

Caracterización del proceso de transporte de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) para la producción de panela

Characterization of the sugar cane (*Saccharum Officinarum*) transportation process for non-centrifugal sugar production

Cubillos-Varela, Alfonso¹; Varón-Ramírez, Viviana Marcela¹; Lesmes-Suarez, Juan Carlos¹; Vargas-Díaz, Ruy Edeymar^{1*}

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Tibaitatá, Colombia

Recibido: 29/10/2025 | Aceptado: 05/12/2025 | Publicado: 18/12/2025

Correspondencia*: rvargas@agrosavia.co

RESUMEN

La agroindustria de la producción de panela es el segundo sector agrícola en Colombia, medido según la generación de empleos y el área sembrada. Pese a su contribución en la economía nacional, esta agroindustria enfrenta una serie de problemas tecnológicos que requieren su atención pues algunos de los procesos se siguen desarrollando de forma artesanal. Un ejemplo es el transporte de la caña de azúcar desde los lotes del cultivo hasta el punto de procesamiento o trapiche, el cual se desarrolla normalmente mediante el uso de animales de carga. El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar el proceso de transporte de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de panela, por medio de la definición y medición de unos indicadores logísticos aplicados al transporte de productos agrícolas. La investigación se llevó a cabo durante los meses de abril y octubre del año 2021, en los cinco municipios de mayor producción de panela del departamento de Boyacá (Colombia), mediante el levantamiento y análisis de información de la actividad productiva y el seguimiento en campo del proceso de transporte de caña con el uso de animales de carga. Los resultados permitieron caracterizar y evaluar los métodos actuales de transporte, así como definir una línea base del proceso de transporte de caña a partir de indicadores logísticos de transporte, los cuales sirven como referencia para la comparación, selección o diseño de los nuevos sistemas de transporte para productos agrícolas.

Palabras clave: Animales de carga; indicadores logísticos; procesos productivos; sistemas de transporte

ABSTRACT

The agroindustry of not centrifugal sugar (NCS) production is the second agricultural sector in Colombia, due to its contribution to the generation of jobs and planted area. Despite its contribution to the national economy, this agroindustry faces a series of technological problems that require the modernization of traditional production processes, such as the transportation of sugar cane from the crop plots to the processing point (trapiche), which continues to be developed using pack animals. The objective of this work was to characterize the transportation process of sugar cane (*Saccharum officinarum*) to produce NCS through the definition and measurement of logistical indicators for the transportation of agricultural products. The research was carried out during the months of April and October 2021 in five municipalities in the department of Boyacá (Colombia) where NCS production takes place, through the collection and analysis of information on productive activity and field monitoring of the cane transportation process with the use of pack animals. The results allowed us to characterize, evaluate current transportation methods and define a baseline of the sugarcane transportation process based on logistical transportation indicators, which serve as a reference for the comparison, selection, or design of new transportation systems for agricultural products.

Keywords: Pack animals; logistics indicators; production processes; transportation systems

Cómo citar este artículo: Cubillos-Varela, A., Varón-Ramírez, V. M., Lesmes-Suarez, J. C., Vargas-Díaz, R. E. (2025). Caracterización del proceso de transporte de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) para la producción de panela. *Revista Científica Dékamu Agropec*, 6(2), 57-68. <https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v6i2.370>

1. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de panela o NCS (Non Centrifugal Sugar) se cultiva en 565 municipios, con una participación de más de 350.000 familias. Según cifras de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (2024) esta cadena productiva genera 287.000 empleos directos y ocupa el quinto lugar en el ranking de áreas cultivadas en Colombia. En este contexto, en Colombia existen cerca de 70.000 unidades productivas y 20.000 trapiches dedicados a la producción de panela, en los cuales para el año 2024 según la Federación Nacional de Paneleros (2024) se produjeron 909.993 toneladas, concentrando la producción principalmente en cinco departamentos: Santander, Boyacá, Cundinamarca, Antioquia y Huila, los cuales en conjunto aportan aproximadamente el 64 % del total nacional (OIT, 2025).

A pesar de su importancia, la cadena de la caña de azúcar para la producción de panela, y su agroindustria en Colombia, ha enfrentado una serie de desafíos y problemáticas tecnológicas las cuales requieren el mejoramiento de los procesos productivos tradicionales (Sierra et al., 2022). Es por lo anterior que la cadena requiere la generación de estrategias y planes de acción que le permitan aprovechar de manera integral, sostenible y competitiva su producción generando condiciones más equitativas entre los diferentes eslabones de la cadena (Castellanos Domínguez et al., 2010). Es así como algunos de los procesos en la producción de panela han superado diferentes limitantes tecnológicas y han sufrido actualizaciones o mejoras sustanciales. Por ejemplo, entre las mejoras o actualizaciones se encuentran: las variedades de caña de azúcar para la producción de panela adaptadas a las diferentes condiciones agroclimáticas (Barona-Rodríguez et al., 2020), recomendaciones para el manejo de la fertilización orgánica y mineral (Volverás-Mambuscay et al., 2020) o las mejoras para el aprovechamiento térmico en hornillas paneleras (Velásquez et al., 2019).

