

**Modelo de optimización del transporte de la panela adaptado a las condiciones locales de
Sandóná, Nariño**

Mauro Albeiro Bravo Gaviria

Asesor

Wilber Girseaho Mendez Zotaquirá

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Maestría en Logística y Redes de Valor

2026

Dedicatoria

A mis hijos Emma y Maximiliano por ser la fuente de amor puro que guían mis acciones.

Resumen

El proyecto se desarrolló en Sandoná (Nariño), principal productor de panela a nivel departamental y quinto a nivel nacional, donde cañicultores y jornaleros dependen de la producción y comercialización de este producto. Uno de los factores que afecta la rentabilidad de la panela es la ineficiencia en su transporte desde las empresas paneleras de Sandoná hacia las principales plazas de mercado, problema que se abordó mediante un modelo de optimización del transporte. El objetivo consistió en analizar el proceso logístico de la distribución de la panela mediante un modelo de transporte utilizando el método simplex. Se analizaron cinco empresas paneleras (oferta) y cinco plazas de mercado (clientes), el modelo mejorado se aplicó en cinco momentos durante el año 2025. Se obtuvieron los costos, variables de la operación, restricciones de suministro y de demanda, se determinó la función objetivo de minimización, la cual se solucionó a través del programa LINGO 21.0. En el modelo se relacionaron 25 variables, 5 restricciones de demanda y 5 restricciones de suministro. La solución del modelo permitió determinar un costo mínimo optimizado de \$193.020.000 en enero, \$193.120.000 en abril, \$193.200.000 en julio, \$195.070.000 en octubre y \$196.420.000 en diciembre, además, se concluyó que, de las cinco empresas paneleras, 4 deben operar a su máxima capacidad excepto el trapiche El Saman que debe operar al 75%. Las rutas óptimas fueron Las Delicias → Cali, El Saman → Ibagué, La Avispa → Medellín y Bogotá, Villa Inés → Neiva y Medellín, El Vergel → Ibagué y Neiva. En los cinco cortes la aplicación del modelo significó un ahorro de \$2.600.000 con respecto al sistema no optimizado. El análisis de escenarios mostró que ante escenarios adversos la configuración de rutas no cambia. Se recomendó explorar otros modelos, incluir otras variables, realizar análisis de inversiones y aplicar el modelo en años sucesivos para optimizar recursos.

Palabras clave: Modelos de transporte, Optimización logística, Caña panelera,
Distribución agropecuaria

Abstract

The study was conducted in Sandoná (Nariño, Colombia), the leading panela-producing municipality at the departmental level and the fifth nationwide, where sugarcane growers and agricultural workers depend on the production and commercialization of this product. One of the main factors affecting panela profitability is the inefficiency in its transportation from local panela-processing facilities to major wholesale markets. This issue was addressed through a transportation optimization model. The objective of the study was to analyze the logistical distribution process of panela using a transportation model based on the simplex method. Five panela-producing companies (supply nodes) and five wholesale market plazas (demand nodes) were analyzed. The improved model was applied at five different time points during 2025. Operational costs, decision variables, and supply and demand constraints were identified, and a cost-minimization objective function was formulated and solved using LINGO 21.0 software. The model included 25 decision variables, 5 demand constraints, and 5 supply constraints. The results showed optimized minimum costs of COP \$193,020,000 in January, \$193,120,000 in April, \$193,200,000 in July, \$195,070,000 in October, and \$196,420,000 in December. Additionally, it was determined that four of the five panela-processing plants should operate at full capacity, while the El Saman facility should operate at 75%. The optimal routes were identified as follows: Las Delicias → Cali, El Saman → Ibagué, La Avispa → Medellín and Bogotá, Villa Inés → Neiva and Medellín, and El Vergel → Ibagué and Neiva. Across the five evaluation periods, the implementation of the model resulted in savings of COP \$2,600,000 compared to the non-optimized system. Scenario analysis indicated that route configuration remains stable even under adverse conditions. Finally, it is recommended to explore alternative

models, incorporate additional variables, conduct investment analyses, and apply the model in subsequent years to further optimize resources.

Keywords: Transportation models, Logistical optimization, Sugarcane for panela, Agricultural distribution.

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| Introducción | 14 |
| Pregunta de Investigación..... | 16 |
| Preguntas Específicas..... | 16 |
| Marco Teórico y Conceptual..... | 17 |
| Teorías de Supply Chain Management (SCM) y Redes de Valor | 17 |
| Modelos de Transporte y Optimización | 17 |
| Definición del Problema de Transporte..... | 18 |
| Enfoques Metodológicos Principales | 19 |
| Aplicaciones Prácticas Más Comunes..... | 19 |
| Marco Conceptual | 20 |
| El Método Simplex en el Transporte..... | 20 |
| Ventajas y Limitaciones del Método Simplex..... | 21 |
| Limitaciones Prácticas en Logística Agropecuaria | 23 |
| Limitaciones del Método Simplex | 23 |
| Comparaciones con Otros Métodos de Optimización..... | 24 |
| Implicaciones para Diseño de Políticas y Operaciones Locales | 25 |
| Antecedentes en Logística del Transporte..... | 25 |
| Tendencias de Investigación Recientes y Desarrollos Innovadores | 25 |
| Casos de Estudio Destacados | 26 |
| Casos de Estudio Específicos del Método Simplex | 27 |
| Objetivos..... | 29 |
| Objetivo General..... | 29 |

| | |
|--|----|
| Objetivos Específicos..... | 29 |
| Metodología | 30 |
| Localización | 30 |
| Tipo de Organización | 30 |
| Ámbito Geográfico..... | 31 |
| Horizonte Temporal..... | 31 |
| Método | 31 |
| Análisis de Costos de Producción y Transporte | 32 |
| Diseño del Modelo de Optimización de la Distribución de la Panela..... | 32 |
| Validación del Modelo Mejorado..... | 32 |
| Construcción del Diagrama de Red..... | 33 |
| Determinación de Variables..... | 33 |
| Planteamiento de la Función Objetivo | 33 |
| Identificación de las Restricciones | 33 |
| Procesamiento de Datos | 34 |
| Análisis de Sensibilidad | 34 |
| Análisis de Escenarios Posibles | 35 |
| Escenario Base | 35 |
| Escenario Optimista | 36 |
| Escenario Pesimista..... | 36 |
| Escenario de Shock | 36 |
| Análisis Económico Marginal | 37 |
| Resultados y Discusión..... | 38 |

| | |
|---|----|
| Análisis de Costos de Producción y Transporte | 38 |
| Costo de la Producción de Panela | 38 |
| Costo del Transporte..... | 39 |
| Diseño del Modelo de Transporte Adaptado a las Condiciones Locales | 41 |
| Función Objetivo Adaptado a la Producción Panelera de Sandoná | 41 |
| Restricciones Adaptadas a las Condiciones Locales | 42 |
| Validación del Modelo Simplex Aplicado a la Logística del Transporte Panelero | 43 |
| Cálculo de la Demanda de la Panela | 44 |
| Costos y Capacidad de Producción | 45 |
| Costos del Transporte | 46 |
| Costo Total de la Operación (Producción + Flete) | 48 |
| Diseño del Diagrama de Red..... | 50 |
| Identificación de Variables de Decisión | 51 |
| Función Objetivo Adaptado a las Condiciones Locales de Sandoná | 53 |
| Planteamiento de las Restricciones | 55 |
| Solución de la Función Objetivo | 55 |
| Asignación Óptima de los Envíos | 57 |
| Análisis de Sensibilidad - Factibilidad..... | 62 |
| Análisis de Sensibilidad - Optimalidad..... | 64 |
| Análisis Económico..... | 64 |
| Análisis de Escenarios Sobre la Base Óptima..... | 65 |
| Asignación Óptima..... | 65 |
| Análisis Escenario Optimista (-10% flete)..... | 65 |

| | |
|--|----|
| Pesimista (+20% Flete, -10% Demanda, -10% Capacidad) | 65 |
| Shock (+50% Flete, Red Tensionada) | 66 |
| Comparativo de Precios Sombra | 66 |
| Análisis de Escenarios Posibles e Impacto Económico (Únicamente Transporte)..... | 68 |
| Conclusiones | 71 |
| Recomendaciones | 73 |
| Referencias Bibliográficas | 74 |
| Apéndices..... | 80 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Escenarios Posibles para el Modelo de Transporte de Panela en Sandoná</i> | 35 |
| Tabla 2 <i>Distancia, Tiempo, Costo de Movilización y Peajes</i> | 39 |
| Tabla 3 <i>Demanda por Ciudad y Presentación de la Panela Durante el Año 2025</i> | 44 |
| Tabla 4 <i>Costos Unitarios y Capacidad de Producción por Empresa Panelera en Sandoná, 2025</i> | 45 |
| Tabla 5 <i>Costos Unitarios de Transporte de Panela de las Empresas Paneleras en Sandoná, 2025</i> | 47 |
| Tabla 6 <i>Costos Unitarios de Producción y Transporte de Panela, 2025</i> | 48 |
| Tabla 7 <i>Variables de Decisión del Modelo Para la Optimización del Transporte de Panela</i> | 51 |
| Tabla 8 <i>Función Objetivo del Modelo de Transporte de Panela, 2025</i> | 54 |
| Tabla 9 <i>Restricciones Para el Modelo Simplex Adaptado a las Condiciones de Sandoná, 2025</i> | 56 |
| Tabla 10 <i>Resultados de la Optimización del Transporte de Panela en Sandoná, 2025</i> | 57 |
| Tabla 11 <i>Asignación Optima del Modelo de Transporte Panelero en Sandoná, 2025.</i> | 58 |
| Tabla 12 <i>Asignación no Optimizada del Modelo de Transporte Panelero en Sandoná, 2025.</i> ... | 61 |
| Tabla 13 <i>Restricciones de Oferta Durante el Análisis de Sensibilidad Panelero (kg)</i> | 62 |
| Tabla 14 <i>Restricciones de Demanda Durante el Análisis de Sensibilidad Panelero (kg)</i> | 63 |
| Tabla 15 <i>Precios Sobra del Modelo Simplex</i> | 64 |
| Tabla 16 <i>Precios Sombra de Oferta por Escenario</i> | 66 |
| Tabla 17 <i>Precios Sombra de Demanda por Escenario</i> | 67 |
| Tabla 18 <i>Comparación del Costo Entre Escenarios- Solo Transporte</i> | 68 |
| Tabla 19 <i>Empresas con Capacidad Crítica - Precio Sombra por Escenario – Oferta</i> | 69 |
| Tabla 20 <i>Precio Sombra por Ciudad - Análisis Comparativo del Precio Sombra – Demanda</i> ... | 70 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figura 1 | <i>Red de Transporte Para la Distribución de Panela Desde Sandoná, Nariño.....</i> | 50 |
|-----------------|--|----|

Lista de Apéndices

| | |
|---|-----|
| Apéndice A <i>Modelos en el Programa LINGO 21.0 Para Costo de Transporte Incluido el Costo de Producción por Kilogramo en los Cinco Cortes Temporales del Año 2025</i> | 80 |
| Apéndice B <i>Modelos en el Programa LINGO 21.0 Para Costo de Transporte Incluido el Costo de Producción por Kilogramo para Tres Escenarios Futuros</i> | 95 |
| Apéndice C <i>Modelos en el Programa LINGO 21.0 para Análisis de Escenarios Únicamente Para Costo de Transporte por Kilogramo</i> | 104 |

Introducción

Después del café, la producción y comercialización de panela es el segundo generador de jornales en el campo colombiano, por lo que representa una actividad económica y social de gran importancia, especialmente en el municipio de Sandoná en el departamento de Nariño, que se posiciona como el principal productor a nivel departamental y quinto a nivel nacional (Bravo & Castro, 2023) con un área sembrada de 2.504 ha y 13.758 t (Fedepanela, 2024). En este contexto, la producción panelera se constituye como uno de los principales renglones de la economía local, integrando a más de la mitad de la población local (Bravo & Castro, 2023).

A pesar de la importancia de la panela en este municipio, los precios se han mantenido estables con tendencia a la baja durante la última década, afectando la rentabilidad y economía en el pueblo, lo que se traduce en inseguridad alimentaria y pobreza en la zona, esto crea la necesidad de optimizar recursos para la generación de un margen de ganancia mínimo para los cañicultores de esta región. Estudios recientes en investigación de operaciones han demostrado que la aplicación del método simplex en problemas de optimización de transporte permite una reducción significativa de costos y una asignación más eficiente de recursos en cadenas logísticas similares (Hassan & Masrom, 2022; Loor et al., 2012; Prokudin et al., 2022).

La economía sandoneña depende de la cadena logística consecuente del comercio y transporte de la panela desde el municipio hasta las principales plazas de mercado del centro del país, pero, el traslado de la panela desde los trapiches en Sandoná hasta las plazas de mercado se enfrenta a problemas críticos relacionados con la logística, donde el costo y la ineficiencia del transporte constituyen factores determinantes que inciden negativamente en los márgenes de utilidad de los comerciantes y productores locales. Al respecto Zapata et al. (2020) indican que el transporte es el responsable aproximadamente del 50% de los costos logísticos. Este escenario se

agrava debido a la falta de modelos específicos que permitan optimizar la distribución y minimizar los costos logísticos en esta cadena de suministro.

Así, la ausencia de modelos óptimos de transporte genera ineficiencia y pérdida de recursos en la comercialización de la panela que pueden desembocar en un mal negocio.

Por lo anterior, este proyecto aplicado buscó implementar el método simplex de investigación de operaciones para desarrollar un modelo de transporte adaptado a las condiciones locales que permitiera optimizar la distribución de la panela desde cinco empresas paneleras ubicadas en el municipio de Sandoná hacia cinco plazas de mercado mayoristas en Colombia. El proyecto se fundamentó en la necesidad de maximizar la utilidad de los paneleros, lograr una mayor eficiencia en el uso de recursos económicos y contribuir a mejorar los precios de la panela, impactando positivamente en la economía local.

Se analizaron los costos asociados a la producción y el transporte, se estableció la función objetivo para minimizar dichos costos, además se validó el modelo mejorado mediante cinco simulaciones durante el año 2025. El método de optimización se basó en la programación lineal, específicamente en el modelo de transporte, que se resuelve comúnmente mediante el método simplex, un procedimiento algorítmico eficiente para la solución de problemas lineales con múltiples variables y restricciones.

Pregunta de Investigación

¿La aplicación de un modelo de transporte basado en programación lineal (método simplex) optimiza los recursos económicos, reduce los costos logísticos y mejora la asignación de rutas en la cadena de suministro de la panela desde Sandoná hacia las plazas mayoristas analizadas durante el año 2025?

Preguntas Específicas

¿Cuál es la reducción en el costo total de la operación semanal al aplicar el modelo de transporte respecto a la configuración no optimizada?

¿Qué asignación óptima de producción (kg) por trapiche minimiza costos para las plazas de Cali, Ibagué, Neiva, Medellín y Bogotá en los cinco cortes del año 2025?

¿Cómo varía la solución óptima ante cambios en los costos de transporte y en la demanda?

¿Qué implicaciones operativas tiene la solución óptima en términos de utilización de capacidad instalada de los trapiches y necesidad de flota (número de viajes semanales)?

¿Es viable implementar el modelo de optimización en la práctica por parte de los actores locales dada la estructura de contratos, capacidades y recursos identificados?

Marco Teórico y Conceptual

A continuación, se presentan los fundamentos, los cuales incluyen los antecedentes en la logística del transporte, las teorías y los conceptos clave que fueron base para la interpretación del modelo de optimización ajustado.

Teorías de Supply Chain Management (SCM) y Redes de Valor

Según Mentzer et al (2001), el SCM implica la coordinación estratégica y sistémica de las funciones tradicionales del negocio dentro de una empresa y entre empresas de la cadena, con el propósito de mejorar el desempeño. Lambert & Cooper (2000) consolidaron el enfoque de integración de procesos clave como elemento central del SCM, destacando la necesidad de coordinación entre actores para generar eficiencia.

Desde una perspectiva más reciente, Christopher (2023) enfatiza que la competencia ocurre entre cadenas de suministro, no entre empresas individuales. Asimismo, Chopra (2019) plantea que el diseño de redes logísticas debe balancear tres dimensiones fundamentales: costo, nivel de servicio y capacidad de respuesta.

Para el sector panelero esto justifica analizar la cadena panelera como un sistema integrado más allá de los envíos individuales, orienta la necesidad de evaluar competitividad regional y respaldan el uso de modelos cuantitativos para diseño de red.

Modelos de Transporte y Optimización

El problema de transporte es un caso especial de programación lineal formalizado por George Dantzig en 1947 mediante el método simplex. Un modelo de optimización matemática consiste en una función objetivo y varias restricciones, estos modelos permiten tomar decisiones (Arsham, 2015).

Investigaciones recientes como Tupitsa et al (2022) exploran métodos de transporte óptimo con regularización entrópica para problemas de gran escala. Asimismo, Tang (2023) analiza la integración entre programación lineal e inteligencia artificial para logística verde, y Mahajan & Nagi (2024) presentan aceleración del método simplex mediante GPU para aplicaciones logísticas en tiempo real.

