (en línea). *LEISA Revista de Agroecología* 21(1). Consultado 2 nov. 2019. Disponible en <http://www.leisa-al.org/web/index.php/volumen-21-numero-1/2063-mejorando-la-produccion-de-panela-en-colombia>.
- Velásquez, F; Espitia, J; Mendieta, O; Escobar, S; Rodríguez, J. 2019. Non-centrifugal cane sugar processing: A review on recent advances and the influence of process variables on qualities attributes of final products (en línea). s.l., Elsevier Ltd, vol. 255. p. 32-40 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.009>.
- Velásquez, HI; Janna, FC; Agudelo, AF. 2006. Diagnóstico exergético de los procesos productivos de la panela en Colombia (en línea). *Revista Energética* 1(35):15-22. Disponible en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358081/Leccion_evaluativa_3.pdf.
- Vélez Peña, R; González, LO; Rodríguez, J. 2016. Alcances y limitaciones de la gestión de la energía en un ingenio panelero del Valle del Cauca. Reaches and limitations of energy management in a panela factory from Valle del Cauca (en línea). *Energética* 47:10-15. ISSN 2357-612X (en línea). Disponible en www.revistas.unal.edu.co/energetica.
- Venkata Sai, P; Reddy, KS. 2020. 4-E (Energy-Exergy-Environment-Economic) analyses of integrated solar powered jaggery production plant with different pan configurations. *Solar Energy* 197:126-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.026>.

9. ANEXOS

Cuadro 16. Comparación factores de costos, gastos y estado de resultados de dos trapiches paneleros (T1 y T2) ubicados en el Valle del Cauca, Colombia

Estado de resultados (%)	T1	T2
Ingresos	100%	100%
Costos	%	%
Materia prima	18	26
Corte, alce y transporte de caña	16	17
Mano de obra	12	12
Costo de fabricación	9	10
Empaque	7	6
Energía	2	6
Total de costos	65	77
Gastos	%	%
Venta	11	5
Administración	9	10
Logística	7	5
Insumos	1	1
Total de gastos	28%	21%
EBITDA	8%	2%
Intereses financieros	2	0,42
Impuestos	4	2
UTILIDAD NETA	2%	0,03%

**ENCUESTA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA Y AMBIENTAL
TRAPICHES TECNIFICADOS DEL VALLE DEL CAUCA**



favor enviar al correo:
raquel.velez@catie.ac.cr

Como parte del proyecto de tesis: “Análisis de la sostenibilidad energética y económica de la producción de panela en el Valle del Cauca: Tres casos de estudio”, que tiene como objetivo; estimar la contribución de la eficiencia energética en la sostenibilidad a nivel de fábrica, requerimos de la información que usted nos pueda brindar en esta encuesta. Los nombres y datos que usted indique serán utilizados de forma confidencial, anónima y privada. Además, serán utilizados única y exclusivamente para los fines científicos de la presente investigación.

1. DATOS GENERALES DE LA EMPRESA					
FECHA:		REPRESENTANTE LEGAL:			
NOMBRE DE LA EMPRESA:					
LOCALIZACIÓN:	Dirección:				
	Municipio:				
	Corregimiento/vereda:				
Correo electrónico:		Año de fundación:			
Área sembrada caña (Ha):		% caña:	propia:	# proveedores	
Rendimiento caña/ Ha:			terceros:		
Variedades de caña procesadas					
Cuenca hidrográfica:					
2. ORGANIZACIÓN DE LA PLANTA					
N° días de trabajo al mes:		Horario laboral:			N° turnos
N° días de trabajo al año:					
N° empleados:	directos:	# hombres	promedio edades		
	indirectos:	# mujeres			
Producción mensual (t panela)		Producción anual promedio: (t panela)			
t/h:	t/turno:	t /día:	cajas:		
N° paradas x vacaciones:		meses:			
N° paradas x mantenimiento:		motivo:			
N° paradas x otros motivos:		¿Cuáles?			
N° días de paradas al año:					
3. PROCESO PRODUCTIVO. Por favor describa brevemente cada etapa					
EQUIPOS		cantidad	Tipo	Breve descripción	
Pesaje de caña:					
Descargue de caña:					
Mesa de caña:					
Picadoras:					
Desfibradoras:					
Conductores de caña:					
N° Calderas (características):					
Motores:					
Tándem de molinos:					
% Extracción:		% Humedad en bagazo:		% Fibra:	
Filtro guarapo:		Cantidad de bagacillo/mes:			
Pre-limpieza:		Limpieza:			
Clarificación:		Cantidad cadillo/mes:	cantidad de cal/mes:		
N° Equipos (características):		otros:			