A pesar de los diferentes avances, uno de los procesos en la producción de panela que requieren mejoras es el transporte de la caña de azúcar, desde los lotes del cultivo hasta el molino, trapiche o centro de procesamiento, debido a que se desarrolla como lo hacían los primeros productores de panela: mediante el uso de animales de carga. Los registros del uso de animales de carga en Colombia datan del año 1549 cuando se promovió el uso de mulas y bueyes para el transporte de carga y objetos personales entre pueblos vecinos (Alvear Sanín, 2008) práctica que sigue siendo común por los productores campesinos. El generalizado uso de animales de carga se debe, entre otras razones, a la flexibilidad que ofrece este tipo de transporte y a la baja infraestructura logística con que cuenta el país. El problema de la técnica de transporte con animales de carga es que requiere alta mano de obra (cada vez más escasa en la producción agrícola), y genera maltrato animal (Ley 1774 de 2016. Congreso de la república. Ley de protección animal, 2016). Al respecto, (Pulido Blanco, 2014) menciona “*no es inusual que las mulas trabajen en ayunas, no se les realice ningún tipo de cuidado o control de salubridad*”, además de aumentar los costos de producción, reducir la disponibilidad de la materia prima durante la temporada de lluvia y promover la erosión del suelo.

Es debido al bajo desarrollo tecnológico que se presenta en los sistemas de transporte de caña y a la dependencia casi absoluta del transporte con animales de carga, si bien adaptada a las condiciones del terreno accidentado con pendientes altas, carece de indicadores estandarizados que permitan evaluar su eficiencia, comparar su desempeño con alternativas tecnológicas emergentes, o establecer líneas base para la toma de decisiones en materia de innovación logística. Este estudio se desarrolla ante la necesidad imperativa de generar información cuantitativa y cualitativa rigurosa sobre las variables que determinan la productividad del transporte de caña en condiciones de ladera, estableciendo indicadores replicables que no solo permitan optimizar los sistemas actuales, sino que además sirvan como marco de referencia para evaluar la viabilidad

técnica y económica de nuevas propuestas de mecanización o sistemas alternativos de transporte, contribuyendo así a la modernización sostenible del sector panelero colombiano y otros procesos de transporte de productos agrícolas que se desarrollan en situaciones similares.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló entre los meses de abril y octubre del año 2021 en los municipios de Chitaraque, Moniquirá, San José de Paré, Santana y Togüí ubicados sobre la Cordillera Oriental de los Andes colombianos pertenecientes a la provincia de Ricaurte sector bajo del departamento de Boyacá. Los cinco municipios en su conjunto abarcan un área total de 62.062 hectáreas que se destacan por presentar un paisaje de montaña de clima templado semihúmedo (Tsh) (según clasificación Caldas – Lang) con altitudes entre los 1.001 y 2.000 m.s.n.m., temperatura iguales o mayores a 17,5°C e inferiores a los 24°C y valores de precipitación media de 2.115mm/año con tendencia bimodal, y picos entre marzo y mayo, así como en el mes de octubre. A nivel topográfico la zona de estudio presenta un paisaje accidentado y una geomorfología muy variada con relieve que varía de ligeramente quebrado a escarpado con niveles de pendiente que van del 7% al 35% (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca et al., 2018).

Gracias a las características agroecológicas presentes en la zona de estudio (temperatura, distribución de la precipitación y tipo de suelos, entre otras) es un área con alto potencial agrícola, en el que la agroindustria de la caña para la producción de panela encuentra condiciones adecuadas para su cultivo. La agroindustria panelera representa el primer renglón de la economía regional gracias a la continua demanda de mano de obra requerida para desarrollar sus fases de producción. A partir de información recopilada por la Federación Nacional de Paneleros (2021) en la zona de estudio se encuentran 15.226 hectáreas sembradas de caña y se ubican 343 trapiches (puntos de producción de panela).

La metodología utilizada para la caracterización de las unidades productivas (UP), incluyendo las condiciones del proceso de transporte de caña, se desarrolló por medio de dos actividades: i) se realizó la construcción y aplicación de una encuesta semiestructurada con 25 preguntas agrupadas en dos componentes: 1. Características productivas de la UP; y 2. Características del proceso de transporte. En la segunda actividad se realizó la evaluación en campo del proceso de transporte de caña, donde se buscó establecer las condiciones particulares de transporte de caña en cada UP, identificando de esta forma entre otros aspectos: la velocidad de desplazamiento (con y sin carga), distancia, tiempos del proceso (desplazamiento, transporte y muertos) y capacidades de transporte del sistema de transporte utilizado. Se realizaron 46 visitas de diagnóstico en los cinco municipios de estudio: Chitaraque 16 UP, Moniquirá 5 UP, San José de Pare 10 UP, Santana 10 UP y Togüí 5 UP.

En el 100% de las UP analizadas se encontró que el sistema de transporte utilizado se fundamenta en el uso de animales de carga, por lo tanto, la metodología de diagnóstico se ajustó a esta condición. Para la aplicación de la metodología de diagnóstico se determinaron 13 variables de análisis bajo las cuales se desarrolló la caracterización de las UP. Las variables de análisis se presentan en la tabla 1, en el que se presenta el tipo de variable y su descripción.