Lo anterior justifica el uso del simplex como base metodológica sólida en el sector panelero, respalda el enfoque de diseño de red, sugiere una integración futura de modelos y abre la posibilidad de escalabilidad.

Definición del Problema de Transporte

El problema de transporte se formula como un problema de programación lineal donde el objetivo es encontrar un patrón de envíos entre m orígenes con excedentes dados y n destinos con déficits dados, de tal manera que el costo total de transporte sea minimizado (Gaur et al., 2020). La formulación matemática incluye:

Variables de decisión. X_{ij} = número de unidades enviadas desde la fuente i al destino j (T. Kumar, 2014)

Función objetivo. Minimizar $Z = \sum \sum C_{ij} X_{ij}$, donde C_{ij} representa el costo de enviar una unidad desde la fuente i al destino j (T. Kumar, 2014)

Restricciones de oferta. $\sum X_{ij} \leq S_i$ para cada fuente i (T. Kumar, 2014)

Restricciones de demanda. $\sum X_{ij} \geq D_j$ para cada destino j (T. Kumar, 2014)

Restricciones de no negatividad. $X_{ij} \geq 0$ para todas las variables (T. Kumar, 2014)

Los problemas de transporte se ocupan principalmente de minimizar los costos de transporte de mercancías desde múltiples orígenes a diversos destinos, estos están sujetos a

restricciones de oferta y demanda (Gaur et al., 2020). A continuación, se describen algunos enfoques utilizados.

Enfoques Metodológicos Principales

Método Simplex Clásico. Este método se basa en la estructura especial de los problemas de transporte, donde las restricciones forman una matriz de coeficientes con estructura de red (Gaur et al., 2020). Este método se utiliza para resolver problemas de Programación Lineal (PL) (Arsham, 2015)

Métodos Híbridos y Especializados. La investigación reciente ha desarrollado algoritmos especializados que explotan la estructura particular de los problemas de transporte. Lee (2015) propone un algoritmo heurístico simple para problemas de transporte desbalanceados de gran escala, que mejora los resultados de paquetes comerciales de programación lineal en un 8.9%. Marchi (2008) desarrolla un algoritmo simplex dual específico para problemas de transporte de dos etapas.

Enfoques Computacionales Modernos. Afroz & Hasan (2015) presentan un método orientado a computadora que reduce los problemas de transporte a programación lineal, permitiendo resolver problemas con gran número de variables en pocos segundos. Este enfoque reconoce que el método simplex manual es muy consumidor de tiempo para problemas grandes.

Aplicaciones Prácticas Más Comunes

Logística y Gestión de Cadena de Suministro. Los problemas de transporte se aplican extensivamente en logística empresarial. Loor et al. (2012) implementan modelización matemática para el diseño de rutas de transporte de personal, considerando restricciones de ventanas de tiempo y capacidad vehicular. Hassan & Masrom (2022) utilizan modelos de transporte para optimizar la distribución de inventario entre proveedores y distribuidores en

ciudades malayas. Ferrer et al. (2004) estudian un modelo por programación lineal entera el cual resultó ser adecuado en la distribución de un producto en una empresa.

Transporte Urbano y Ferroviario. Agarana et al. (2016) aplican técnicas de investigación operativa, incluyendo el método simplex, para optimizar sistemas de transporte ferroviario urbano en países emergentes, demostrando que la optimización reduce emisiones de carbono y promueve desarrollo económico.

Industria Manufacturera. Prifti et al. (2020) utilizan programación lineal para minimizar costos de transporte en una empresa industrial, experimentando con diferentes métodos de investigación operativa incluyendo el método simplex. Ahmad (2013) investiga la aplicación de programación lineal e integer programming para transportar mineral de hierro desde minas a plantas siderúrgicas.

Marco Conceptual

Este proyecto se enfocó en la aplicación del método simplex para solucionar un problema de transporte en el sector agropecuario, específicamente en el transporte de panela. A continuación, se profundiza en este método.

La optimización de transporte a través del método simplex es una técnica de programación lineal que permite encontrar la solución óptima para problemas de distribución de bienes desde múltiples orígenes a múltiples destinos, minimizando costos totales de transporte mientras satisface restricciones de oferta y demanda (Gaur et al., 2020; T. Kumar, 2014).

El Método Simplex en el Transporte

El método simplex es una técnica algebraica fundamental en programación lineal, desarrollada por George B. Dantzig en 1947 (Kumar, 2004). Para problemas de transporte, existe una versión especializada conocida como el Método Simplex de Transporte, que utiliza una

forma de tabla más compacta y requiere menos memoria, siendo potencialmente más rápido (T. Kumar, 2014).

El método simplex es un algoritmo que obtiene soluciones factibles básicas haciendo la mayor mejora posible de la solución anterior en cada iteración (T. Kumar, 2014). El algoritmo progresa desde un punto extremo del poliedro factible a uno adyacente, utilizando tácticas como precios y pivoteo (T. Kumar, 2014).

Ventajas y Limitaciones del Método Simplex

Ventajas Principales - Garantía de Optimalidad. El método simplex garantiza encontrar la solución óptima para problemas de programación lineal (Gaur et al., 2020).

Estructura Especializada. Para problemas de transporte, el simplex puede aprovechar la estructura especial de la matriz de restricciones, haciéndolo más eficiente que algoritmos generales (Arms, 1968).

Fundamento Teórico Sólido. El método simplex es robusto y presenta criterios bien establecidos.

Precisión. Garantiza encontrar la solución óptima exacta para problemas de programación lineal (Ahmed, 2024).

Versatilidad. Puede manejar problemas con múltiples desigualdades y variables (Ahmed, 2024; Gaur et al., 2020).

Eficiencia Computacional. Para problemas de transporte, la versión especializada es más eficiente que el simplex general (Arsham & Kahn, 1989; T. Kumar, 2014).

Análisis Post-optimización. El tableau final permite realizar análisis de sensibilidad (Arsham & Kahn, 1989)

Resultados óptimos. Entre todos los métodos de transporte, el simplex y VAM son considerados los mejores métodos ya que producen resultados ideales (Hassan & Masrom, 2022)

Calidad de la Evidencia. La evidencia presentada en los estudios revisados es sólida, con múltiples casos de estudio que demuestran ahorros significativos de costos y mejoras en eficiencia. Sin embargo, muchos estudios se enfocan en problemas de escala relativamente pequeña, lo que limita la generalización a sistemas de transporte de gran escala.

El método simplex para optimización de transporte demuestra consistentemente su efectividad en la práctica. Los estudios comparativos muestran que produce resultados óptimos confiables (Hassan & Masrom, 2022) y puede manejar eficientemente problemas de tamaño moderado (Prokudin et al., 2022). Su capacidad para proporcionar análisis post-optimización lo hace valioso para la toma de decisiones estratégicas (Arsham & Kahn, 1989).

Relevancia Práctica. La optimización de transporte mediante el método simplex tiene implicaciones significativas para:

Reducción de Costos Operativos. Los estudios documentan ahorros sustanciales en costos de transporte (Hassan & Masrom, 2022)

Mejora de la Eficiencia Logística. Optimización de rutas y asignación de recursos (Prokudin et al., 2022)

Sostenibilidad Ambiental. Reducción del uso de combustible y de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

Competitividad Empresarial. Mejora de márgenes de ganancia y capacidad competitiva (Hassan & Masrom, 2022)

Relevancia Teórica. Desde una perspectiva teórica, el método contribuye al desarrollo de: Algoritmos de optimización más eficientes (Arsham & Kahn, 1989), modelos híbridos que

combinan programación lineal con otras técnicas (Fadhila et al., 2024), enfoques estocásticos para manejar incertidumbre en parámetros de transporte (Prokudin et al., 2022)

Limitaciones Prácticas en Logística Agropecuaria

Investigaciones recientes sobre resiliencia y digitalización en cadenas agroindustriales, como las discutidas por Tang (2023), subrayan que la falta de integración tecnológica y análisis predictivo limita la capacidad de respuesta ante fluctuaciones de demanda, bloqueos de rutas o restricciones de capacidad, lo cual es particularmente relevante en contextos rurales donde predominan pequeños productores y estructuras logísticas fragmentadas.

Esto sugiere en el sector panelero estudios para implementar programación estocástica y modelos robustos frente a incertidumbre.

Limitaciones del Método Simplex

Complejidad Computacional. El método simplex es muy consumidor de tiempo y complejo para problemas grandes (Gaur et al., 2020). Lee, 2015 señala que el método simplex de transporte es inaplicable para problemas desbalanceados de gran escala.

Escalabilidad. Para problemas con gran número de variables, se vuelve difícil y consume mucho tiempo si se realiza manualmente (Afroz & Hasan, 2015).

Limitaciones en Problemas Reales. Los métodos clásicos no consideran factores como condiciones de carretera, congestión de tráfico y condiciones climáticas (Anufriev et al., 2016)

Intensidad de Cálculo. Es muy laborioso y consume tiempo cuando se realiza manualmente (Afroz & Hasan, 2015; Gaur et al., 2020).

Limitaciones de Escala. Se vuelve intratable para tamaños de cuadrícula moderados en la discretización estándar (Oberman & Ruan, 2015).

Complejidad de Implementación. Los métodos alternativos pueden ser más simples en las etapas iniciales (Houthakker, 1955).

Las principales limitaciones incluyen la escalabilidad computacional para problemas muy grandes (Gaur et al., 2020; T. Kumar, 2014) y la necesidad de datos precisos para la formulación del modelo (Tang, 2023). Además, el método se concentra en optimización de objetivo único, lo que puede ser limitante en situaciones con múltiples criterios (Tang, 2023).

Comparaciones con Otros Métodos de Optimización

Métodos Heurísticos Tradicionales. Los estudios comparan consistentemente el método simplex con métodos heurísticos como: Método de la Esquina Noroeste (NWCR), Método de Aproximación de Vogel (VAM), Método de Costo Mínimo, Método MODI. Hassan & Masrom, 2022 concluyen que entre todos los modelos de transporte, VAM y los métodos simplex se consideran los mejores ya que producen resultados ideales, mientras que NWCR es el más simple, pero produce los peores resultados.

Algoritmos Metaheurísticos. La investigación moderna compara el simplex con algoritmos metaheurísticos más avanzados. El estudio de Liu, 2022 muestra que los algoritmos de colonia de hormigas mejorados pueden superar al simplex tradicional en términos de eficiencia energética y consideraciones ambientales.

Métodos de Optimización de Transporte Óptimo. Para problemas de gran escala, los métodos de transporte óptimo que utilizan regularización entrópica y el algoritmo de Sinkhorn han demostrado superar a los métodos clásicos como el simplex de red cuando las dimensiones del problema no permiten aplicar métodos clásicos (Tupitsa et al., 2022).

Implicaciones para Diseño de Políticas y Operaciones Locales

La optimización del transporte en el sector panelero de Sandoná, Nariño, tiene implicaciones directas en la competitividad local. Desde la perspectiva del SCM, en lo rural, Chopra (2019) argumenta que el diseño óptimo de redes de distribución permite equilibrar costos y nivel de servicio, lo cual puede traducirse en mayor estabilidad de ingresos para productores rurales. En Sandoná, la aplicación del método simplex no solo contribuye a la reducción de costos de transporte, sino que también proporciona información estratégica que puede orientar decisiones municipales relacionadas con mejoramiento vial, esquemas asociativos entre trapiches o políticas de apoyo al flete, fortaleciendo así la sostenibilidad económica del sistema panelero regional.

Antecedentes en Logística del Transporte

Las investigaciones realizadas sobre optimización del transporte utilizando el método simplex siguen siendo fundamentales para resolver problemas de transporte, sin embargo, muestra limitaciones al resolver problemas de gran escala, por lo que esto ha llevado al desarrollo de métodos híbridos y algoritmos especializados que combinan el método simplex con técnicas heurísticas y metaheurísticas.

Sobre la utilización del método simplex en el transporte panelero no se han registrado investigaciones en Colombia, sin embargo, existen experiencias en el sector industrial y agropecuario.

Tendencias de Investigación Recientes y Desarrollos Innovadores

Algoritmos Híbridos. Liu (2022) desarrolló un modelo de planificación de rutas logísticas basado en algoritmo de colonia de hormigas mejorado combinado con un modo de distribución "hitchhiking", mostrando beneficios evidentes de bajo carbono y ahorro energético.

Métodos Multi-objetivo. Surya y Ravindranath proponen un método simple para encontrar soluciones básicas óptimas y eficientes para problemas de transporte bi-objetivo utilizando programación por metas ponderada (Surya & Ravindranath, 2022).

Optimización Bajo Incertidumbre. La investigación reciente explora la programación lineal bajo incertidumbre, reconociendo que los problemas de transporte del mundo real involucran parámetros inciertos (S. Kumar & Kumar, 2024).

Integración con Inteligencia Artificial. Tang (2023) explora la integración de programación lineal con inteligencia artificial, aprendizaje automático y optimización multi-objetivo para logística verde.

Casos de Estudio Destacados

Caso Industrial - Empresa Albert David. Sharma & Gupta (2012) resuelven un problema de transporte para Albert David Company, trabajando con 3 plantas y 14 depósitos en toda India, comparando métodos simplex dual, de dos fases y Big M.

Transporte de Frutas y Verduras. Armenta et al. (2016) Armenta et al. abordan el transporte de frutas y verduras frescas de un transportista independiente en Ciudad Juárez, México, utilizando el método simplex para maximizar ganancias con un resultado de \$1,840.00 pesos mexicanos en un solo viaje.

Optimización de Rutas Urbanas. Anufriev et al. (2016) desarrollan un modelo de optimización de rutas de transporte considerando el estado de carreteras y congestiones de tráfico, introduciendo nuevos conceptos que consideran distancia, velocidad probable del vehículo según calidad de carretera, intensidad de flujo de transporte y condiciones climáticas.

Casos de Estudio Específicos del Método Simplex

Distribución de Inventario. Un ejemplo práctico involucra la optimización de la distribución de materiales poliméricos desde cuatro puntos de suministro a múltiples destinos en ciudades malayas. Mostró que el uso de algoritmos de problema de transporte redujo los costos de entrega, representando un ahorro del 78.91% (Hassan & Masrom, 2022)

Optimización de Estacionamientos. La aplicación del método simplex en la optimización de espacios de estacionamiento resultó en la adición de 36 espacios por piso (Crisostomo & Baldovino, 2019).

Transporte de Carga. En problemas de transporte de carga no balanceados, el método simplex demostró ser el mejor en 48 de 100 casos analizados, con un aumento promedio de eficiencia del 25% (Prokudin et al., 2022).

Aceleración mediante GPU del método Simplex. Se ha desarrollado un algoritmo de transporte simple (TSA) acelerado por unidades de procesamiento acelerado (GPU), que permite mejorar el rendimiento hasta 8 veces más rápido que con los métodos tradicionales (Mahajan & Nagi, 2024). Esta aceleración es crucial para las aplicaciones en tiempo real de la logística moderna, como los viajes compartidos y los envíos rápidos, donde los problemas de transporte a gran escala requieren soluciones rápidas.

Aplicación en la Simulación del Movimiento de Barcos. El método simplex también se ha aplicado para optimizar las simulaciones del movimiento de los barcos, lo que reduce significativamente los errores en las predicciones de trayectorias (Nguyen & Tran, 2020). Esta aplicación muestra la versatilidad del método simplex más allá de los problemas de transporte tradicionales, extendiendo su utilidad a la logística marítima.

Caso de Transporte Multimodal. Para el transporte multimodal combinado, se estableció un modelo de optimización de rutas integradas usando programación lineal desde Liuzhou hasta Guangzhou (Zhu & Zhang, 2013).

Los estudios muestran que los problemas de transporte con un gran número de variables pueden resolverse en pocos segundos utilizando programas computacionales (Afroz & Hasan, 2015). La implementación incluye el uso de software especializado: Aplicación de herramientas como Excel Solver, LINDO, o programas personalizados. Serrano & Montero (2019) utilizaron el software Win QSB en la solución del modelo llamado ruta más corta, modelo de transporte y árbol de expansión mínima.

La investigación muestra una evolución clara desde métodos simplex puros hacia enfoques híbridos que combinan la robustez teórica del simplex con la eficiencia computacional de métodos heurísticos y metaheurísticos modernos, especialmente para problemas de transporte de gran escala y con múltiples objetivos. También para este método se explora la integración con la inteligencia artificial, aprendizaje automático y optimización multi-objetivo para abordar las limitaciones actuales y expandir su aplicabilidad (Tang, 2023).

Objetivos

Objetivo General

Aplicar un modelo de transporte adaptado a las condiciones locales para la distribución de panela desde el municipio de Sandoná hasta las principales plazas de mercado de Colombia.

Objetivos Específicos

Analizar los costos de producción y de la operación del transporte de la panela

Adaptar el modelo simplex de optimización logística del transporte a las condiciones locales del municipio

Validar el modelo mejorado mediante la determinación del costo mínimo en diferentes escenarios

Metodología

A continuación, se describe el enfoque cuantitativo mediante el cual se desarrolló este proyecto aplicado, incluyendo la localización del estudio, los procedimientos de recolección de datos, la construcción del modelo matemático y los métodos utilizados para su validación a través del método simplex y escenarios.