Filtro cachaza:		kg cachaza/mes:		kg melote/mes:	
Evaporación:					
Concentración:					
Batido-Moldeo					
Rendimiento kg panela/ Tcaña:					
4. DIAGNÓSTICO AMBIENTAL.					
¿La empresa hace manejo, tratamiento y/o disposición final de los residuos generados?					si / no
Indique para los siguientes tipos de residuos qué tipo de tratamiento se realiza					
Residuos	Minimización	Valorización (reuso/ reciclaje)	Tratamiento	No dispone	No es necesario
Líquidos					
Sólidos					
Emisiones atmosféricas					
Ruidos y olores					
Otros:					
Indique con una "x" los motivos por los cuales se realizan estos tratamientos					
Cumplir normativa sanitaria		Quejas de vecinos			
Ahorro recursos		Cumplir normativa ambiental			
¿La empresa cuenta con permiso de vertimientos?		Si		No	
¿La empresa cuenta con permiso de emisiones?		Si		No	
Sintetice las practicas de gestión ambiental actuales (aspectos positivos) y las deficiencias (aspectos negativos) y si es necesario las propuestas de mejora que asume la empresa.					
5. DIAGNÓSTICO ASOCIADO AL CONSUMO ENERGÉTICO					
¿La empresa sigue algún indicador energético		si	no	¿cuál?	
Si la respuesta es afirmativa definalo:					
¿Se lleva un gráfico de tendencia de los indicadores energéticos por áreas en la empresa?					si / no
¿Qué combustibles utilizan en el proceso?					
Consumo de Gas, m ³ /mes:		Valor factura Gas :			
Consumo Electricidad kW/mes		Valor factura electricidad :			
Consumo Diesel, m ³ /mes:		Valor factura Gas :			
Consumo Carbón, m ³ /mes:		Valor factura carbón :			
Consumo leña, m ³ /mes:		Valor factura leña :			
Consumo Bagazo, kg/mes:		Valor factura bagazo :			
Para determinar los equipos responsables del 80% del consumo de electricidad diligencie:					- 54 -

¿Se cuenta con el apoyo de la gerencia para efectuar proyectos de ahorro de energía, siempre que sean rentables? SI X NO

¿En qué medida se preocupa el gerente de la empresa por los costos energéticos?				
Mucho		Normal		Poco
				Nunca
¿En su empresa o área se encuentran identificadas las variables que impactan el uso de la energía?				si / no
De la siguiente lista, determine el grado de importancia en cuanto a impacto en el uso de la energía y describa cada una de ellas.				

Variables	Descripción	Grado de importancia		
		Bajo	Medio	Alto
De proceso				
De operación				
Mantenimiento				
Ambientales				
Otras				

Para determinar la influencia del uso de la energía en los costos de producción diligencie:				
Factor de costo	%	\$ COP	USD \$	% en los costos totales
Corte, alce y transporte de				
Materia prima				
mano de obra				
Energía				
Costos administrativos				
empaque				
Logística				
costo de venta				
intereses financieros				
impuestos				
insumos				
costo de fabricación				100%

Precio de venta	\$0,00 kg
interés anual	%

Nombre de la persona que diligencia la encuesta: _____
 Hora y fecha: _____

¡Muchas gracias!

- Para finalizar los análisis solicitamos:
1. Consumos de electricidad por área de producción (kwh/mes) (histórico 2016-2019)
 2. Cantidad de panela diaria producida toneladas/mes (histórico 2016-2019)
 3. Análisis de los gases de chimenea de la caldera y datos de funcionamiento para el mismo periodo

**ENCUESTA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA Y AMBIENTAL
DE DOS TRAPICHES TECNIFICADOS DEL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA**

Producción Energía Eléctrica

Año	t panela/mes	kWh/mes	\$ kWh
ene-16			
feb-16			
mar-16			
abr-16			
may-16			
jun-16			
jul-16			
ago-16			
sep-16			
oct-16			
nov-16			
dic-16			
ene-17			
feb-17			
mar-17			
abr-17			
may-17			
jun-17			
jul-17			
ago-17			
sep-17			
oct-17			
nov-17			
dic-17			
ene-18			
feb-18			
mar-18			
abr-18			
may-18			
jun-18			
jul-18			
ago-18			
sep-18			
oct-18			
nov-18			
dic-18			
ene-19			
feb-19			
mar-19			
abr-19			
may-19			
jun-19			
jul-19			
ago-19			
sep-19			
oct-19			
nov-19			
dic-19			