Tabla 1. Variables de caracterización de las UP y los sistemas de transporte en el área de estudio

Variable	Tipo de variable	Descripción
Municipio	Cualitativa	Identifica el municipio dentro del área de estudio
Género	Cualitativa	Identifica el género del productor a fin de establecer la participación dentro de la agroindustria

Años de dedicación a la actividad	Cualitativa	Identifica la experiencia del productor dentro de la agroindustria.
Ubicación del trapiche en la finca	Cualitativa	Establece la posición del trapiche en la finca con relación a la misma a fin de identificar la dirección de transporte de la caña (cuesta arriba o abajo)
Identificación de la necesidad de otros medios de transporte	Cualitativa	Identifica los requerimientos de implementación de alternativas de transporte de caña
Tipo de hornilla	Cualitativa	Identifica el tipo de hornilla (tradicional o de tecnología CIMPA) instalada en el trapiche para la transformación del jugo de caña
Área sembrada en caña (ha)	Cuantitativa	Hace referencia al área disponible en caña en relación con el área total de la finca
Producción de panela al año (ton/año)	Cuantitativa	Identifica la capacidad de producción del trapiche al año, resulta de la relación de moliendas realizadas por la capacidad productiva del trapiche
Requerimiento productivo (ton/día)	Cuantitativa	Hace referencia a la demanda o cantidad de caña necesaria diariamente, para suprir el requerimiento productivo de la hornilla del trapiche. Resulta del producto de la capacidad productiva de la hornilla por el número de horas de molienda y el factor de conversión de la caña
Capacidad de transporte (ton/día)	Cuantitativa	Identifica la cantidad de caña que es capaz de movilizar la finca bajo el sistema de transporte implementado. Es la relación entre el número de mulas empleadas por el peso promedio de caña transportada por mula
Distancia del recorrido (km)	Cuantitativa	Distancia medida por el recorrido de la mula durante la evaluación
Pendiente del trayecto con carga (%)	Cuantitativa	Establece el porcentaje de pendiente (+) (-) asociado al trayecto de la mula con carga de caña
Carga por mula (kg)	Cuantitativa	Masa de producto que pueden trasladar las mulas

Fuente: Adaptado de (Cubillos, A., et al., 2023).

2.1. Descripción de los indicadores logísticos de transporte

La medición de variables de carácter cuantitativo o cualitativo permiten transformar hechos observables en datos, lo que facilita que una variable pueda obtener registros de la realidad a partir de la construcción de indicadores (Gómez Rojas & Grinspun, 2020), los cuales dependiendo su campo de acción han sido definidos de forma diversa. Bajo estas consideraciones, en el desarrollo del presente trabajo se usó la definición de indicador establecida por el DANE de Colombia (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2012), el cual señala que un indicador es “una expresión cualitativa o cuantitativa observable, que permite describir características, comportamientos o fenómenos de la realidad a través de la evolución de una variable o el establecimiento de una relación entre variables, la que, comparada con períodos anteriores, productos similares o una meta o compromiso, permite evaluar el desempeño y su evolución en el tiempo”.

En este sentido, los indicadores logísticos de transporte son una serie de parámetros propuestos que describen las condiciones productivas y tecnológicas inherentes al proceso de transporte de carga que se realizan en la producción de panela, y que se puede aplicar a otros productos agrícolas. Los indicadores logísticos se utilizan como criterios de evaluación del método actual de transporte (humano, animal de carga o sistema mecánico) y los factores que se deben tener en cuenta para la selección o diseño de los nuevos sistemas de transporte. Además, sirven como base para realizar comparación de desempeño, tanto en diferentes regiones, momentos, e incluso otros productos agrícolas. Los indicadores propuestos se listan y describen en la tabla 2.

Tabla 2. Indicadores logísticos productivos y tecnológicos

Parámetro y unidad de medición	Descripción	Interpretación
1. Carga por tipo de transporte (kg/viaje)	Masa de producto que se puede trasladar con el método actual de transporte (en este estudio: los animales de carga). Depende principalmente de las condiciones del terreno y de las capacidades del sistema de transporte utilizado.	Permite estimar o definir la capacidad por cada viaje del sistema de transporte utilizado. Este valor va a ser diferente si se utilizan personas, animales de carga o medios mecánicos de transporte.
2. Requerimiento productivo (ton/día)	Cantidad de carga o producto que se debe transportar en un día de trabajo para cumplir con los requerimientos del proceso.	Permite estimar el tamaño del sistema productivo, y se toma como la cantidad de producto que el productor necesita para realizar su operación.
3. Productividad logística (t / (km día))	Cantidad de carga o producto que el sistema de transporte puede mover en un día de trabajo desde un kilómetro de distancia.	Sirve como referencia para especificar la capacidad de transporte del sistema o medio de transporte utilizado.
4. Costo de transporte (COP/ (t km))	Valor pagado por el productor para transportar la carga de producto, que depende de la distancia, los gastos fijos y otras variables. (COP, pesos colombianos)	—
5. Velocidad de transporte (km/h)	Velocidad en que se puede movilizar el producto (viaje).	Se utiliza para definir la agilidad del medio de transporte utilizado.
6. Relación efectiva de tiempo (-)	Tiempo del sistema de transporte mientras lleva la carga, con relación al tiempo total del recorrido que incluye: ida, vuelta, cargue, descargue y tiempos muertos.	Se utiliza como una relación para definir la eficiencia del sistema utilizado, pues se espera que el medio de transporte utilice el mayor tiempo posible transportando producto.
7. Costo logístico (%)	Relación del costo del transporte de caña respecto al precio del producto terminado.	