Localización

Este proyecto se realizó en el municipio de Sandoná, en el departamento de Nariño, Colombia. Este municipio se encuentra ubicado a 44 kilómetros de San Juan de Pasto. La vía es asfaltada y conecta los dos municipios, este trayecto es conocido como “circunvalar al Volcán Galeras”. Las coordenadas de los trapiches paneleros según el aplicativo de Google Maps son:

Empresa panelera El Saman: 1.296979, -77.503191

Empresa panelera Las Delicias: 1.268003, -77.496649

Empresa panelera La Avispa: 1.263265, -77.470287

Empresa panelera Villa Inés: 1.254771, -77.482446

Empresa panelera El Vergel: 1.331010, -77.477556

El clima es templado con aproximadamente 16°C de temperatura, entre 1000 a 1600 msnm, la topografía es montañosa, los suelos son francos derivados de cenizas volcánicas.

Las características edafoclimáticas de la región la hacen ideal el cultivo de caña panelera.

Tipo de Organización

El proyecto se enmarca en el sector agroindustrial panelero del municipio de Sandoná, específicamente en unidades productivas clasificadas en la categoría “transformador”. Esta categoría comprende a los propietarios de trapiches que desarrollan procesos de transformación agroindustrial de la caña panelera (molienda, cocinado y moldeo) y que, adicionalmente,

gestionan la logística de distribución mediante la contratación de servicios de transporte para la comercialización.

Según registros de la Federación Nacional de Productores de Panela, en el municipio se encuentran 34 trapiches paneleros. Pero, para efectos metodológicos se eligieron cinco unidades productivas, considerando como criterios de selección el mayor volumen de producción, capacidad operativa instalada y posicionamiento comercial en el ámbito municipal.

Ámbito Geográfico

El estudio de caso se limitó al municipio de Sandoná (Nariño, Colombia). Los mercados analizados fueron exclusivamente las plazas mayoristas de Cali, Ibagué, Neiva, Medellín y Bogotá; los resultados y recomendaciones se aplican a este sistema logístico local y su extrapolación a otras regiones requerirá validación empírica.

Horizonte Temporal

El análisis correspondió al año 2025 con cinco cortes transversales (15 de enero, 15 de abril, 15 de julio, 15 de octubre y 15 de diciembre de 2025). Este diseño permite observar variaciones estacionales en costos y demanda durante el año; el estudio no pretendió inferir tendencias multianuales. El análisis de escenarios tomó como base el último corte por ser el más reciente.

Método

Se realizó un proyecto aplicado para la optimización del transporte de la panela a través del método simplex, el modelo se aplicó en cinco momentos durante el año 2025.

La aplicación del método simplex incluyó cinco empresas paneleras (oferta) y cinco clientes (demanda) ubicados en las principales plazas de mercado de Colombia.

Las cinco empresas paneleras fueron: Trapiche El Saman, Las Delicias, La Avispa, Villa Inés y El Vergel ya que son trapiches reconocidos en la región.

Para la identificación de costos y rutas se realizaron entrevistas directamente en las empresas paneleras, plazas de mercado y transportistas de la región. Durante las entrevistas se determinó la demanda, costo de producción y flete. Los datos se constataron con funcionarios de la Federación Nacional de Productores de Panela – FEDEPANELA en Colombia.

Análisis de Costos de Producción y Transporte

Para determinar los costos de producción se visitaron cinco trapiches paneleros, se obtuvo el promedio de producción semanal y el costo total de la producción (costo de jornales + insumos + cargue + costo de la caña y cuota de fomento panelero), esto permitió obtener el costo por unidad de panela producida.

Para determinar el costo del transporte se consultó el aplicativo SICE TAC del Ministerio de Transporte, los cuales fueron corroborados con cinco transportistas con 15 años de experiencia en el oficio. Estos indicaron rutas y precio del flete incluido el costo de peajes, también se tuvieron en cuenta las distancias y tiempo de recorrido entre ciudades.

Diseño del Modelo de Optimización de la Distribución de la Panela

La composición del modelo simplex adaptado a las condiciones locales del municipio de Sandoná se basó en el método simplex de programación lineal descrito por Kumar, 2004. Se tuvieron en cuenta las capacidades de producción de los trapiches, los pedidos del cliente y las variables del diagrama de la red comercial.

Validación del Modelo Mejorado

Para la validación del modelo adaptado a las condiciones locales de Sandoná, se aplicó el algoritmo a las operaciones comerciales de transporte de la panela para cinco trapiches paneleros

durante el año 2025. El modelo se aplicó en cinco ocasiones en las fechas: 15 de enero, 15 de abril, 15 de julio, 15 de octubre y 15 de diciembre.

Para la aplicación del modelo se procedió de la siguiente manera:

Construcción del Diagrama de Red

Se realizó uniendo los nodos de suministro (trapiches) con los nodos de la demanda (cliente en cada plaza de mercado), en el diagrama de red se graficaron las rutas de distribución con sus respectivos costos totales (transporte más costo por unidad).

Durante la composición del diagrama de red se identificaron los suministros (oferta o capacidad de producción/trapiche) y la demanda (pedido por el cliente).

Determinación de Variables

Se identificaron las variables relacionadas con las diferentes posibilidades (fuente - destino) en la operación del transporte, relacionado cada trapiche con cada cliente. Es decir, cada variable representó la conexión por cada nodo de suministro con cada nodo de la demanda.

Planteamiento de la Función Objetivo

Se planteó la función objetivo de minimización teniendo en cuenta las variables declaradas en el anterior paso. Los costos se obtuvieron de las rutas mostradas en el diagrama de red correspondiente al costo total por cada posible ruta (costo de jornales + insumos + cargue + cuota de fomento panelero + flete por kilogramo). Este se planteó para cinco trapiches y cinco clientes.

Identificación de las Restricciones

Por ser un problema de transporte, se identificaron las restricciones de suministro y de demanda. El suministro correspondió a la cantidad de panela que puede producir un trapiche y la demanda a la cantidad máxima de unidades de panela pedidas por cada cliente.

En las restricciones de suministro se consideró la desigualdad “menor igual que” ya que la producción no puede superar la capacidad de cada trapiche.

La restricción de demanda fue de “igualdad” ya que se debió cumplir con el total del pedido por el cliente en las plazas de mercado.

Al final se incluyó una restricción de no negatividad del tipo “mayor igual que”

Procesamiento de Datos

Finalmente, el algoritmo se resolvió a través del programa LINGO 21.0, el cual permitió encontrar la mejor configuración en la distribución de la panela al menor costo. La función objetivo se compuso y resolvió para las cinco simulaciones aplicadas en el año 2025.

Análisis de Sensibilidad

Como escenario base se adoptó el resultado de la función objetivo correspondiente al mes de diciembre, por ser el último período modelado del año 2025 y, por tanto, el más reciente y representativo de la situación actual del sistema.

A partir de este punto de referencia, se definieron los siguientes escenarios para el análisis de sensibilidad:

Escenario base: condiciones originales del modelo (costos, demanda y capacidad sin modificaciones).

Escenario optimista: reducción del 10% en los costos de flete, manteniendo la demanda constante.

Escenario pesimista: incremento del 20% en los costos de flete, disminución del 10% en la demanda y reducción del 10% en la capacidad.

Escenario de shock: cierre temporal de una ruta, lo que implica la redirección de los flujos y un aumento del 50% en los costos de flete.

Estos escenarios permitieron evaluar la estabilidad del modelo ante variaciones en los parámetros críticos y analizar el impacto de cambios operativos y económicos sobre la función objetivo.

Análisis de Escenarios Posibles

En la Tabla 1 se presentan los escenarios prospectivos evaluados. Estos se construyeron tomando como línea base el último corte temporal analizado (15 de diciembre de 2025), dado que corresponde a la solución óptima más reciente y representativa del comportamiento del sistema.

El análisis de escenarios se desarrolló considerando tanto el costo total del sistema como el costo de transporte. En este último se incorporaron explícitamente los costos asociados al cargue (\$10 por kilogramo) y la cuota de fomento panelero (\$340 por kilogramo).

Tabla 1

Escenarios Posibles para el Modelo de Transporte de Panela en Sandoná

| Escenario | Costo total del transporte | Demanda del cliente | Capacidad de producción |
|-----------|----------------------------|---------------------|-------------------------|
| Base | 0% | 0% | 0% |
| Optimista | -10% | 0% | 0% |
| Pesimista | +20% | -10% | -10% |
| Shock | +50% | 0% | 0% |

Nota. La tabla presenta las variaciones porcentuales aplicadas a las variables del modelo para la construcción de los escenarios prospectivos analizados.

Escenario Base

El escenario base representó las condiciones del modelo aplicado a finales del año 2025, sin variaciones en las variables. Estos resultados se convirtieron en el comparador para simular los escenarios futuros.

Escenario Optimista

Se construyó considerando una reducción del 10% en el costo total de transporte por kilogramo. La disminución en los costos se fundamenta en posibles dinámicas competitivas entre transportistas, que pueden generar ajustes tarifarios a la baja. La capacidad productiva y de demanda se mantuvieron estables ya que no es común en Sandoná un aumento de estas variables por la dificultad en la consecución de jornaleros y a que la capacidad de despacho se encuentra restringida por el tamaño de los vehículos utilizados para el transporte, cuya capacidad oscila entre 10 y 12 toneladas por viaje

Escenario Pesimista

Contempló un aumento del 20% en el costo total de transporte por kilogramo, acompañado de una reducción del 10% tanto en la demanda como en la capacidad productiva. Este comportamiento se sustenta en situaciones recurrentes como paros, retenes o bloqueos en la vía Panamericana y en las vías rurales de los departamentos de Cauca y Valle del Cauca, que obligan a los transportistas a incrementar sus tarifas. Adicionalmente, la disminución en la capacidad de producción puede estar asociada a fallas en los molinos o a la reducción de mano de obra disponible.

Escenario de Shock

Se modeló como un evento extremo caracterizado por el cierre temporal de rutas estratégicas, lo que obliga a la redirección del transporte y genera un incremento aproximado del 50% ya que el transportista debe rodear y atravesar otros departamentos como el Putumayo. Este caso ocurrió entre el año 2019 y 2020 durante la pandemia del COVID 19 en el que los fletes subieron el 50%. En este escenario, se mantiene constante la demanda y la capacidad productiva. Los porcentajes utilizados no son arbitrarios, sino que se fundamentan en las dinámicas

históricas y operativas del sector panelero en el municipio de Sandoná y en el comportamiento real de sus rutas de transporte.

Los parámetros relacionados con los peajes, llantas, lubricantes, filtros, mantenimiento y reparación, lavado y engrase, así como el precio del combustible, no fueron considerados de manera desagregada en el presente modelo. Esto se debe a que dichos conceptos forman parte del costo total acordado con el transportista. En el caso específico de los productores de Sandoná, los propietarios de los trapiches contratan el servicio de transporte de manera integral, incluyendo costos fijos y costos variables.

Análisis Económico Marginal

El análisis económico marginal se realizó a partir del precio sombra obtenido en la solución óptima. Este permitió cuantificar la variación de la función objetivo ante cambios marginales en las restricciones y determinar el incremento del costo total frente a un aumento unitario en la demanda.

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la ubicación de la panela desde el municipio de Sandoná hasta cinco plazas de mercado en Colombia.

Análisis de Costos de Producción y Transporte

El costo de la producción y la operación del transporte de la panela se calculó para el año 2025.

Costo de la Producción de Panela

El costo promedio en jornales para producir 10.000 kg de panela fue de \$18.000.000, producción que se logra semanalmente con la participación de aproximadamente 50 jornaleros. En consecuencia, el costo unitario en jornales se estimó en \$1.800 por kilogramo de panela, lo que evidencia que este proceso es altamente intensivo en mano de obra y resalta la necesidad de optimizar los procesos logísticos y productivos.

En cuanto al costo de la materia prima, el valor promedio de la caña panelera se estimó en \$18.620.000 por semana lo cual genera una producción de 10.000 kg de panela, lo que corresponde a un costo promedio anual de \$1.862 por kilogramo. Por tanto, la suma del costo de jornales y el costo de la materia prima (caña) alcanzó un valor total promedio de \$3.662 por kilogramo de panela en el año 2025. No obstante, este valor puede variar en aproximadamente \$150 por kilogramo, debido a factores como la distancia de desplazamiento de los jornaleros, la distancia entre el cultivo y el trapiche, y la eficiencia del proceso de extracción del molino.

Los resultados evidencian que la mano de obra constituye el principal componente del costo de producción, situación que se asocia con la escasez de jornaleros en la región, el abandono del campo por parte de la población joven y las dificultades operativas derivadas del uso de maquinaria antigua y obsoleta. En este contexto, se proyecta la necesidad de incorporar

nuevas tecnologías, como procesos de automatización, que permitan mejorar la eficiencia productiva y reducir los costos operativos.

Costo del Transporte

En el municipio de Sandoná, el transporte de carga pesada se realiza principalmente mediante camiones de categoría C2 (camiones de dos ejes) con una capacidad de 10 toneladas de panela. Esta restricción operativa se asocia con las condiciones topográficas de la vía que conecta el municipio con la ciudad de Pasto, la cual, a pesar de encontrarse pavimentada, presenta curvas cerradas y secciones estrechas que limitan el tránsito de vehículos de mayor capacidad, como tractocamiones. Esta limitación influye directamente en la eficiencia del transporte y en los costos del sistema de distribución.

En la Tabla 2 se presentan los costos de transporte por tonelada de panela en el trayecto comprendido entre la ciudad de Pasto y las principales plazas de mercado del país. Los costos del flete dependen principalmente de la distancia recorrida, el número de estaciones de peaje y las condiciones operativas de las rutas. La plaza de mercado con menor costo de transporte fue la ubicada en Cali, debido a su menor distancia desde Pasto, mientras que la plaza de mercado en Bogotá presentó el mayor costo, asociado a la mayor distancia y al mayor número de peajes en la ruta.

Tabla 2

Distancia, Tiempo, Costo de Movilización y Peajes

| Ciudad de destino | Distancia (Km) | Horas de viaje | Fecha | Costo de movilización de carga (\$) | Costo por tonelada (\$) | Peajes (\$) |
|-------------------|----------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------|
| | | | 15 de Enero | 3.069.044,00 | 306.904,40 | 154.400,00 |
| | | | 15 de Abril | 3.221.495,00 | 322.149,50 | 160.200,00 |

| | | | | | | |
|----------|--------|-------|-----------------|--------------|------------|------------|
| Medellín | 819,41 | 19,2 | 15 de Julio | 2.763.660,00 | 276.366,00 | 260.100,00 |
| | | | 15 de Octubre | 2.758.726,00 | 275.872,60 | 237.800,00 |
| | | | 15 de Diciembre | 2.767.981,00 | 276.798,10 | 237.800,00 |
| Bogotá | 820,13 | 20,09 | 15 de Enero | 3.196.325,94 | 319.632,59 | 169.800,00 |
| | | | 15 de Abril | 3.355.615,88 | 335.561,59 | 181.100,00 |
| | | | 15 de Julio | 2.740.066,76 | 274.006,68 | 197.400,00 |
| | | | 15 de Octubre | 2.762.650,00 | 276.265,00 | 197.400,00 |
| | | | 15 de Diciembre | 2.772.075,45 | 277.207,55 | 197.400,00 |
| | | | 15 de Enero | 1.166.012,01 | 116.601,20 | 42.000,00 |
| Cali | 380,22 | 10,1 | 15 de Abril | 1.223.074,68 | 122.307,47 | 45.000,00 |
| | | | 15 de Julio | 1.259.775,68 | 125.977,57 | 45.000,00 |
| | | | 15 de Octubre | 1.270.921,14 | 127.092,11 | 45.000,00 |
| | | | 15 de Diciembre | 1.275.443,21 | 127.544,32 | 45.000,00 |
| | | | 15 de Enero | 2.425.894,79 | 242.589,48 | 118.400,00 |
| | | | 15 de Abril | 2.545.928,93 | 254.592,89 | 125.800,00 |
| Ibagué | 659,56 | 23,21 | 15 de Julio | 2.095.748,03 | 209.574,80 | 125.800,00 |
| | | | 15 de Octubre | 2.113.295,39 | 211.329,54 | 125.800,00 |
| | | | 15 de Diciembre | 2.120.617,60 | 212.061,76 | 125.800,00 |
| | | | 15 de Enero | 1.815.322,50 | 181.532,25 | 39.900,00 |
| Neiva | 537,64 | 17,12 | 15 de Abril | 1.903.775,48 | 190.377,55 | 42.700,00 |
| | | | 15 de Julio | 1.719.589,88 | 171.958,99 | 26.800,00 |
| | | | 15 de Octubre | 1.736.331,83 | 173.633,18 | 26.800,00 |
| | | | 15 de Diciembre | 1.742.508,32 | 174.250,83 | 26.800,00 |

Nota. La tabla muestra la variación de los costos de transporte y peajes según la distancia y fecha para un camión de dos ejes cargado con 10 toneladas de panela. Composición propia con datos del SICE TAC (Ministerio de Transporte SICE TAC, 2025)

Estos resultados muestran que cuanto más distancia y mayor número de peajes el precio del flete incrementa, lo cual concuerda con los principios de la logística de transporte, donde la distancia, el tiempo de tránsito y los costos de infraestructura vial son determinantes en el costo total del sistema logístico (Ballou, 2004; Chopra, 2019)

También, se identificaron factores logísticos de riesgo que influyen en el costo del transporte, tales como la seguridad del conductor, del vehículo y de la mercancía, especialmente en los trayectos que atraviesan los departamentos del Cauca y Valle del Cauca. Estos factores generan sobrecostos, rutas alternas, tiempos adicionales y reduce la competitividad de la cadena de suministro de la panela.

Estos resultados apuntan a que el transporte representa un componente crítico sobre el costo total de la cadena de suministro de la panela por lo que la optimización de rutas es clave en la reducción de costos y mejora de la rentabilidad de los paneleros en Sandoná.

Diseño del Modelo de Transporte Adaptado a las Condiciones Locales

La composición del modelo de transporte tipo simplex se adaptó a las condiciones logísticas del municipio de Sandoná el cual permitió minimizar los costos de la distribución de la panela. A continuación, se encuentra el diseño del modelo simplex adaptado a las condiciones del municipio:

Función Objetivo Adaptado a la Producción Panelera de Sandoná

La función objetivo del modelo se acercó de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } Z = \sum C_{ij} X_{ij},$$

Donde:

C_{ij} Representa el costo de enviar un kilo de panela desde el trapiche i a la plaza de mercado j , es decir, la suma de los costos de los jornales, insumos, cargue, cuota de fomento panelero y flete.

X_{ij} Representa el número de unidades enviadas desde la fuente i al destino j , es decir, el número de kg de panela enviadas desde una empresa panelera hasta una de las plazas de mercado o cliente.

Restricciones Adaptadas a las Condiciones Locales

Las restricciones para la ubicación de la panela fueron:

Restricciones de oferta: $\sum X_{ij} \leq S_i$ para cada fuente i , $i = 1, 2, \dots$

Donde S_i corresponde a la capacidad máxima de producción de panela del trapiche i . Esta restricción se expresa como una desigualdad de tipo “menor o igual que”, debido a que la producción efectiva no puede exceder la capacidad instalada de cada trapiche

Restricciones de demanda: $\sum X_{ij} = D_j$ para cada destino j , $j = 1, 2, \dots$

Donde D_j representa la demanda o pedido del cliente j , expresada en kilogramos de panela. Esta restricción se plantea como una igualdad, ya que el modelo garantiza que la cantidad enviada satisface exactamente la demanda de cada cliente, sin generar excedentes.

Restricciones de no negatividad: $X_{ij} \geq 0$ para todas las variables, lo cual asegura la viabilidad física de la solución, dado que no es posible transportar cantidades negativas de panela.

La formulación de este modelo de transporte permitió representar de manera adecuada la capacidad productiva de los trapiches y la demanda de los clientes para minimizar costos. Este propósito es consistente con la literatura especializada, que destaca la programación lineal como

una herramienta eficaz para la minimización de costos en sistemas de transporte y redes de suministro (Ballou, 2004; Taha, 2017).

Este modelo permitió identificar configuraciones óptimas de asignación que contribuyeron a la reducción del costo logístico total, el cual es uno de los objetivos centrales de la gestión de la cadena de suministro (Chopra, 2019).

Este modelo adaptado las condiciones del sector panelero es flexible, ya que puede adaptarse a variaciones en el número de trapiches, clientes, niveles de demanda y capacidades productivas. Además, su estructura permite la incorporación futura de diferentes presentaciones de panela, cambios en los costos unitarios o escenarios de demanda, lo que lo convierte en una herramienta útil para la planificación logística y la toma de decisiones estratégicas en el sector panelero.

Validación del Modelo Simplex Aplicado a la Logística del Transporte Panelero

A continuación, se encuentra la aplicación del modelo en cinco escenarios del año 2025: 15 de enero, 15 de abril, 15 de julio, 15 de octubre y 15 de diciembre de 2025. Estos cortes temporales permitieron analizar el comportamiento del modelo simplex adaptado a las condiciones de Sandoná bajo variaciones en los costos de producción y transporte del sistema panelero.

El proceso de validación comprendió el cálculo de la demanda o pedidos, costo y capacidad de producción, costos del transporte, costo total de la operación, diseño del diagrama de red, identificación de variables de decisión, función objetivo, planteamiento de las restricciones. La integración de estos elementos permitió determinar la asignación óptima de los flujos de panela desde los trapiches paneleros del municipio de Sandoná hacia las principales plazas de mercado del país. Además, permitió la obtención del menor costo.

Cálculo de la Demanda de la Panela

La Tabla 3, presenta los pedidos (demanda) que debieron suplirse durante los cinco escenarios analizados. La demanda se mantuvo constante en 10.000 kg por cliente, valor que corresponde al pedido mínimo rentable acordado entre productores y compradores, y que se ha generalizado como estándar en la comercialización mayorista de panela desde Sandoná.

La forma o presentación del producto constituye un factor determinante en la decisión de compra de los consumidores, dado que influye directamente en sus preferencias según la región. Históricamente, cada zona del país ha mostrado patrones diferenciados de consumo: en el Valle del Cauca y Medellín predomina la preferencia por presentaciones redondas; en Ibagué y Neiva se prefieren formas cuadradas o rectangulares; mientras que en Bogotá se aceptan ambas presentaciones, aunque con predominio de la panela redonda. En este contexto, un error en la selección de la forma o presentación del producto puede generar una baja aceptación en el mercado objetivo, afectando significativamente su comercialización en determinadas ciudades.

Tabla 3

Demanda por Ciudad y Presentación de la Panela Durante el Año 2025

| No. Cliente | Ciudad de destino | Presentación de la panela | Demanda en kg | | | | |
|-------------|-------------------|---------------------------|---------------|--------|--------|---------|-----------|
| | | | Enero | Abril | Julio | Octubre | Diciembre |
| 1 | Cali | Redonda de 1 kg | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 |
| 2 | Ibagué | Redonda de 1 kg | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 |
| | | Cuadro de 2 kg | | | | | |
| 3 | Neiva | Cuadro 0,5 kg | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 |
| | | Cuadro de 2 kg | | | | | |
| | | Cuadro de 1 kg | | | | | |
| 4 | Medellín | Redonda de 1 kg | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 |

| No. Cliente | Ciudad de destino | Presentación de la panela | Demanda en kg | | | | |
|-------------|-------------------|---------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| | | Panelín de 0,25 kg | | | | | |
| 5 | Bogotá | Redonda de 1 kg | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 |

Nota. La tabla detalla la presentación del producto y la cantidad de unidades de panela enviadas a cada ciudad de destino.

Costos y Capacidad de Producción

En la Tabla 4, se presentan los costos unitarios de producción y la capacidad semanal de cada empresa panelera. Estas variables cambiaron en función del tamaño del molino y a la disponibilidad de caña para la molienda. En promedio, el costo de producción de un kilogramo de panela para las cinco empresas y escenarios analizados fue de \$3.662.

Los costos de producción por kilogramo de panela presentaron variaciones durante el segundo semestre de 2025, atribuibles principalmente a la escasez de jornaleros y a la competencia entre trapiches. La limitada disponibilidad de mano de obra calificada generó un aumento en los salarios pagados por jornal, lo que incidió directamente en el incremento de los costos de producción.

Tabla 4

Costos Unitarios y Capacidad de Producción por Empresa Panelera en Sandoná, 2025

| No. | Nombre del trapiche | Capacidad de producción en kg/semana | Costos de producción por unidad (1kg de panela) (\$) | | | | |
|-----|---------------------|--------------------------------------|--|-------|-------|---------|-----------|
| | | | Enero | Abril | Julio | Octubre | Diciembre |

| No. | Nombre del trapiche | Capacidad de producción en kg/semana | Costos de producción por unidad (1kg de panela) (\$) | | | | |
|-----|---------------------|--------------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | |
| 1 | El Saman | 8.000 | 3.700 | 3.700 | 3.700 | 3.750 | 3.800 |
| 2 | Las Delicias | 10.000 | 3.650 | 3.650 | 3.650 | 3.650 | 3.750 |
| 3 | La Avispa | 12.000 | 3.600 | 3.600 | 3.600 | 3.650 | 3.650 |
| 4 | Villa Inés | 12.000 | 3.600 | 3.600 | 3.600 | 3.650 | 3.650 |
| 5 | El Vergel | 10.000 | 3.650 | 3.650 | 3.650 | 3.650 | 3.750 |

Nota. La tabla presenta la capacidad de producción de cada empresa panelera y su relación con los costos asociados a la producción de un kilogramo de panela durante el año 2025. Incluye los costos de jornales e insumos (cajas de cartón, empaque termoencogible, cal de consumo humano, floculante, cera de laurel y cinta de empaque)

Costos del Transporte

La Tabla 5 presenta los costos unitarios de transporte indicados por los transportistas del municipio de Sandoná para el año 2025, los cuales variaron en función de la distancia entre el trapiche y la ciudad de destino, así como de la ruta utilizada por los transportistas. Este costo incluye el cargue (\$10/kg), flete y cuota de fomento panelero (\$34/kg).

Los costos oscilaron entre \$1.440.000 por camión de 10 toneladas para envíos a Cali y \$3.040.000 por camión de igual capacidad para Bogotá, lo que evidencia la incidencia significativa de la distancia en el costo logístico total.

Tabla 5*Costos Unitarios de Transporte de Panela de las Empresas Paneleras en Sandoná, 2025*

| Fecha | Nombre del trapiche | Cliente 1: en Cali (\$) | Cliente 2: en Ibagué (\$) | Cliente 3: en Neiva (\$) | Cliente 4: en Medellín (\$) | Cliente 5: en Bogotá (\$) |
|-----------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 15 de Enero | El Saman | 164 | 244 | 234 | 284 | 284 |
| | Las Delicias | 154 | 234 | 224 | 274 | 274 |
| | La Avispa | 144 | 224 | 214 | 264 | 264 |
| | Villa Inés | 144 | 224 | 214 | 264 | 264 |
| | El Vergel | 154 | 234 | 224 | 274 | 274 |
| 15 de Abril | El Saman | 169 | 249 | 239 | 284 | 284 |
| | Las Delicias | 159 | 239 | 229 | 274 | 274 |
| | La Avispa | 149 | 229 | 219 | 264 | 264 |
| | Villa Inés | 149 | 229 | 219 | 264 | 264 |
| | El Vergel | 159 | 239 | 229 | 274 | 274 |
| 15 de Julio | El Saman | 174 | 254 | 242 | 284 | 284 |
| | Las Delicias | 164 | 244 | 232 | 274 | 274 |
| | La Avispa | 154 | 234 | 222 | 264 | 264 |
| | Villa Inés | 154 | 234 | 222 | 264 | 264 |
| | El Vergel | 164 | 244 | 232 | 274 | 274 |
| 15 de Octubre | El Saman | 179 | 259 | 244 | 294 | 304 |
| | Las Delicias | 169 | 249 | 234 | 284 | 294 |
| | La Avispa | 159 | 239 | 224 | 274 | 284 |
| | Villa Inés | 159 | 239 | 224 | 274 | 284 |
| | El Vergel | 169 | 249 | 234 | 284 | 294 |
| 15 de Diciembre | El Saman | 184 | 264 | 244 | 294 | 304 |
| | Las Delicias | 174 | 254 | 234 | 284 | 294 |
| | La Avispa | 164 | 244 | 224 | 274 | 284 |
| | Villa Inés | 164 | 244 | 224 | 274 | 284 |

| Fecha | Nombre del trapiche | Cliente 1: en Cali (\$) | Cliente 2: en Ibagué (\$) | Cliente 3: en Neiva (\$) | Cliente 4: en Medellín (\$) | Cliente 5: en Bogotá (\$) |
|-------|---------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | El Vergel | 174 | 254 | 234 | 284 | 294 |

Nota. La tabla detalla la variación del costo de transporte (flete + cargue + cuota de fomento panelero) de un kilogramo de panela desde cada empresa panelera a las cinco ciudades de destino en el año 2025.

Costo Total de la Operación (Producción + Flete)

En la Tabla 6 se consolida el costo unitario total por kilogramo, resultante de la suma del costo de jornales, insumos correspondientes al proceso de elaboración en el trapiche, transporte, cargue, costo de adquisición de la caña y cuota de fomento panelero establecida por Fedepanela para el año 2025. Los valores obtenidos fluctuaron entre \$3.744/kg para envíos a Cali y \$4.104/kg para envíos a Bogotá, lo que confirma que la distancia al mercado de consumo es uno de los principales determinantes del costo logístico.

Tabla 6

Costos Unitarios de Producción y Transporte de Panela, 2025

| Fecha | Nombre del trapiche | Costo total en Cali | Costo total en Ibagué | Costo total en Neiva | Costo total en Medellín | Costo total en Bogotá |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 15 de Enero | El Saman | \$ 3.864 | \$ 3.944 | \$ 3.934 | \$ 3.984 | \$ 3.984 |
| | Las Delicias | \$ 3.804 | \$ 3.884 | \$ 3.874 | \$ 3.924 | \$ 3.924 |
| | La Avispa | \$ 3.744 | \$ 3.824 | \$ 3.814 | \$ 3.864 | \$ 3.864 |
| | Villa Inés | \$ 3.744 | \$ 3.824 | \$ 3.814 | \$ 3.864 | \$ 3.864 |
| | El Vergel | \$ 3.804 | \$ 3.884 | \$ 3.874 | \$ 3.924 | \$ 3.924 |

| Fecha | Nombre del trapiche | Costo total en Cali | Costo total en Ibagué | Costo total en Neiva | Costo total en Medellín | Costo total en Bogotá |
|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 15 de Abril | El Saman | \$ 3.869 | \$ 3.949 | \$ 3.939 | \$ 3.984 | \$ 3.984 |
| | Las Delicias | \$ 3.809 | \$ 3.889 | \$ 3.879 | \$ 3.924 | \$ 3.924 |
| | La Avispa | \$ 3.749 | \$ 3.829 | \$ 3.819 | \$ 3.864 | \$ 3.864 |
| | Villa Inés | \$ 3.749 | \$ 3.829 | \$ 3.819 | \$ 3.864 | \$ 3.864 |
| | El Vergel | \$ 3.809 | \$ 3.889 | \$ 3.879 | \$ 3.924 | \$ 3.924 |
| 15 de Julio | El Saman | \$ 3.874 | \$ 3.954 | \$ 3.942 | \$ 3.984 | \$ 3.984 |
| | Las Delicias | \$ 3.814 | \$ 3.894 | \$ 3.882 | \$ 3.924 | \$ 3.924 |
| | La Avispa | \$ 3.754 | \$ 3.834 | \$ 3.822 | \$ 3.864 | \$ 3.864 |
| | Villa Inés | \$ 3.754 | \$ 3.834 | \$ 3.822 | \$ 3.864 | \$ 3.864 |
| | El Vergel | \$ 3.814 | \$ 3.894 | \$ 3.882 | \$ 3.924 | \$ 3.924 |
| 15 de Octubre | El Saman | \$ 3.929 | \$ 4.009 | \$ 3.994 | \$ 4.044 | \$ 4.054 |
| | Las Delicias | \$ 3.819 | \$ 3.899 | \$ 3.884 | \$ 3.934 | \$ 3.944 |
| | La Avispa | \$ 3.809 | \$ 3.889 | \$ 3.874 | \$ 3.924 | \$ 3.934 |
| | Villa Inés | \$ 3.809 | \$ 3.889 | \$ 3.874 | \$ 3.924 | \$ 3.934 |
| | El Vergel | \$ 3.819 | \$ 3.899 | \$ 3.884 | \$ 3.934 | \$ 3.944 |
| 15 de Diciembre | El Saman | \$ 3.984 | \$ 4.064 | \$ 4.044 | \$ 4.094 | \$ 4.104 |
| | Las Delicias | \$ 3.924 | \$ 4.004 | \$ 3.984 | \$ 4.034 | \$ 4.044 |
| | La Avispa | \$ 3.814 | \$ 3.894 | \$ 3.874 | \$ 3.924 | \$ 3.934 |
| | Villa Inés | \$ 3.814 | \$ 3.894 | \$ 3.874 | \$ 3.924 | \$ 3.934 |
| | El Vergel | \$ 3.924 | \$ 4.004 | \$ 3.984 | \$ 4.034 | \$ 4.044 |