Fuente. Adaptado de (Cubillos, A., et al., 2023)

2.2. Análisis de datos

Se utilizó el análisis de componentes principales (ACP) con el propósito de especificar, de las variables cuantitativas, cuáles están menos correlacionadas y, por lo tanto, las más representativas del estudio. Esta es una metodología de tipo matemático para la cual no es necesario asumir distribución probabilística alguna y permite generar nuevas variables (combinaciones lineales) que expresan la información contenida en el grupo original de datos (Greenacre et al., 2022).

Las nuevas variables que genera el ACP se denominan componentes principales (CP) y tienen algunas características estadísticas deseables como: los CP no están correlacionados y si, además, se supone multinormalidad son independientes. Cada CP sintetiza la máxima variabilidad residual contenida en los datos (Vargas Díaz, 2019). Para profundizar en los fundamentos de esta técnica se sugiere (Mardia et al., 2024; Hahs-Vaughn, 2025).

Las variables cuantitativas (tabla 1) se resumieron usando ACP, por lo tanto, se generan nuevas variables que contengan la mayor parte de la variabilidad de los datos, facilitando la descripción de los productores encuestados. Para esto, se hizo uso de la función dudi.pca de la librería ade4 (Dray & Dufour, 2007) del software estadístico R.

3. RESULTADOS

En la figura 1 se identifican las correlaciones lineales entre las variables de caracterización y los indicadores de transporte. Se identifica una correlación clave en la que, a mayor requerimiento

productivo, es decir una mayor capacidad de la hornilla, las UP aumentan su capacidad de transportar caña al trapiche ($r=0,67$). Sin embargo, este aumento de la capacidad de transporte no se debe al aumento de la velocidad de los transportes ($r=0,08$), a un mejor uso del tiempo ($r=-0,17$), o a una reducción de la distancia entre el trapiche y el lote ($r=-0,06$), si no, al aumento de la productividad logística ($r=0,53$) seguramente a través del aumento del número de mulas y peso de carga que transportan (0,62). Finalmente, una mayor cantidad de panela producida al año por parte de la UP implica un aumento de su capacidad de transporte ($r=0,52$) y de su requerimiento productivo ($r=0,62$).

Por otra parte, el costo de transporte tuvo una correlación negativa con la distancia ($r=-0,77$) y la productividad logística ($r=-0,66$), lo que indica que entre menor es la distancia entre el lote y el trapiche es más costoso transportar cada tonelada de caña; también, entre menor cantidad de caña llega al trapiche a diario mayor es el costo del transporte de la caña, posiblemente por un menor número de recorridos realizados respecto de la cantidad de viajes posibles. En contraste y diferente a lo esperado, el costo de transporte no tuvo correlación con la velocidad de desplazamiento ($r=-0,01$), ya que este indicador fue estimado únicamente durante un recorrido desconociendo tiempos de alimentación y cansancio tanto de los operarios como de los animales. Como la variable velocidad desplazamiento no presenta correlaciones significativas, no se tuvo en cuenta en análisis de componentes de principales.