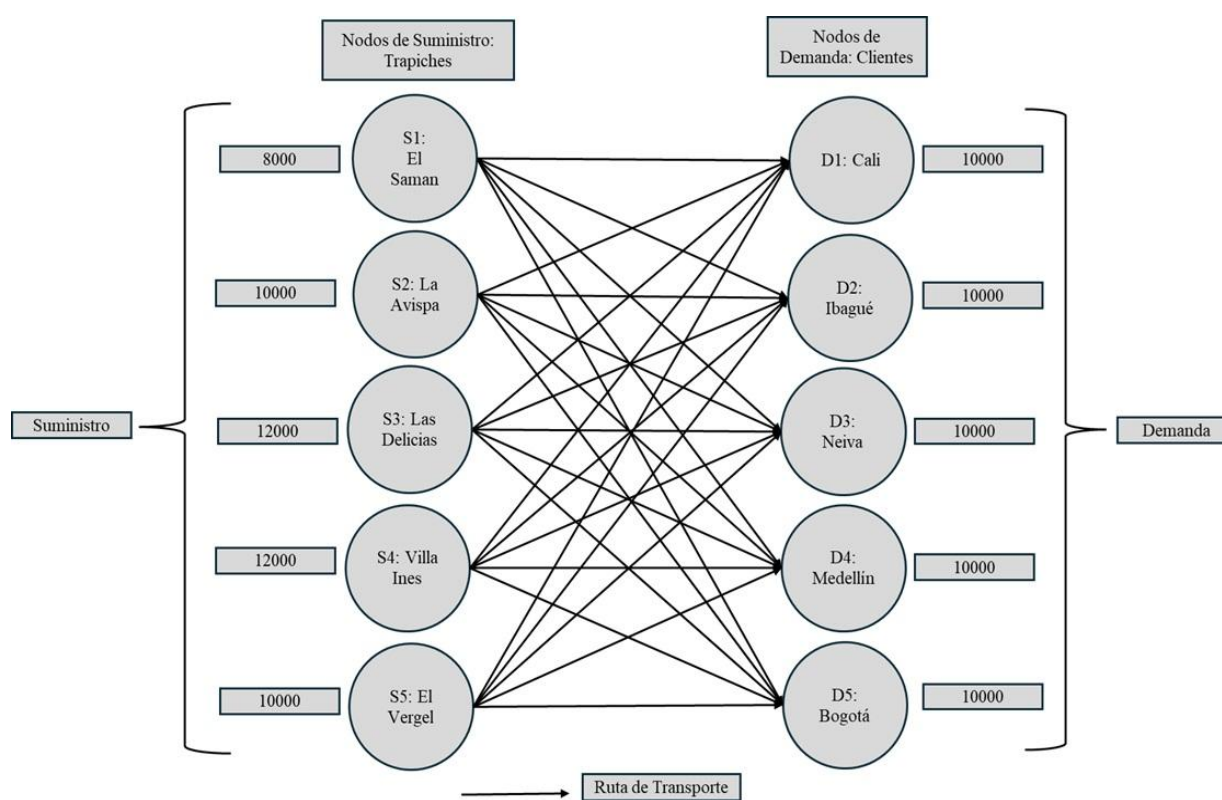
Nota. La tabla muestra los costos unitarios de producción y transporte (COP/kg) de la panela desde las empresas paneleras del municipio de Sandoná hacia las principales ciudades de destino, los cuales varían en función de la localización del trapiche y del mercado de consumo para el año 2025.

Diseño del Diagrama de Red

En la Figura 1 se encuentra el diagrama de red del sistema logístico, en el cual se identifican los nodos de suministro correspondientes a los trapiches paneleros y los nodos de demanda o plazas de mercado. Las flechas representan las rutas de transporte posibles, incorporando tanto la capacidad de producción como la demanda de cada cliente.

Figura 1

Red de Transporte Para la Distribución de Panela Desde Sandoná, Nariño



Nota. La figura representa las rutas de transporte que permiten a las empresas paneleras cumplir con los pedidos de los clientes, de acuerdo con su capacidad de producción y la demanda solicitada, 2025.

Para cada uno de los cinco trapiches se identificaron cinco rutas de distribución, lo que generó un total de 25 alternativas de comercialización. Estas rutas se definieron como variables de decisión dentro del modelo matemático de optimización.

Identificación de Variables de Decisión

Se identificaron 25 variables de decisión (Tabla 7), cada una correspondió al envío de panela desde un trapiche específico hacia una plaza de mercado determinada. Esta formulación es consistente con la estructura clásica del problema de transporte y permite representar de manera precisa las interacciones entre oferta y demanda dentro del sistema logístico panelero.

Tabla 7

Variables de Decisión del Modelo Para la Optimización del Transporte de Panela

| Variables de decisión para los cinco trapiches |
|---|
| X11 = Panela enviada desde la empresa panelera El Saman hasta la plaza de mercado en Cali |
| X12 = Panela enviada desde la empresa panelera El Saman hasta la plaza de mercado en Ibagué |
| X13 = Panela enviada desde la empresa panelera El Saman hasta la plaza de mercado en Neiva |
| X14 = Panela enviada desde la empresa panelera El Saman hasta la plaza de mercado en Medellín |
| X15 = Panela enviada desde la empresa panelera El Saman hasta la plaza de mercado en Bogotá |
| X21 = Panela enviada desde la empresa panelera Las Delicias hasta la plaza de mercado en Cali |
| X22 = Panela enviada desde la empresa panelera Las Delicias hasta la plaza de mercado en Ibagué |

VARIABLES DE DECISIÓN PARA LOS CINCO TRAPICHES

X23 = Panela enviada desde la empresa panelera Las Delicias hasta la plaza de mercado en

Neiva

X24 = Panela enviada desde la empresa panelera Las Delicias hasta la plaza de mercado en

Medellín

X25 = Panela enviada desde la empresa panelera Las Delicias hasta la plaza de mercado en

Bogotá

X31 = Panela enviada desde la empresa panelera La Avispa hasta la plaza de mercado en Cali

X32 = Panela enviada desde la empresa panelera La Avispa hasta la plaza de mercado en

Ibagué

X33 = Panela enviada desde la empresa panelera La Avispa hasta la plaza de mercado en

Neiva

X34 = Panela enviada desde la empresa panelera La Avispa hasta la plaza de mercado en

Medellín

X35 = Panela enviada desde la empresa panelera La Avispa hasta la plaza de mercado en

Bogotá

X41 = Panela enviada desde la empresa panelera Villa Inés hasta la plaza de mercado en Cali

X42 = Panela enviada desde la empresa panelera Villa Inés hasta la plaza de mercado en

Ibagué

X43 = Panela enviada desde la empresa panelera Villa Inés hasta la plaza de mercado en Neiva

X44 = Panela enviada desde la empresa panelera Villa Inés hasta la plaza de mercado en

Medellín

VARIABLES DE DECISIÓN PARA LOS CINCO TRAPICHES

X45 = Panela enviada desde la empresa panelera Villa Inés hasta la plaza de mercado en

Bogotá

X51 = Panela enviada desde la empresa panelera El Vergel hasta la plaza de mercado en Cali

X52 = Panela enviada desde la empresa panelera El Vergel hasta la plaza de mercado en

Ibagué

X53 = Panela enviada desde la empresa panelera El Vergel hasta la plaza de mercado en Neiva

X54 = Panela enviada desde la empresa panelera El Vergel hasta la plaza de mercado en

Medellín

X55 = Panela enviada desde la empresa panelera El Vergel hasta la plaza de mercado en

Bogotá

Nota. La tabla presenta 25 variables de decisión asociadas al envío de panela sandoneña desde cinco trapiches paneleros hacia cinco plazas de mercado en Colombia. El primer subíndice de cada variable identifica la empresa panelera de origen y el segundo subíndice identifica el cliente o plaza de mercado de destino.

Función Objetivo Adaptado a las Condiciones Locales de Sandonú

La Tabla 8 presenta la función objetivo formulada para cada uno de los cinco escenarios temporales. El objetivo del modelo consistió en minimizar el costo total de producción y transporte de la panela, considerando los costos unitarios y las variables de decisión relacionadas a cada ruta. Estos datos se calcularon para el año 2025.

Tabla 8*Función Objetivo del Modelo de Transporte de Panela, 2025*

| Fecha | Función objetivo |
|---------------|--|
| | Minimizar $z =$ |
| 15 de Enero | $3864X_{11}+3944X_{12}+3934X_{13}+3984X_{14}+3984X_{15}+3804X_{21}+3884X_{22}+3874X_{23}+3924X_{24}+3924X_{25}+3744X_{31}+3824X_{32}+3814X_{33}+3864X_{34}+3864X_{35}+3744X_{41}+3824X_{42}+3814X_{43}+3864X_{44}+3864X_{45}+3804X_{51}+3884X_{52}+3874X_{53}+3924X_{54}+3924X_{55}$ |
| | Minimizar $z =$ |
| 15 de Abril | $3869X_{11}+3949X_{12}+3939X_{13}+3984X_{14}+3984X_{15}+3809X_{21}+3889X_{22}+3879X_{23}+3924X_{24}+3924X_{25}+3749X_{31}+3829X_{32}+3819X_{33}+3864X_{34}+3864X_{35}+3749X_{41}+3829X_{42}+3819X_{43}+3864X_{44}+3864X_{45}+3809X_{51}+3889X_{52}+3879X_{53}+3924X_{54}+3924X_{55}$ |
| | Minimizar $z =$ |
| 15 de Julio | $3874X_{11}+3954X_{12}+3942X_{13}+3984X_{14}+3984X_{15}+3814X_{21}+3894X_{22}+3882X_{23}+3924X_{24}+3924X_{25}+3754X_{31}+3834X_{32}+3822X_{33}+3864X_{34}+3864X_{35}+3754X_{41}+3834X_{42}+3822X_{43}+3864X_{44}+3864X_{45}+3814X_{51}+3894X_{52}+3882X_{53}+3924X_{54}+3924X_{55}$ |
| | Minimizar $z =$ |
| 15 de Octubre | $3929X_{11}+4009X_{12}+3994X_{13}+4044X_{14}+4054X_{15}+3819X_{21}+3899X_{22}+3884X_{23}+3934X_{24}+3944X_{25}+3809X_{31}+3889X_{32}+3874X_{33}+3924X_{34}+3934X_{35}+3809X_{41}+3889X_{42}+3874X_{43}+3924X_{44}+3934X_{45}+3819X_{51}+3899X_{52}+3884X_{53}+3934X_{54}+3944X_{55}$ |

| Fecha | Función objetivo |
|-----------------|---|
| 15 de Diciembre | $\begin{aligned} & \text{Minimizar } z = \\ & 3984X_{11}+4064X_{12}+4044X_{13}+4094X_{14}+4104X_{15}+3924X_{21}+4004X_{22}+3984X_{23} \\ & +4034X_{24}+4044X_{25}+3814X_{31}+3894X_{32}+3874X_{33}+3924X_{34}+3934X_{35}+38 \\ & 14X_{41}+3894X_{42}+3874X_{43}+3924X_{44}+3934X_{45}+3924X_{51}+4004X_{52}+3984X_{53} \\ & +4034X_{54}+4044X_{55} \end{aligned}$ |

Nota. La tabla presenta los algoritmos utilizados para minimizar los costos de producción y transporte, considerando los costos unitarios de producción de un kilogramo de panela y su distribución hacia las plazas de mercado en Colombia durante el año 2025.

La formulación del modelo incluyó las 25 variables de decisión y las restricciones de oferta y demanda, siguiendo los principios del método Simplex aplicado a problemas de transporte, ampliamente utilizado en la optimización de sistemas logísticos (Taha, 2017)

Planteamiento de las Restricciones

Las restricciones de suministro y demanda se presentan en la Tabla 9. Las restricciones de oferta se formularon como desigualdades menores o iguales a la capacidad de producción de cada trapiche, la cual osciló entre 8.000 y 12.000 kg por semana. Las restricciones de demanda se establecieron como igualdades, fijando un requerimiento de 10.000 kg/semana para cada cliente.

Solución de la Función Objetivo

Los resultados de la optimización a través del programa LINGO 21.0 se presentan en la Tabla 10. Para los meses de enero, abril, julio, octubre y diciembre la función objetivo generó un

costo mínimo optimizado de \$193.020.000, \$193.120.000, \$193.200.000, \$195.070.000, \$196.420.000 respectivamente.

Tabla 9

Restricciones Para el Modelo Simplex Adaptado a las Condiciones de Sandoná, 2025

| Restricciones de suministro y demanda para la operación de transporte | |
|---|-------------------------------|
| Sujeto a: | |
| Restricciones de suministro | |
| $x_{11}+x_{12}+x_{13}+x_{14}+x_{15} \leq 8000$ | Empresa panelera El Saman |
| $x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}+x_{25} \leq 10000$ | Empresa panelera Las Delicias |
| $x_{31}+x_{32}+x_{33}+x_{34}+x_{35} \leq 12000$ | Empresa panelera La Avispa |
| $x_{41}+x_{42}+x_{43}+x_{44}+x_{45} \leq 12000$ | Empresa panelera Villa Inés |
| $x_{51}+x_{52}+x_{53}+x_{54}+x_{55} \leq 10000$ | Empresa panelera El Vergel |
| Restricciones de demanda | |
| $x_{11}+x_{21}+x_{31}+x_{41}+x_{51} = 10000$ | Cliente en Cali |
| $x_{12}+x_{22}+x_{32}+x_{42}+x_{52} = 10000$ | Cliente en Ibagué |
| $x_{13}+x_{23}+x_{33}+x_{43}+x_{53} = 10000$ | Cliente en Neiva |
| $x_{14}+x_{24}+x_{34}+x_{44}+x_{54} = 10000$ | Cliente en Medellín |
| $x_{15}+x_{25}+x_{35}+x_{45}+x_{55} = 10000$ | Cliente en Bogotá |

Nota. Se muestran las restricciones de oferta y demanda del modelo de transporte. Las restricciones de oferta se formulan como desigualdades menores o iguales a la capacidad de producción del trapiche, y las restricciones de demanda se formulan como igualdades que satisfacen los requerimientos de los clientes.

El costo mínimo total de la operación osciló entre \$193.020.000 en enero y \$196.420.000 en diciembre de 2025, lo que representa un incremento acumulado de \$3.400.000 en el año, explicado principalmente por el aumento progresivo en los costos de producción y transporte.

En promedio, las cinco empresas paneleras debieron contar con una inversión mínima de \$194.166.000 para atender la demanda conjunta de los cinco clientes analizados.

Tabla 10

Resultados de la Optimización del Transporte de Panela en Sandoná, 2025

| No. de simulación | Fecha | No. de variables | Costo mínimo resultado de la función objetivo |
|-------------------|-----------------|------------------|---|
| 1 | 15 de Enero | 25 | \$193.020.000,00 |
| 2 | 15 de Abril | 25 | \$193.120.000,00 |
| 3 | 15 de Julio | 25 | \$193.200.000,00 |
| 4 | 15 de Octubre | 25 | \$195.070.000,00 |
| 5 | 15 de Diciembre | 25 | \$196.420.000,00 |

Nota. La tabla presenta el costo mínimo obtenido para la operación conjunta de producción y transporte de panela en cinco escenarios de análisis, considerando cinco trapiches paneleros y cinco clientes durante el año 2025.

Asignación Óptima de los Envíos

La Tabla 11 muestra la asignación óptima de los envíos desde los trapiches paneleros hacia las ciudades de destino, la cual resultó idéntica para las cinco fechas analizadas. Esta igualdad en la solución indica que, pese a las variaciones en los costos entre periodos de tiempo

la diferencia no fue significativa por lo que la estructura óptima de distribución se mantuvo constante durante todo el año 2025.

Tabla 11

Asignación Óptima del Modelo de Transporte Panelero en Sandoná, 2025.

| Nombre de trapiche | Capacidad de producción en kg/semana | Solución óptima para hacer los envíos en kg de panela | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|---|--------|-------|----------|--------|
| | | Cali | Ibagué | Neiva | Medellín | Bogotá |
| El Saman | 8.000 | 0 | 6.000 | 0 | 0 | 0 |
| Las Delicias | 10.000 | 10.000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| La Avispa | 12.000 | 0 | 0 | 0 | 2.000 | 10.000 |
| Villa Inés | 12.000 | 0 | 0 | 4.000 | 8.000 | 0 |
| El Vergel | 10.000 | 0 | 4.000 | 6.000 | 0 | 0 |
| Total, del pedido kg/semana | 52000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |

Nota. La tabla presenta la capacidad de producción de cada trapiche panelero y la asignación óptima de kilogramos de panela, con la cual se satisface la demanda de los clientes en cada ciudad sin exceder la capacidad productiva de cada trapiche.

La asignación óptima estableció que:

Cali debe ser atendida con 10.000 kg (100%) del trapiche Las Delicias.

Ibagué debe ser atendida con 6.000 kg (60%) provenientes del trapiche El Saman y 4.000 kg (40%) del trapiche El Vergel.

Neiva debe recibir 4.000 kg (40%) del trapiche Villa Inés y 6.000 de El Vergel (60%)
Medellín debe ser abastecida con 2.000 kg del trapiche La Avispa (20%) y 8.000 (80%)
kg del trapiche Villa Inés.

Bogotá debe recibir 10.000 kg (100%) del trapiche La Avispa.

La configuración óptima del modelo permitió alcanzar los costos mínimos de transporte para cada uno de los escenarios evaluados, evidenciando la eficiencia del método simplex en la asignación de flujos logísticos. Los resultados muestran que no necesariamente la utilización total de la capacidad productiva de todos los trapiches conduce a la minimización del costo total del sistema, sino que una asignación estratégica de la producción resulta más eficiente desde el punto de vista económico.