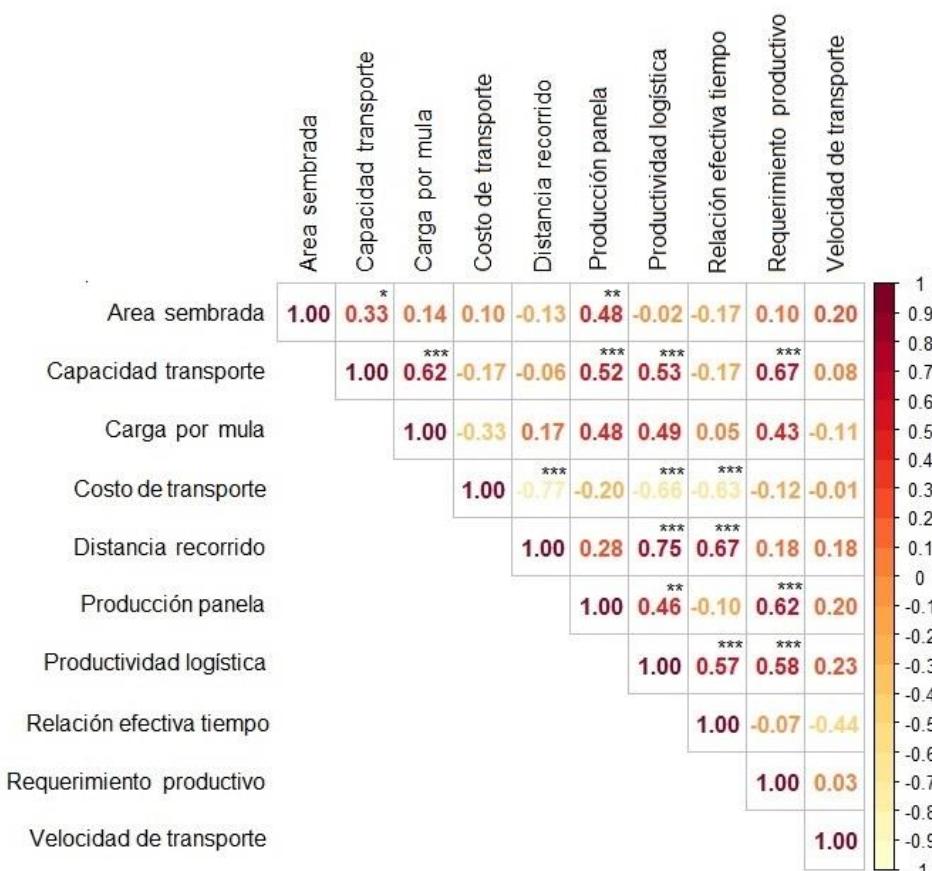


Figura 1. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson de variables de caracterización productiva.
Significancia *** $<0,001$, ** $<0,01$ y * $<0,05$

El primer componente principal (C1) explica el 37,31% de la variabilidad (Figura 2) y está asociado en mayor medida con la productividad logística y distancia en sentido inverso y el costo de transporte en sentido directo. Esto indica que si hay distancias cortas y la cantidad de carga es pequeña, los

costos que agricultor paga por esas labores se incrementan. El componente principal dos (C2) representa el 23,46% de varianza y hace referencia a la relación efectiva del tiempo en sentido directo, mientras que el área sembrada, la capacidad de transporte y requerimiento productivo en sentido inverso. Lo anterior indica que los tiempos de transporte se disminuyen entre más caña de azúcar se tenga sembrada y se cuente con mejores capacidades de carga de esa caña. El primer componente hace referencia a la parte logística, mientras que el segundo tiene relación con consideraciones técnicas de la producción de panela (área sembrada, producción y capacidad de transporte).

En la figura 2 se observa cómo se resalta la relación entre sí de las variables: producción de panela, capacidad de transporte, área sembrada y requerimiento productivo, las cuales se relacionan de forma directa, es decir, si se incrementa el valor en alguna de esas variables las otras también aumentan. Aunque, para el costo de transporte y la relación efectiva de tiempo no se presenta una relación directa.

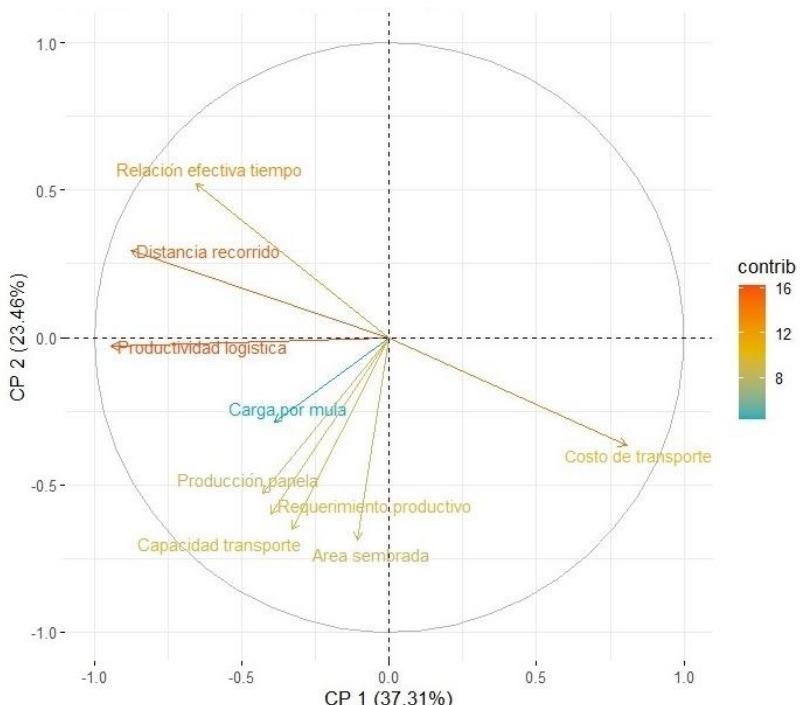


Figura 2. Biplot para los componentes principales (CP) 1 y 2

4. DISCUSIÓN

4.1 Estadísticos descriptivos para las variables cuantitativas

En el caso de la producción de panela y el transporte de caña con el uso de animales de carga se identifica que las UP analizadas presentan un área promedio de $27,31 \pm 18,43$ ha sembradas con caña. La producción de panela es de $257,29 \pm 217,42$ t/año, valores que son equiparables con los reportados por (Rodríguez-Borray, 2008) quien señalaba que en la Hoya del Río Suarez las fincas con trapiche tenían en promedio 37,5 ha sembradas en caña y producciones medias de panela de 268,3 t/año.

El requerimiento productivo de caña encontrado, es decir la cantidad de producto que se debe transportar en un día, fue de $28,16 \pm 7,53$ t/día. Como referencia de comparación la capacidad de producción de panela para medianos productores (Rodríguez-Borray, 2008) está entre 120 y 200 kg/h; asumiendo un factor de conversión (panela/caña) del 10% y una jornada de producción de 24 horas, como se realiza en esta zona de producción, se encuentra un consumo de caña o materia

prima entre 28,8 y 48 t/día. Desde el punto de vista logístico, el requerimiento productivo es la base para el diseño de cualquier sistema de transporte propuesto para caña en la producción de panela en la zona de estudio, pues debe cumplir con este requerimiento mínimo de carga.

La capacidad de transporte de caña con el uso de mulas es de $26,43 \pm 11,83$ t/día, valor que es menor al requerimiento productivo descrito previamente. En contraste, Mendieta Menjura et al. (2024) reportan una capacidad de transporte de caña de 14,4 ton/día en una unidad productiva del municipio de Santana (Boyacá). Esto explica la razón por la cual en la producción de panela se empieza el transporte de caña algunos días antes de empezar el procesamiento de la panela, actividad a la que se le denomina “apronte” (en general el apronte se realiza dos o tres días antes de empezar la molienda de caña).

La capacidad de transporte se puede comparar con otros sistemas de transporte adecuados a similares condiciones topográficas del terreno. Por ejemplo, el uso de sistemas de transporte por cable tipo tarabita puede ser una alternativa viable desde el punto de vista técnico. (Mejia Vargas, 2011) desarrolló un sistema tipo bicable de 430 metros, capacidad de 400 kg y velocidad máxima de 1.5 m/s. Con estos datos se puede obtener una carga cada 10 minutos, y por lo tanto 6 cargas cada hora, lo que permite obtener una capacidad de transporte de 19,2 t/día. Este valor es bajo y no podría cumplir con los requerimientos para el caso de estudio.

En este estudio se identifican distancias medias recorridas por las mulas de $0,71 \pm 0,41$ km, esto indica el radio medio de acción de un molino para la producción de panela, es decir, alrededor de un molino de producción de panela, se acopia caña de un radio promedio de 0,71 km. Esta distancia contrasta con la reportada por (Mendieta Menjura et al., 2024) en la que describen un recorrido con mulas de hasta 2 km.

Según los comentarios personales de algunos productores, cuando la distancia de acopio aumenta de forma significativa, los costos se elevan a puntos en los que la producción de panela se vuelve inviable desde el punto de vista económico. Esto se puede verificar con el indicador de costo de transporte (COP / t km) el cual al aumentar la distancia se aumenta también la relación costo por tonelada transportada (COP / t).

En cuanto a los indicadores productivos se encontró que las mulas se desplazan a una velocidad media de $4,28 \pm 1,6$ km/h, valor que se asemeja a los reportado por (Napolitano et al., 2022) quienes señalan que la velocidad de desplazamiento de una mula es de 1 m/s o 3,6 km/h. La productividad logística promedio fue de $18,78 \pm 14,05$ t / (km día), el costo de transporte promedio fue de 32,21 \pm 20,34 COP/ (t km), valor que sirve como base para evaluar nuevas propuestas mecanizadas de sistemas de transporte, por ejemplo, los sistemas de transporte por cable, tanto para caña como para el transporte de otros productos agrícolas.

4.2 Frecuencias y porcentaje por respuesta de las variables cualitativas

Con relación a las variables sociodemográficas, se pudo observar que la mayor parte de las personas encargada de las UP son hombres (90,91%) con más de 20 años de dedicación (76,92%) a la actividad de producción de panela. Por otra parte, el 63,64% de las UP conservan las hornillas tradicionales con una capacidad de $100,28 \pm 16,18$ kg/h de panela y el 36,36% tienen hornillas tipo Cimpa con una capacidad productiva de $146,06 \pm 29,77$ kg/h de panela, estas tecnologías son predominantes para la producción de panela (Rodríguez et al., 2018). Respecto a la ubicación del trapiche dentro de las UP, el 54,76% de estos se ubican en la parte media, es decir la dirección de la carga de caña desde los lotes hasta el trapiche puede ser en subida o bajada.

La producción de panela al año es la característica de mayor variación (CV 84,5%), ya que intervienen factores como el área sembrada (CV 67,5%), si la UP presta el servicio de maquila o no,

la frecuencia y número de días que este opera. Por otra parte, el indicador de productividad logística presentó también una alta variabilidad (CV 74,7%), lo que indica también un comportamiento diferencial entre los factores que en ella intervienen (carga por mula, número de viajes diarios y la distancia lote-trapiche). En contraste, el requerimiento productivo es la característica productiva de menor variación (CV 26,7%), mostrando que en general los trapiches del área de estudio son similares en cuanto a su capacidad (kg/h de panela) y, por tanto, también lo es la cantidad de caña que se debe aprontar.