Adicionalmente, se evidenció que el trapiche El Saman, pese a contar con una capacidad de 8.000 kg por semana, debe operar únicamente al 75 % de su capacidad para lograr la solución óptima del sistema, esta reducción óptima en su producción se explica por presentar mayores costos de producción y transporte con respecto a los demás trapiches analizados, sin embargo, el trapiche El Saman posee características estratégicas que lo convierten en un actor clave dentro del sistema logístico. Su localización en una zona óptima para el cultivo de caña panelera, con condiciones climáticas favorables propias de altitudes cercanas a los 1.000 msnm, favorece la estabilidad productiva. Adicionalmente, la baja presencia de competencia en su área de influencia incrementa su relevancia como unidad productiva de respaldo.

En consecuencia, aunque en las condiciones evaluadas el modelo recomienda una operación parcial del trapiche El Saman, su inclusión en el sistema resulta fundamental para garantizar la continuidad del abastecimiento en escenarios de escasez de panela, variaciones inesperadas en la demanda o limitaciones productivas de otros trapiches. Esto resalta la

importancia de considerar no solo criterios de costo mínimo, sino también factores estratégicos y de resiliencia logística en la planificación del transporte del sector panelero.

Al comparar la asignación optimizada con la configuración no optimizada (Tabla 12) evidencian impactos significativos tanto en la estructura de costos como en el aprovechamiento de la capacidad productiva de los trapiches paneleros analizados. En el escenario no optimizado, el trapiche El Saman se ve obligado a operar al máximo de su capacidad instalada e incluso a complementar la demanda mediante la compra de panela a terceros, lo cual incrementa los costos operativos y reduce el margen de rentabilidad. Esto coincide con lo señalado por (Ballou, 2004), quien indica que la falta de herramientas de optimización en la planeación del transporte puede generar concentraciones ineficientes de carga y sobrecostos por el uso inadecuado de los recursos productivos.

De manera simultánea, los trapiches La Avispa y Villa Inés presentan niveles de producción inferiores a su capacidad instalada, reflejando una subutilización de los recursos disponibles. En términos económicos, la configuración no optimizada de los envíos genera sobrecostos recurrentes en los meses de enero, abril, julio y octubre, estimados en \$480.000 por escenario evaluado, y un sobrecosto de \$680.000 en el mes de diciembre. En conjunto, estos presentan un sobrecosto total de \$2.600.000 en los cinco escenarios evaluados durante el año 2025. Estos resultados confirman la relevancia del modelo de transporte basado en programación lineal, específicamente del método simplex, como una herramienta eficaz para la minimización de costos logísticos (Armenta et al., 2016) tal como lo indica Taha (2017), al señalar que estos modelos permiten una asignación óptima de flujos que equilibra la oferta, la demanda y las capacidades disponibles.

Los resultados obtenidos confirman que la aplicación del método Simplex constituye una herramienta eficaz para la optimización del transporte en sistemas agroindustriales. En esta investigación, el uso del modelo simplex optimizó el transporte de la panela, lo cual es consecuente con algunos estudios en los cuales el método simplex aumentó la eficiencia del transporte de carga en un 25% (Prokudin et al., 2022) y redujo los costos en la distribución de inventario representando un ahorro del 78.91% (Hassan & Masrom, 2022), además estos modelos ayudan a reducir costos de trasportación (Loor et al., 2012)

Tabla 12

Asignación no Optimizada del Modelo de Transporte Panelero en Sandoná, 2025.

| Nombre de trapiche | Capacidad de producción en kg/semana | Solución óptima para hacer los envíos en kg de panela | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|---|--------|--------|----------|--------|
| | | Cali | Ibagué | Neiva | Medellín | Bogotá |
| El Saman | 8.000 | 0 | 0 | 10.000 | 0 | 0 |
| Las Delicias | 10.000 | 10.000 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| La Avispa | 12.000 | 0 | 0 | 0 | 10.000 | 0 |
| Villa Inés | 12.000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.000 |
| El Vergel | 10.000 | 0 | 10.000 | 0 | 0 | 0 |
| Total, del pedido kg/semana | 52000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |

Nota. La tabla presenta la capacidad de producción de cada trapiche panelero y la asignación tradicional o no optimizada de panela, con la cual se satisface la demanda de los clientes en cada ciudad sin exceder la capacidad productiva de cada trapiche.

Durante la ejecución de este proyecto aplicado en el sector panelero, se observó que la aplicación del modelo Simplex permitió no solo minimizar los costos logísticos, sino también identificar patrones óptimos de asignación que contribuyeron a una gestión más eficiente de la producción y la distribución, fortaleciendo la competitividad de los pequeños y medianos productores.

Análisis de Sensibilidad - Factibilidad

En la Tabla 13, se encuentra los rangos en los que la oferta de panela puede variar sin cambiar la base óptima.

Tabla 13

Restricciones de Oferta Durante el Análisis de Sensibilidad Panelero (kg)

| Trapiche | Capacidad | Aumento permitido | Disminución permitida |
|--------------|-----------|-------------------|-----------------------|
| El Saman | 8.000 | ∞ | 2.000 |
| Las Delicias | 10.000 | 6.000 | 0 |
| La Avispa | 12.000 | 6.000 | 2.000 |
| Villa Inés | 12.000 | 6.000 | 2.000 |
| El Vergel | 10.000 | 6.000 | 2.000 |

Nota. La tabla presenta los rangos en los cuales la producción de panela puede aumentar o disminuir sin cambiar la estructura de los envíos.

El trapiche El Saman tiene holgura de 2.000 kg, por lo que no utiliza toda su capacidad, los demás operan a su máxima capacidad. El sistema tolera incrementos moderados de capacidad sin alterar la estructura.

El Saman puede incrementar su producción, pero lo mínimo que debe producir es 6.000 kg, es decir, puede reducir su capacidad hasta el 25%, sin que cambie la solución óptima.

Las delicias pueden producir hasta 16.000 kg (60%), pero no puede producir menos de 10.000 kg para que la asignación siga siendo factible (0%)

La Avispa puede producir hasta 18.000 kg (50%), pero no puede producir menos de 10.000 kg (17%) para que la asignación siga siendo factible

Villa Inés puede producir hasta 18.000 kg (50%), pero no puede producir menor de 10.000 (17%) para que la asignación siga siendo factible

El Vergel puede producir hasta 16.000 kg (60%), pero no puede producir menos de 8.000 kg (20%) para que la asignación siga siendo factible

En la Tabla 14, se encuentran los rangos en los que la demanda de panela puede variar sin cambiar la base óptima.

Tabla 14

Restricciones de Demanda Durante el Análisis de Sensibilidad Panelero (kg)

| Cliente | Capacidad | Aumento permitido | Disminución permitida |
|----------|-----------|-------------------|-----------------------|
| Cali | 10.000 | 0 | 6.000 |
| Ibagué | 10.000 | 2.000 | 6.000 |
| Neiva | 10.000 | 2.000 | 6.000 |
| Medellín | 10.000 | 2.000 | 6.000 |
| Bogotá | 10.000 | 2.000 | 6.000 |

Nota. La tabla presenta los rangos en los cuales la demanda de panela puede aumentar o disminuir sin cambiar la estructura de los envíos.

El volumen de pedido en la ciudad de Cali no puede aumentar ($= 0$), esto indica que el mercado más crítico es Cali, ya que cualquier aumento obligaría a reoptimizar. En cambio, en las plazas de mercado en Ibagué, Neiva, Medellín, Bogotá pueden aumentar su pedido hasta 2.000 kg sin cambiar base.

Análisis de Sensibilidad - Optimalidad

Las variables con rango (0 - 0) muy sensibles fueron las rutas: X34 (La Avispa - Medellín), X43 (Villa Inés - Neiva), X44 (Villa Inés - Medellín), X52 (El Vergel - Ibagué), X53 (Vergel - Neiva) por lo que se consideran estructurales y cualquier variación mínima en su costo cambiaría la solución óptima.

Análisis Económico

En la Tabla 15 se encuentran los precios sombra generados en el modelo.

Tabla 15

Precios Sobra del Modelo Simplex

| Cliente | Enero | Abril | Julio | Octubre | Diciembre |
|----------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Cali | \$3.864 | \$3.864 | \$3.864 | \$3.914 | \$3.864 |
| Ibagué | \$3.944 | \$3.949 | \$3.954 | \$4.009 | \$4.064 |
| Neiva | \$3.934 | \$3.939 | \$3.942 | \$3.994 | \$4.044 |
| Medellín | \$3.984 | \$3.984 | \$3.984 | \$4.044 | \$4.094 |
| Bogotá | \$3.984 | \$3.984 | \$3.984 | \$4.054 | \$4.104 |

Nota. La tabla indica cuánto aumentaría el costo total si la demanda aumenta en 1 unidad, es decir, si la demanda en Bogotá aumenta en 1 kilogramo, el costo total aumentará en 4.104 COP.

Los precios sombra de las restricciones de demanda representan el costo marginal de abastecimiento por ciudad. Los resultados evidencian que Bogotá presenta el mayor costo marginal en Diciembre (4.104 COP por unidad adicional), lo cual indica mayor tensión logística en este mercado. En contraste, Cali presenta el menor costo marginal relativo (3.864 COP), sugiriendo mayor flexibilidad de expansión. Estos valores permiten evaluar la conveniencia económica de ampliar mercados o negociar precios en función del impacto logístico marginal.

Análisis de Escenarios Sobre la Base Óptima

A continuación, se encuentra el comparativo entre escenarios considerando las variaciones de la Tabla 1.

Asignación Óptima

En los cuatro escenarios se mantienen las mismas rutas (Tabla 11), no cambia la base óptima, no cambia la estructura de nodos estratégicos, solo se ajustan magnitudes (en el pesimista por reducción de demanda).

Análisis Escenario Optimista (-10% flete)

La reducción proporcional de costos no altera la estructura, se mantiene la misma red de flujos, mejora únicamente el costo total por lo que el sistema es insensible a mejoras de flete.

Pesimista (+20% Flete, -10% Demanda, -10% Capacidad)

A pesar de reducción de oferta y demanda, la estructura no cambia, solo disminuyen volúmenes transportados (9.000 kg en vez de 10.000 kg) lo cual no es conveniente ya que normalmente se contrata un camión para 10 toneladas, pero las rutas siguen siendo las mismas. Esto muestra que el sistema presenta elasticidad proporcional, pero no reconfiguración estructural.

Shock (+50% Flete, Red Tensionada)

El incremento severo del flete tampoco modifica la asignación, por lo que bajo un aumento del 50% en costos, el modelo mantiene la misma solución básica. Las ventajas relativas entre rutas son suficientemente marcadas como para resistir perturbaciones fuertes.

Comparativo de Precios Sombra

En la Tabla 16 se encuentran los precios sombra de la oferta, estos precios crecen proporcionalmente a la tensión del sistema.

Tabla 16

Precios Sombra de Oferta por Escenario

| Trapiche | Optimista | Base | Pesimista | Shock |
|--------------|-----------|------|-----------|-------|
| El Saman | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Las Delicias | 54 | 60 | 72 | 90 |
| La Avispa | 153 | 170 | 204 | 255 |
| Villa Inés | 153 | 170 | 204 | 255 |
| El Vergel | 54 | 60 | 72 | 90 |

Nota. Esta tabla muestra como los precios (COP) sombra crecen proporcionalmente al aumento del costo en los escenarios. En orden de criticidad constante se encuentran en primer lugar el trapiche La Avispa, seguido de Villa Inés, Las Delicias y El Vergel. El Saman fue no vinculante.

Económicamente se muestra que, en el escenario optimista, la capacidad marginal vale menos, en el pesimista, la capacidad vale más, en el shock, la capacidad es extremadamente valiosa, por lo que aumentar 1 kg de panela en La Avispa reduce el costo total en \$255. Esto

significa que, en escenarios adversos, ampliar capacidad en nodos estratégicos genera mayor retorno marginal.

En cuanto a la demanda, la Tabla 17 muestra un patrón constante y el orden de presión marginal es: Cliente en Bogotá, seguido de Medellín, Ibagué, Neiva y Cali. Este ranking nunca cambia.

Estos resultados muestran que el mercado en Bogotá es estructuralmente el más costoso, Cali es el más económico marginalmente. En el escenario shock, atender una unidad adicional en Bogotá cuesta \$6.156. Esto demuestra que la estructura geográfica domina la sensibilidad marginal.

Tabla 17

Precios Sombra de Demanda por Escenario

| Cliente | Optimista | Base | Pesimista | Shock |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| Cali | -\$3.478 | -\$3.864 | -\$4.637 | -\$5.796 |
| Ibagué | -\$3.658 | -\$4.064 | -\$4.877 | -\$6.096 |
| Neiva | -\$3.640 | -\$4.044 | -\$4.853 | -\$6.066 |
| Medellín | -\$3.685 | -\$4.094 | -\$4.913 | -\$6.141 |
| Bogotá | -\$3.694 | -\$4.104 | -\$4.925 | -\$6.156 |

Nota. La tabla muestra un patrón constante de precios sombra en la demanda

Finalmente se puede deducir que el sistema es robusto en el que ningún escenario genera cambio en la base óptima, los nodos estratégicos son los trapiches La Avispa y Villa Inés y los mercados más costosos son Bogotá y Medellín.

Análisis de Escenarios Posibles e Impacto Económico (Únicamente Transporte)

En la Tabla 18 se encuentran los resultados para los tres escenarios analizados, estos se obtuvieron únicamente para los costos de transporte sin incluir los costos de producción. La estructura óptima de asignación no cambia, lo que indica estabilidad estructural del sistema, aunque no estabilidad económica. Los costos futuros variaron entre \$11.018.000 y \$18.330.000 lo que supone que un comerciante para suplir los cinco mercados además de la compra de la panela debe contar con \$18.330.000 para suplir el transporte, cargue y cuota de fomento panelero ante un escenario Shock.

Los resultados evidencian que la estructura óptima de asignación se mantiene invariable en los diferentes escenarios analizados, lo que demuestra una estabilidad estructural del sistema logístico ante variaciones en los parámetros evaluados. Sin embargo, esta estabilidad en la configuración de flujos no implica estabilidad económica, dado que el valor de la función objetivo sí experimenta variaciones.

Tabla 18

Comparación del Costo Entre Escenarios- Solo Transporte

| Escenario | Costo Total | Variación |
|-----------|--------------|---|
| Optimista | \$11.018.000 | Flete -10%, demanda estable |
| Base | \$12.220.000 | 0% |
| Pesimista | \$13.206.600 | Flete +20%, demanda -10%, capacidad -10% |
| Shock | \$18.330.000 | Cierre temporal de ruta → redirección, aumento Flete +50% |

Nota. En la tabla se observa un incremento progresivo del costo ante aumentos en los costos unitarios de transporte.

En términos monetarios, los costos proyectados de transporte oscilan entre \$11.018.000 COP y \$18.330.000 COP, según el escenario considerado. En consecuencia, para garantizar el abastecimiento total de los cinco mercados, un comerciante además de asumir el costo de adquisición de la panela debe prever una disponibilidad de recursos dentro de este rango, destinados exclusivamente a cubrir los costos de transporte, cargue y la cuota de fomento panelero, tanto en un contexto optimista como en uno adverso.

En cuanto a la oferta de la panela, El Saman obtuvo slack positivo y con precio sombra de 0 lo que indica que esta empresa no produce un recurso escaso y supone que incrementar su capacidad no reduce el costo total. Por otro lado, en la Tabla 19 se encuentra el comparativo del precio sombra para los trapiches; en este, a medida que el escenario se deteriora, el precio sombra aumenta, esto implica que: El sistema se vuelve más sensible a restricciones de capacidad, cada kilogramo adicional producido genera mayor ahorro en el costo total, la escasez relativa del recurso se intensifica cuando el transporte es más costoso.

En el escenario Shock: La Avispa y Villa Inés alcanzan un valor marginal de 30, esto significa que ampliar capacidad en estos trapiches genera un ahorro significativo. Estos resultados suponen que la capacidad productiva se convierte en un activo estratégico bajo condiciones adversas.

Tabla 19

Empresas con Capacidad Crítica - Precio Sombra por Escenario – Oferta

| Empresa | Optimista | Base | Pesimista | Shock |
|--------------|-----------|------|-----------|-------|
| Las Delicias | 9 | 10 | 12 | 15 |
| La Avispa | 18 | 20 | 24 | 30 |
| Villa Inés | 18 | 20 | 24 | 30 |
| El Vergel | 9 | 10 | 12 | 15 |

Nota. Esta tabla muestra que a medida que el escenario se deteriora, el precio sombra aumenta.

En cuanto a la demanda (Tabla 20) el precio sombra mostró el costo marginal de atender 1 kg adicional de panela, se encontró que el cliente en Bogotá es consistentemente el mercado más costoso marginalmente seguido de Medellín que ocupa el segundo lugar, caso contrario el cliente ubicado en Cali es el mercado menos costoso marginalmente. Por otro lado, el escenario Shock mostró que atender 1 kg adicional en Bogotá cuesta \$456, esto es 66% más que en el escenario optimista. Estos resultados muestran que este sistema presenta alta sensibilidad marginal en mercados alejados o costosos cuando se incrementan los costos de transporte.

Tabla 20

Precio Sombra por Ciudad - Análisis Comparativo del Precio Sombra – Demanda

| Ciudad | Optimista | Base | Pesimista | Shock |
|----------|-----------|-------|-----------|-------|
| Cali | \$166 | \$184 | \$221 | \$276 |
| Ibagué | \$238 | \$264 | \$317 | \$396 |
| Neiva | \$220 | \$244 | \$293 | \$366 |
| Medellín | \$265 | \$294 | \$353 | \$441 |
| Bogotá | \$274 | \$304 | \$365 | \$456 |

Nota. La Tabla muestra los valores absolutos del precio sombra por kilogramo para los tres escenarios evaluados

Conclusiones

El modelo de optimización basado en el método simplex, adaptado a las condiciones del sector panelero, demostró ser una herramienta flexible y eficaz para la planificación logística y la toma de decisiones. Su estructura permite ajustarse a variaciones en el número de trapiches, clientes, niveles de demanda y capacidades productivas de los trapiches.

La aplicación del modelo permitió determinar el costo mínimo semanal de la operación de transporte para los cinco trapiches durante el año 2025, evidenciando un comportamiento creciente a lo largo del año. Los costos optimizados fueron de \$193.020.000 en enero, \$193.120.000 en abril, \$193.200.000 en julio, \$195.070.000 en octubre y \$196.420.000 en diciembre lo que significó un ahorro de \$2.600.000 con respecto al sistema no optimizado.

La minimización del costo total para satisfacer una demanda semanal de 52.000 kg de panela se logra con la siguiente configuración: El trapiche Las Delicias debe operar a plena capacidad abasteciendo exclusivamente a Cali (10.000 kg), mientras que La Avispa distribuye su producción entre Bogotá (10.000 kg) y Medellín (2.000 kg), Villa Inés atiende Medellín (8.000 kg) y Neiva (4.000 kg), y El Vergel cubre Ibagué (4.000 kg) y Neiva (6.000 kg). Finalmente, el trapiche El Saman es el único trapiche que no utiliza su capacidad máxima y debe operar al 75% de su capacidad y abastecer a Ibagué con 6.000 kg.

Bogotá presenta el mayor costo marginal en Diciembre (\$4.104 por unidad adicional), lo cual indica mayor tensión logística en este mercado. En contraste, Cali presenta el menor costo marginal relativo (\$3.864), sugiriendo mayor flexibilidad de expansión.

Para alcanzar el menor costo marginal, implica que el trapiche El Saman opere al 25% de su capacidad productiva, y que los otros trapiches analizados mantengan su nivel máximo de

producción. Adicionalmente, se requiere la movilización de camiones entre distintos trapiches, permitiendo consolidar cargas y cumplir con la distribución óptima hacia los mercados.

Los escenarios optimista, pesimista y shock mantienen una estructura óptima estable frente a variaciones en los costos de flete, niveles de demanda y capacidad productiva. Sin embargo, los precios sombra revelan una creciente sensibilidad económica ante escenarios adversos, identificando como nodos estratégicos permanentes a los trapiches La Avispa y Villa Inés, y como mercados de mayor presión marginal a Bogotá y Medellín. Esto demuestra que la red logística es estructuralmente robusta pero económicamente sensible.

Al analizar exclusivamente los costos de transporte (sin incorporar los costos de producción) la asignación óptima permaneció invariable en los escenarios base, optimista y de shock, dado que las modificaciones realizadas afectaron únicamente los coeficientes de costo, pero en el escenario pesimista la configuración óptima se modifica, como consecuencia de los ajustes simultáneos en los niveles de oferta y demanda. Por lo que el modelo adaptado a las condiciones de Sandoná es más sensible a los cambios de oferta y demanda que a los costos de transporte.

La aplicación del modelo simplex es viable para productores y comerciantes del municipio de Sandoná ya que permite optimizar recursos y reducir costos en la ubicación de la panela

Recomendaciones

Se recomienda explorar otros modelos de optimización que permitan incorporar un mayor número de variables y restricciones, con el fin de aproximarse de manera más integral a la complejidad real de la cadena logística del sector panelero.

Incluir en el algoritmo optimizado otras variables no consideradas en esta investigación, tales como el transporte interno de la caña, la eficiencia de los jornaleros, la eficiencia del molino en la extracción del jugo, las distintas presentaciones de la panela y la variación mensual del precio de la panela, esto contribuiría a una optimización más precisa.

Se recomienda aplicar el modelo mejorado en años sucesivos para optimizar recursos, obtener una mayor utilidad y garantizar la sustentabilidad de la panela en la operación del transporte, buscando contribuir al desarrollo del municipio de Sandoná y la región en general.

Para el aumento de capacidades, se recomienda calcular el periodo de recuperación de inversiones usando ahorro anual estimado

Referencias Bibliográficas

- Afroz, S., & Hasan, M. B. (2015). A Computer Oriented Method for Solving Transportation Problem. *Dhaka University Journal of Science*, 63(1), 1-7.
<https://doi.org/10.3329/dujs.v63i1.21758>
- Agarana, M. C., Anake, T. A., & Okagbue, H. I. (2016). Optimization of Urban Rail Transportation in Emerging Countries Using Operational Research Techniques. *Applied Mathematics*, 07(10), 1116-1123. <https://doi.org/10.4236/am.2016.710099>
- Ahmad, A. (2013). *Optimization of transportation problem with computer aided linear programming*. <https://comp.utm.my/wp-content/uploads/2013/04/Optimization-of-Transportation-Problem-with-Computer-Aided-Linear-Programming.pdf>
- Ahmed, G. A. (2024). The Simplex Method Approach to Linear Programming Solutions. En *Research Updates in Mathematics and Computer Science Vol. 6* (pp. 11-32). B P International. <https://doi.org/10.9734/bpi/rumcs/v6/28>
- Anufriev, D. P., Shikulskaya, O. M., Esmagambetov, T. U., & Shikulskiy, M. I. (2016). The optimization model of transport routes taking into account the state of roads and road traffic congestions. *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1717-1721. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2016.7798171>
- Armenta, O., Maldonado-Macías, A., Avelar Sosa, L., Cortés Robles, G., & Limón, J. (2016). Use of Transportation Methodology to Maximize Profits of a Private Transporter. *Research in Computing Science*, 109(1), 81-87. <https://doi.org/10.13053/rcs-109-1-8>
- Arms, R. (1968). *An algorithm for a special class of generalized transportation-type problems*. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0680167.pdf>

Arsham, H. (2015). *Modelos Deterministas: Optimización Lineal*.

<http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/opre640S/SpanishD.htm#rop>

Arsham, H., & Kahn, A. B. (1989). A Simplex-Type Algorithm for General Transportation Problems: An Alternative to Stepping-Stone. *The Journal of the Operational Research Society*, 40(6), 581. <https://doi.org/10.2307/2583546>

B. S. Surya, P., & Ravindranath, V. (2022). A simple method to find optimum efficient basic solutions to bi-objective transportation problems. *i-manager's Journal on Mathematics*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.26634/jmat.11.1.18668>

Ballou, R. (2004). *Logística Administración de la cadena de suministro* (5.^a ed.). Pearson Educación.

Bravo, M., & Castro, X. (2023). Evaluación de métodos de multiplicación de Yausabara (*Pavonia Sepium* A. St-hil) utilizada en la elaboración de panela en Sandoná, Nariño. En U. N. A. y a D. Sello editorial (Ed.), *v congreso internacional de ciencias agrarias y ambientales biodiversidad y ruralidad para la innovación social* (pp. 142-146). <https://publicaciones.unad.edu.co/index.php/memorias/article/view/8477/7192>

Chopra, S. (2019). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (7.^a ed.). Pearson.

Christopher, Martin. (2023). *Logistics & supply chain management*. Pearson.

Crisostomo, C. I. C., & Baldovino, R. G. (2019). Parking Space Optimization Using Simplex Method Linear Programming. *2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering (MoRSE)*, 30-33.

<https://doi.org/10.1109/MoRSE48060.2019.8998669>

- Fadhila, R., Rarasati, N., Rozi, S., & Putra, F. M. (2024). The simplex - preemptive goal programming with branch and bound method for optimizing waste vehicle routes and transportation. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, 18(3), 1471-1482.
<https://doi.org/10.30598/barekengvol18iss3pp1471-1482>
- Fedepanela. (2024). *Tablero interactivo de áreas, producción y rendimiento para 2024*. Estadísticas SIPA. <https://www.sipa.org.co/wp/>
- Ferrer, L., Coves, A. M., & Santos, M. A. de los. (2004). Modelado del Transporte de Distribución Mediante Programación Lineal Entera. *Información tecnológica*, 15(4).
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642004000400009>
- Gaur, G., Kumar, N., & Naseem, K. (2020). A Study on the Numerical Methods of Solving Transportation Problem. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 6(1), 128-134.
https://ijariie.com/AdminUploadPdf/A_Study_on_the_Numerical_Methods_of_Solving_Transportation_Problem_ijariie11236.pdf
- Hassan, T. M. H., & Masrom, M. (2022). Determining optimal transportation allocation using linear programming methods. *Malaysian Journal of Computing*, 7(2), 1082-1099.
<https://doi.org/10.24191/mjoc.v7i2.17600>
- Houthakker, H. (1955). *On the Numerical Solution of the Transportation Problem*. *Journal of the Operations Research Society of America*, 3(2), 210–214.
<http://www.jstor.org/stable/166671>
- Kumar, S., & Kumar, R. (2024). A short literature on linear programming problem under uncertainty. En *Data-Driven Modelling with Fuzzy Sets* (1.^a ed., pp. 8-12).

- Kumar, T. (2014). Comparison of Optimization Techniques in Large Scale Transportation Problems. *Journal of Undergraduate Research at Minnesota State University, Mankato*, 4(1). <https://doi.org/10.56816/2378-6949.1162>
- Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in Supply Chain Management. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 65-83. [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(99\)00113-3](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(99)00113-3)
- Lee, S.-U. (2015). Simple Algorithm for Large-scale Unbalanced Transportation Problem. *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, 15(4), 223-230. <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.4.223>
- Liu, S. (2022). Optimization of Logistics Vehicle Path Planning Model Based on Improved Ant Colony Algorithm and «Hitchhiking» Distribution Mode. *Proceedings of the 5th International Conference on Information Technologies and Electrical Engineering*, 510-516. <https://doi.org/10.1145/3582935.3583020>
- Loor, L., Vega, V., & Sánchez, P. (2012). *Diseño de rutas de transporte de personal aplicando modelización matemática para resolver el problema de enrutamiento vehicular capacitado con ventanas de tiempo* [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/21023/1/articulo%20tesis%20original.pdf>
- Mahajan, M., & Nagi, R. (2024). GPU-accelerated transportation simplex algorithm. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 184, 104790. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2023.104790>
- Marchi, E. (2008). *A dual simplex algorithm for the two-step transportation problem*. <https://hdl.handle.net/11299/179792>

- Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1-25.
<https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>
- Ministerio de Transporte SICE TAC. (2025). *Sistema de información para calcular los costos de la operación de transporte*.
<https://plc.mintransporte.gov.co/Runtime/empresa/ctl/SiceTAC/mid/417>
- Nguyen, M. C., & Tran, K. T. (2020). Applying Simplex Algorithm for Ship's Motion Simulation Optimization by Using Maneuvering Tests Data. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(2), 491-500.
<https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.2.11252>
- Oberman, A., & Ruan, Y. (2015). An efficient linear programming method for Optimal Transportation. En *Cornell University*. <https://arxiv.org/abs/1509.03668>
- Prifti, V., Dervishi, I., Dhoska, K., Markja, I., & Pramono, A. (2020). Minimization of transport costs in an industrial company through linear programming. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 909(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/909/1/012040>
- Prokudin, G., Chupaylenko, A., Khobotnia, T., Remekh, I., Lyamzin, A., & Kovalenko, M. (2022). Optimizing unbalanced freight deliveries in transportation networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3 (116)), 22-32.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253791>
- Serrano, M., & Montero, L. (2019). El uso de modelos de redes y modelos de transporte para la optimización y reducción de tiempos y costos de transporte en la Comercializadora Gonac S. A de C. V. / The use of network models and transport models for the optimization and

reduction of transport times and costs in the Comercializadora Gonac S. A de C. V. *RICEA Revista Iberoamericana de Contaduría, Economía y Administración*, 8(15), 29-53.

<https://doi.org/10.23913/ricea.v8i15.123>

Sharma, G., & Gupta, V. (2012). Solving transportation problem with the various method of linear programming problem. *Innovative journal*, 81-83.

<https://www.academia.edu/download/52790003/68-248-1-PB.pdf>

Taha, H. A. . (2017). *Operations research an introduction*. Pearson.

Tang, P. (2023). Minimization of transportation costs using linear programming. *Theoretical and Natural Science*, 25(1), 226-231. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/25/20240975>

Tupitsa, N., Dvurechensky, P., Dvinskikh, D., & Gasnikov, A. (2022). *Numerical Methods for Large-Scale Optimal Transport*.

Zapata Cortes, J. A., Vélez Bedoya, Á. R., & Arango Serna, M. D. (2020). Mejora del proceso de distribución en una empresa de transporte. *Investigación Administrativa*, 49-2.

<https://doi.org/10.35426/IAv49n126.08>

Zhu, M. J., & Zhang, J. W. (2013). Path Optimization Design of Multimode Combined Transport Based on the Linear Programming Method. *Advanced Materials Research*, 779-780, 1056-1059. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.1056>

Apéndices

Apéndice A

Modelos en el Programa LINGO 21.0 Para Costo de Transporte Incluido el Costo de

Producción por Kilogramo en los Cinco Cortes Temporales del Año 2025

! 15 de enero 2025

! FUNCION OBJETIVO

Min

3864X11+3944X12+3934X13+3984X14+3984X15+3804X21+3884X22+3874X23+3924X24
+3924X25+3744X31+3824X32+3814X33+3864X34+3864X35+3744X41+3824X42+3814X4
3+3864X44+3864X45+3804X51+3884X52+3874X53+3924X54+3924X55

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

x11+x12+x13+x14+x15 < 8000 ! Empresa panelera El Saman
x21+x22+x23+x24+x25 < 10000 ! Empresa panelera Las Delicias
x31+x32+x33+x34+x35 < 12000 ! Empresa panelera La Avispa
x41+x42+x43+x44+x45 < 12000 ! Empresa panelera Villa Inés
x51+x52+x53+x54+x55 < 10000 ! Empresa panelera El Vergel

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

x11+x21+x31+x41+x51 = 10000 ! Cliente en Cali
x12+x22+x32+x42+x52 = 10000 ! Cliente en Ibagué
x13+x23+x33+x43+x53 = 10000 ! Cliente en Neiva
x14+x24+x34+x44+x54 = 10000 ! Cliente en Medellín
x15+x25+x35+x45+x55 = 10000 ! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.1930200E+09
Infeasibilities: 0.000000
Total solver iterations: 15
Elapsed runtime seconds: 0.13

Model Class: LP

Total variables: 25
Nonlinear variables: 0
Integer variables: 0

Total constraints: 11

Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 75

Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 6000.000 | 0.000000 |
| X12 | 0.000000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 4000.000 | 0.000000 |
| X22 | 6000.000 | 0.000000 |
| X23 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 0.000000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |
| X33 | 2000.000 | 0.000000 |
| X34 | 10000.00 | 0.000000 |
| X35 | 0.000000 | 0.000000 |
| X41 | 0.000000 | 0.000000 |
| X42 | 4000.000 | 0.000000 |
| X43 | 8000.000 | 0.000000 |
| X44 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 0.000000 | 0.000000 |
| X51 | 0.000000 | 0.000000 |
| X52 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 10000.00 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.1930200E+09 | -1.000000 |
| 2 | 2000.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 60.00000 |
| 4 | 0.000000 | 120.0000 |
| 5 | 0.000000 | 120.0000 |
| 6 | 0.000000 | 60.00000 |
| 7 | 0.000000 | -3864.000 |
| 8 | 0.000000 | -3944.000 |
| 9 | 0.000000 | -3934.000 |
| 10 | 0.000000 | -3984.000 |
| 11 | 0.000000 | -3984.000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current | Allowable | Allowable |
|----------|-------------|-----------|-----------|
| | Coefficient | Increase | Decrease |
| X11 | 3864.000 | 0.000000 | 60.00000 |
| X12 | 3944.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X13 | 3934.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 3984.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X15 | 3984.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 3804.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X22 | 3884.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 3874.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X24 | 3924.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 3924.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 3744.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X32 | 3824.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 3814.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X34 | 3864.000 | 0.000000 | INFINITY |
| X35 | 3864.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X41 | 3744.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X42 | 3824.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 3814.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 3864.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X45 | 3864.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X51 | 3804.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X52 | 3884.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 3874.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X54 | 3924.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 3924.000 | 0.000000 | INFINITY |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current | Allowable | Allowable |
|-----|----------|-----------|-----------|
| | RHS | Increase | Decrease |
| 2 | 8000.000 | INFINITY | 2000.000 |
| 3 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 4 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 5 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 6 | 10000.00 | 6000.000 | 0.000000 |
| 7 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 8 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 9 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 10 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 11 | 10000.00 | 0.000000 | 6000.000 |