4.3 Definición y cálculo de costo logístico

Para el análisis del costo logístico se pretendió seleccionar un parámetro que permita comparar este costo, tanto en el tiempo como con otros productos agrícolas, sectores industriales, regiones, o incluso diferentes tipos de monedas. Por esta razón, se propone el uso del indicador “costo logístico” utilizado por la Encuesta Nacional Logística 2020 (Departamento Nacional de Planeación, 2020), en la que el costo logístico se calcula en Colombia, y otros países, como porcentaje de las ventas del mismo producto. Del total de empresas que miden su costo logístico, el promedio en Colombia reportado para este indicador en el año 2020 es del 12,6%. Al comparar de forma relativa las ventas de las empresas por actividades económicas, las actividades agropecuarias presentan un costo logístico del 22,3%.

Teniendo en cuenta que el costo de transporte encontrado en este estudio es en promedio de 32.214 COP / (t km), y si se asume una relación de 1/10 kg de panela – kg de caña, valor dentro del rango (Ramírez Durán et al., 2014), entonces se puede asumir que el costo de transporte en toneladas de panela es de 322.140 COP / (t km). Ahora bien, en el estudio se encontró que la distancia media recorrida por una mula es de 0,71 km, por lo que, aplicando esta distancia, se obtiene un costo de transporte interno promedio de 228.719 COP/t. El valor de pago a productor para panela reportado por Fedepanela para el 2021 fue de 3.248.000 COP/t (Federación Nacional de Paneleros, 2021), por lo que se obtiene una relación del 7,04% del costo logístico en relación con el precio de pago a productor en la misma zona y periodos de tiempo similares.

La estimación del costo logístico basada en el indicador propuesto por la Encuesta Nacional Logística permite contextualizar el transporte interno de caña panelera dentro de los estándares nacionales y del sector agropecuario. Al convertir el costo de transporte obtenido en este estudio a su equivalente por tonelada de panela y relacionarlo con la distancia media recorrida, se determina un costo promedio de 228.719 COP/t, lo que representa el 7,04% del valor pagado al productor. Este resultado evidencia que, aunque el costo logístico del transporte interno en las unidades paneleras es significativo, se mantiene por debajo del promedio nacional reportado para las actividades agropecuarias (22,3%) y del promedio general empresarial (12,6%). En consecuencia, el análisis muestra que el transporte interno, si bien constituye un componente relevante del costo de producción, no representa una carga frente a los márgenes característicos de la cadena panelera, lo que aporta una referencia sólida para futuras comparaciones sectoriales y regionales.

CONCLUSIONES

Este trabajo se realizó una caracterización completa del proceso logístico utilizado por los productores de panela para el transporte de la caña de azúcar desde el cultivo hasta el centro de producción de panela. Esta caracterización incluyó tanto variables cuantitativas como cualitativas, y permitió establecer una línea base para el análisis de las condiciones de transporte de la caña de azúcar para la producción de panela con el uso de animales de carga. Esto se logró con la definición y medición de una serie de indicadores logísticos que pueden ser utilizados como herramientas

para mejorar los mecanismos actuales de transporte, pues permitieron identificar las variables que tienen mayor incidencia en la productividad del sector.

Se espera que los indicadores logísticos propuestos sirvan como referencia para estudios que permitan mejorar la productividad del proceso logístico agrícola, no sólo en el transporte de caña para la producción de panela, sino además de otros productos agrícolas producidos en condiciones de ladera. Es por esta razón que se recomienda ampliar este tipo de estudios en otras zonas del país, e incluso en otros países y que permita comparar los principales indicadores, o extender este estudio a otros productos agrícolas. Estos análisis comparativos permitirían identificar buenas prácticas en el proceso logístico. Por otro lado, servirán como base para proponer otras estrategias o sistema de transporte de productos agrícolas en condiciones de ladera.

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA y a la Gobernación de Boyacá, a través del Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas, por la financiación del proyecto “Diseño y validación de un sistema de transporte de caña panelera por cable en el departamento de Boyacá código 710686578668”.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen implicaciones éticas, ni conflictos de interés financieros o no financieros que podrían haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Cubillos-Varela, A.

Curación de datos: Lesmes-Suarez, J. C., Varón-Ramírez, V. M.

Ánalisis formal: Cubillos-Varela, A., Lesmes-Suarez, J. C., Varón-Ramírez, V. M., Vargas-Díaz, R. E.

Investigación: Cubillos-Varela, A., Lesmes-Suarez, J. C., Varón-Ramírez, V. M.

Metodología: Cubillos-Varela, A., Lesmes-Suarez, J. C., Varón-Ramírez, V. M., Vargas-Díaz, R. E.

Software: Lesmes-Suarez, J. C., Vargas-Díaz, R. E.

Redacción - borrador original: Cubillos-Varela, A., Lesmes-Suarez, J. C., Varón-Ramírez, V. M., Vargas-Díaz, R. E.

Redacción - revisión y edición: Cubillos-Varela, A., Lesmes-Suarez, J. C., Varón-Ramírez, V. M., Vargas-Díaz, R. E.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvear Sanín, J. . (2008). *Historia del transporte y la infraestructura en Colombia, 1492-2007* (Vol. 2008).

Barona-Rodríguez, A. F., Insuasty-Burbano, O. I., Viveros-Valens, C. A., Ángel-Sánchez, J. C., & Ramírez-Durán, J. (2020). Evaluación de cultivares de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) para producción de panela en el departamento de Boyacá, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 23(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1298>

Castellanos Domínguez, O., Torres Piñeros, L. M., & Hernando Flórez, D. (2010). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la panela y su agroindustria en Colombia*.

<http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/agenda-prospectiva-de-investigacion-y-desarrollo-tecnologico-para-la-cadena-productiva-de-la-panela-y-su-agroindustr.pdf>

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Corporación Autónoma Regional de Santander, & Corporación Autónoma Regional de Boyacá. (2018). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río medio y bajo suárez - NSS 2401-02*. 1–8. <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2018/10/Resolucion-conjunta-2110-del-2018.pdf>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2012). *Introducción al diseño, construcción e interpretación de indicadores*.

Departamento Nacional de Planeación. (2020). *Encuesta Nacional de Logística 2020*.

Dray, S., & Dufour, A.-B. (2007). The ade4 Package: Implementing the Duality Diagram for Ecologists. *Journal of Statistical Software*, 22(4). <https://doi.org/10.18637/jss.v022.i04>

Federación Nacional de Paneleros. (2021). *Costos de producción por hectárea con cultivo*.

Federación Nacional de Paneleros. (2024). *Informe proyecciones 2024. Áreas, rendimiento y producción para 2024. Caña panelera y panela*.

Gómez Rojas, G., & Grinspun, M. (2020). El uso de los índices y las tipologías en la construcción de indicadores complejos. In *Metodología de la investigación, ¿para qué?* <https://doi.org/10.2307/j.ctvxcrxz.8>

Greenacre, M., Groenen, P. J. F., Hastie, T., D'Enza, A. I., Markos, A., & Tuzhilina, E. (2022). Principal component analysis. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1), 100. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00184-w>

Hahs-Vaughn, D. L. (2025). *Applied Multivariate Statistical Concepts - 2nd Edition*. <https://www.routledge.com/Applied-Multivariate-Statistical-Concepts/Hahs-Vaughn/p/book/9781032276076>

Mardia, K. V., Kent, J. T., & Taylor, C. C. (2024). *Multivariate Analysis*. John Wiley & Sons, Inc. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26050-7_225-2

Mejía Vargas, A. F. (2011). *Diseño y construcción de un sistema de transporte de carga por medio de cables para topografía de gran pendiente*. http://ridum.umanizales.edu.co:8080/jspui/bitstream/6789/377/4/Muñoz_Zapata_Adriana_Patrícia_Artículo_2011.pdf

Mendieta Menjura, O. A., Ramírez Durán, J., Tauta-Muñoz, J. L., Flórez Martínez, D. H., Lesmes Suárez, J. C., Gómez Latorre, D. A., Prada Forero, L. E., Cuellar Entrena, M., Rueda Gensini, L., Cruz Jiménez, J. C., Muñoz Camargo, C., Ramírez Gómez, M. M., Serralde Ordóñez, D. P., Peñaranda Rolón, A. M., Aguilar Rivera, N., Sierra González, J. H., Vargas Díaz, R. E., Murcia Contreras, G. A., Peraza Castaneda, E. H., ... Cummings, A. R. (2024). *Avances de investigación para la agroindustria panelera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.investigation.7407501>

Napolitano, F., Mota, D., Orihuela, A., Braghieri, A., Hufana-duran, D., Strappini, A., Pereira, A. M., Ghezzi, M., Guerrero, I., & Martínez-Burnes, J. (2022). *El búfalo de agua en las américa. Comportamiento y productividad*.

OIT. (2025). *Caracterización de condiciones sociodemográficas, de salud y de trabajo en la caña de azúcar para la producción en panela en Colombia*.

Pulido Blanco, V. C. (2014). *El amargo sabor de la caña o sobre una sociedad basada en el sufrimiento animal*.

Ramírez Durán, J., Insuasty Burbano, O., & Viveros Valens, C. A. (2014). Comportamiento agroindustrial de diez variedades de caña de azúcar para producción de panela en Santander, Colombia. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 15(2), 183–195. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num2_art:358

- Rodriguez-Borray, G. (2008). La diversification productive comme stratégie d'activation de Systèmes agroalimentaires localisés : cas de l'agro-industrie de la panela en Colombie. *Cahiers Agricultures*, 17(6), 572–576. <https://doi.org/10.1684/agr.2008.0246>
- Rodríguez, J., Velásquez, F., Espitia, J., Escobar, S., & Mendieta, O. (2018). Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization. *Energy*, 152, 858–865. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127>
- Sierra, D., Cubillos-Varela, A., & Franco, C. (2022). Analysis of sugarcane production and transportation in Hoya del Río Suárez from a life cycle perspective. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(10), 3303–3315. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02380-4>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2024). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales - EVA*. <https://upra.gov.co/es-co/eva>
- Vargas Díaz, R. E. (2019). *Zonificación de la Hoya del Río Suárez por propiedades físicas del suelo, para el cultivo de caña panelera*.
- 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. *Journal of Food Engineering*, 255, 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.009>
- Volverás-Mambuscay, B., González-Chavarro, C. F., Huertas, B., Kopp-Sanabria, E., & Ramírez-Durán, J. (2020). Efecto del fertilizante orgánico y mineral en rendimiento de caña panelera en Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 547–565. <https://doi.org/10.15517/am.v31i3.37334>