! 15 de abril 2025

! FUNCION OBJETIVO

Min

3869X11+3949X12+3939X13+3984X14+3984X15+3804X21+3889X22+3879X23+3924X24+
3924X25+3749X31+3829X32+3819X33+3864X34+3864X35+3749X41+3829X42+3819X43+
3864X44+3864X45+3809X51+3889X52+3879X53+3924X54+3924X55

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

x11+x12+x13+x14+x15 < 8000 ! Empresa panelera El Saman
x21+x22+x23+x24+x25 < 10000 ! Empresa panelera Las Delicias
x31+x32+x33+x34+x35 < 12000 ! Empresa panelera La Avispa
x41+x42+x43+x44+x45 < 12000 ! Empresa panelera Villa Inés
x51+x52+x53+x54+x55 < 10000 ! Empresa panelera El Vergel

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

x11+x21+x31+x41+x51 = 10000 ! Cliente en Cali
x12+x22+x32+x42+x52 = 10000 ! Cliente en Ibagué
x13+x23+x33+x43+x53 = 10000 ! Cliente en Neiva
x14+x24+x34+x44+x54 = 10000 ! Cliente en Medellín
x15+x25+x35+x45+x55 = 10000 ! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.1931200E+09
Infeasibilities: 0.000000
Total solver iterations: 15
Elapsed runtime seconds: 0.14

Model Class: LP

Total variables: 25
Nonlinear variables: 0
Integer variables: 0

Total constraints: 11
Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 75
Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 0.000000 | 5.000000 |
| X12 | 6000.000 | 0.000000 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 10000.00 | 0.000000 |
| X22 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 5.000000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |
| X33 | 2000.000 | 0.000000 |
| X34 | 10000.00 | 0.000000 |
| X35 | 0.000000 | 0.000000 |
| X41 | 0.000000 | 5.000000 |
| X42 | 4000.000 | 0.000000 |
| X43 | 8000.000 | 0.000000 |
| X44 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 0.000000 | 0.000000 |
| X51 | 0.000000 | 5.000000 |
| X52 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 10000.00 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.1931200E+09 | -1.000000 |
| 2 | 2000.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 60.00000 |
| 4 | 0.000000 | 120.0000 |
| 5 | 0.000000 | 120.0000 |
| 6 | 0.000000 | 60.00000 |
| 7 | 0.000000 | -3864.000 |
| 8 | 0.000000 | -3949.000 |
| 9 | 0.000000 | -3939.000 |
| 10 | 0.000000 | -3984.000 |
| 11 | 0.000000 | -3984.000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current Coefficient | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|----------|---------------------|--------------------|--------------------|
| X11 | 3869.000 | INFINITY | 5.000000 |
| X12 | 3949.000 | 0.000000 | 60.00000 |
| X13 | 3939.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 3984.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X15 | 3984.000 | INFINITY | 0.000000 |

| | | | |
|-----|----------|----------|----------|
| X21 | 3804.000 | 5.000000 | INFINITY |
| X22 | 3889.000 | 0.000000 | 5.000000 |
| X23 | 3879.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X24 | 3924.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 3924.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 3749.000 | INFINITY | 5.000000 |
| X32 | 3829.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 3819.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X34 | 3864.000 | 0.000000 | INFINITY |
| X35 | 3864.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X41 | 3749.000 | INFINITY | 5.000000 |
| X42 | 3829.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 3819.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 3864.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X45 | 3864.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X51 | 3809.000 | INFINITY | 5.000000 |
| X52 | 3889.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 3879.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X54 | 3924.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 3924.000 | 0.000000 | INFINITY |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current RHS | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 2 | 8000.000 | INFINITY | 2000.000 |
| 3 | 10000.00 | 6000.000 | 0.000000 |
| 4 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 5 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 6 | 10000.00 | 6000.000 | 0.000000 |
| 7 | 10000.00 | 0.000000 | 6000.000 |
| 8 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 9 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 10 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 11 | 10000.00 | 0.000000 | 6000.000 |

! 15 de julio 2025

! FUNCION OBJETIVO

Min

3874X11+3954X12+3942X13+3984X14+3984X15+3804X21+3894X22+3882X23+3924X24+
3924X25+3754X31+3834X32+3822X33+3864X34+3864X35+3754X41+3834X42+3822X43+
3864X44+3864X45+3814X51+3894X52+3882X53+3924X54+3924X55

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

$x_{11}+x_{12}+x_{13}+x_{14}+x_{15} < 8000$! Empresa panelera El Saman
 $x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}+x_{25} < 10000$! Empresa panelera Las Delicias
 $x_{31}+x_{32}+x_{33}+x_{34}+x_{35} < 12000$! Empresa panelera La Avispa
 $x_{41}+x_{42}+x_{43}+x_{44}+x_{45} < 12000$! Empresa panelera Villa Inés
 $x_{51}+x_{52}+x_{53}+x_{54}+x_{55} < 10000$! Empresa panelera El Vergel

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

$x_{11}+x_{21}+x_{31}+x_{41}+x_{51} = 10000$! Cliente en Cali
 $x_{12}+x_{22}+x_{32}+x_{42}+x_{52} = 10000$! Cliente en Ibagué
 $x_{13}+x_{23}+x_{33}+x_{43}+x_{53} = 10000$! Cliente en Neiva
 $x_{14}+x_{24}+x_{34}+x_{44}+x_{54} = 10000$! Cliente en Medellín
 $x_{15}+x_{25}+x_{35}+x_{45}+x_{55} = 10000$! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.1932000E+09
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 14
 Elapsed runtime seconds: 0.10

Model Class: LP

Total variables: 25
 Nonlinear variables: 0
 Integer variables: 0

Total constraints: 11
 Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 75
 Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 0.000000 | 10.00000 |
| X12 | 6000.000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 10000.00 | 0.000000 |
| X22 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 10.00000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| X33 | 2000.000 | 0.000000 |
| X34 | 10000.00 | 0.000000 |
| X35 | 0.000000 | 0.000000 |
| X41 | 0.000000 | 10.00000 |
| X42 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 2000.000 | 0.000000 |
| X44 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 10000.00 | 0.000000 |
| X51 | 0.000000 | 10.00000 |
| X52 | 4000.000 | 0.000000 |
| X53 | 6000.000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 0.000000 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.1932000E+09 | -1.000000 |
| 2 | 2000.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 60.00000 |
| 4 | 0.000000 | 120.0000 |
| 5 | 0.000000 | 120.0000 |
| 6 | 0.000000 | 60.00000 |
| 7 | 0.000000 | -3864.000 |
| 8 | 0.000000 | -3954.000 |
| 9 | 0.000000 | -3942.000 |
| 10 | 0.000000 | -3984.000 |
| 11 | 0.000000 | -3984.000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current | Allowable | Allowable |
|----------|-------------|-----------|-----------|
| | Coefficient | Increase | Decrease |
| X11 | 3874.000 | INFINITY | 10.00000 |
| X12 | 3954.000 | 0.000000 | 60.00000 |
| X13 | 3942.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 3984.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X15 | 3984.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 3804.000 | 10.00000 | INFINITY |
| X22 | 3894.000 | 0.000000 | 10.00000 |
| X23 | 3882.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X24 | 3924.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 3924.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 3754.000 | INFINITY | 10.00000 |
| X32 | 3834.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 3822.000 | 0.000000 | 0.000000 |

| | | | |
|-----|----------|----------|----------|
| X34 | 3864.000 | 0.000000 | INFINITY |
| X35 | 3864.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X41 | 3754.000 | INFINITY | 10.00000 |
| X42 | 3834.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X43 | 3822.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 3864.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X45 | 3864.000 | 0.000000 | INFINITY |
| X51 | 3814.000 | INFINITY | 10.00000 |
| X52 | 3894.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 3882.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 3924.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 3924.000 | INFINITY | 0.000000 |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current RHS | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 2 | 8000.000 | INFINITY | 2000.000 |
| 3 | 10000.00 | 6000.000 | 0.000000 |
| 4 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 5 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 6 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 7 | 10000.00 | 0.000000 | 6000.000 |
| 8 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 9 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 10 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 11 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |

! 15 octubre 2025

! FUNCION OBJETIVO

Min

3929X11+4009X12+3994X13+4044X14+4054X15+3804X21+3899X22+3884X23+3934X24+
3944X25+3809X31+3889X32+3874X33+3924X34+3934X35+3809X41+3889X42+3874X43+
3924X44+3934X45+3819X51+3899X52+3884X53+3934X54+3944X55

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

x11+x12+x13+x14+x15 < 8000 ! Empresa panelera El Saman
x21+x22+x23+x24+x25 < 10000 ! Empresa panelera Las Delicias
x31+x32+x33+x34+x35 < 12000 ! Empresa panelera La Avispa
x41+x42+x43+x44+x45 < 12000 ! Empresa panelera Villa Inés
x51+x52+x53+x54+x55 < 10000 ! Empresa panelera El Vergel

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

$x_{11}+x_{21}+x_{31}+x_{41}+x_{51} = 10000$! Cliente en Cali
 $x_{12}+x_{22}+x_{32}+x_{42}+x_{52} = 10000$! Cliente en Ibagué
 $x_{13}+x_{23}+x_{33}+x_{43}+x_{53} = 10000$! Cliente en Neiva
 $x_{14}+x_{24}+x_{34}+x_{44}+x_{54} = 10000$! Cliente en Medellín
 $x_{15}+x_{25}+x_{35}+x_{45}+x_{55} = 10000$! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.1950700E+09

Infeasibilities: 0.000000

Total solver iterations: 12

Elapsed runtime seconds: 0.12

Model Class: LP

Total variables: 25

Nonlinear variables: 0

Integer variables: 0

Total constraints: 11

Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 75

Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 0.000000 | 15.00000 |
| X12 | 6000.000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 10000.00 | 0.000000 |
| X22 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 15.00000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |
| X33 | 0.000000 | 0.000000 |
| X34 | 2000.000 | 0.000000 |
| X35 | 10000.00 | 0.000000 |
| X41 | 0.000000 | 15.00000 |
| X42 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 4000.000 | 0.000000 |
| X44 | 8000.000 | 0.000000 |
| X45 | 0.000000 | 0.000000 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| X51 | 0.000000 | 15.00000 |
| X52 | 4000.000 | 0.000000 |
| X53 | 6000.000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 0.000000 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.1950700E+09 | -1.000000 |
| 2 | 2000.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 110.0000 |
| 4 | 0.000000 | 120.0000 |
| 5 | 0.000000 | 120.0000 |
| 6 | 0.000000 | 110.0000 |
| 7 | 0.000000 | -3914.000 |
| 8 | 0.000000 | -4009.000 |
| 9 | 0.000000 | -3994.000 |
| 10 | 0.000000 | -4044.000 |
| 11 | 0.000000 | -4054.000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current | Allowable | Allowable |
|----------|-------------|-----------|-----------|
| | Coefficient | Increase | Decrease |
| X11 | 3929.000 | INFINITY | 15.00000 |
| X12 | 4009.000 | 0.000000 | 110.0000 |
| X13 | 3994.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 4044.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X15 | 4054.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 3804.000 | 15.00000 | INFINITY |
| X22 | 3899.000 | 0.000000 | 15.00000 |
| X23 | 3884.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X24 | 3934.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 3944.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 3809.000 | INFINITY | 15.00000 |
| X32 | 3889.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 3874.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X34 | 3924.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X35 | 3934.000 | 0.000000 | INFINITY |
| X41 | 3809.000 | INFINITY | 15.00000 |
| X42 | 3889.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X43 | 3874.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 3924.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 3934.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X51 | 3819.000 | INFINITY | 15.00000 |

| | | | |
|-----|----------|----------|----------|
| X52 | 3899.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 3884.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 3934.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 3944.000 | INFINITY | 0.000000 |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current RHS | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 2 | 8000.000 | INFINITY | 2000.000 |
| 3 | 10000.00 | 6000.000 | 0.000000 |
| 4 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 5 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 6 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 7 | 10000.00 | 0.000000 | 6000.000 |
| 8 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 9 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 10 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 11 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |

! 15 diciembre 2025

! FUNCION OBJETIVO

Min

3984X11+4064X12+4044X13+4094X14+4104X15+3804X21+4004X22+3984X23+4034X24+
4044X25+3814X31+3894X32+3874X33+3924X34+3934X35+3814X41+3894X42+3874X43+
3924X44+3934X45+3924X51+4004X52+3984X53+4034X54+4044X55

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

x11+x12+x13+x14+x15 < 8000 ! Empresa panelera El Saman
x21+x22+x23+x24+x25 < 10000 ! Empresa panelera Las Delicias
x31+x32+x33+x34+x35 < 12000 ! Empresa panelera La Avispa
x41+x42+x43+x44+x45 < 12000 ! Empresa panelera Villa Inés
x51+x52+x53+x54+x55 < 10000 ! Empresa panelera El Vergel

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

x11+x21+x31+x41+x51 = 10000 ! Cliente en Cali
x12+x22+x32+x42+x52 = 10000 ! Cliente en Ibagué
x13+x23+x33+x43+x53 = 10000 ! Cliente en Neiva
x14+x24+x34+x44+x54 = 10000 ! Cliente en Medellín
x15+x25+x35+x45+x55 = 10000 ! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.1964200E+09
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 12
 Elapsed runtime seconds: 0.13

Model Class: LP

Total variables: 25
 Nonlinear variables: 0
 Integer variables: 0

Total constraints: 11
 Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 75
 Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 0.000000 | 120.0000 |
| X12 | 6000.000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 10000.00 | 0.000000 |
| X22 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 120.0000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |
| X33 | 0.000000 | 0.000000 |
| X34 | 2000.000 | 0.000000 |
| X35 | 10000.00 | 0.000000 |
| X41 | 0.000000 | 120.0000 |
| X42 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 4000.000 | 0.000000 |
| X44 | 8000.000 | 0.000000 |
| X45 | 0.000000 | 0.000000 |
| X51 | 0.000000 | 120.0000 |
| X52 | 4000.000 | 0.000000 |
| X53 | 6000.000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 0.000000 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.1964200E+09 | -1.000000 |

| | | |
|----|----------|-----------|
| 2 | 2000.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 60.00000 |
| 4 | 0.000000 | 170.0000 |
| 5 | 0.000000 | 170.0000 |
| 6 | 0.000000 | 60.00000 |
| 7 | 0.000000 | -3864.000 |
| 8 | 0.000000 | -4064.000 |
| 9 | 0.000000 | -4044.000 |
| 10 | 0.000000 | -4094.000 |
| 11 | 0.000000 | -4104.000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current Coefficient | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| X11 | 3984.000 | INFINITY | 120.0000 |
| X12 | 4064.000 | 0.000000 | 60.00000 |
| X13 | 4044.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 4094.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X15 | 4104.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 3804.000 | 120.0000 | INFINITY |
| X22 | 4004.000 | 0.000000 | 120.0000 |
| X23 | 3984.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X24 | 4034.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 4044.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 3814.000 | INFINITY | 120.0000 |
| X32 | 3894.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 3874.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X34 | 3924.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X35 | 3934.000 | 0.000000 | INFINITY |
| X41 | 3814.000 | INFINITY | 120.0000 |
| X42 | 3894.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X43 | 3874.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 3924.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 3934.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X51 | 3924.000 | INFINITY | 120.0000 |
| X52 | 4004.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 3984.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 4034.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 4044.000 | INFINITY | 0.000000 |

Righthand Side Ranges:

| Current | Allowable | Allowable |
|---------|-----------|-----------|
|---------|-----------|-----------|

| Row | RHS | Increase | Decrease |
|-----|----------|----------|----------|
| 2 | 8000.000 | INFINITY | 2000.000 |
| 3 | 10000.00 | 6000.000 | 0.000000 |
| 4 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 5 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 6 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 7 | 10000.00 | 0.000000 | 6000.000 |
| 8 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 9 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 10 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 11 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |

Apéndice B

Modelos en el Programa LINGO 21.0 Para Costo de Transporte Incluido el Costo de

Producción por Kilogramo para Tres Escenarios Futuros

! Optimista

! FUNCION OBJETIVO

Min

3586X11+3658X12+3640X13+3685X14+3694X15+3424X21+3604X22+3586X23+3631X24+
3640X25+3433X31+3505X32+3487X33+3532X34+3541X35+3433X41+3505X42+3487X43+
3532X44+3541X45+3532X51+3604X52+3586X53+3631X54+3640X55

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

x11+x12+x13+x14+x15 < 8000 ! Empresa panelera El Saman
x21+x22+x23+x24+x25 < 10000 ! Empresa panelera Las Delicias
x31+x32+x33+x34+x35 < 12000 ! Empresa panelera La Avispa
x41+x42+x43+x44+x45 < 12000 ! Empresa panelera Villa Inés
x51+x52+x53+x54+x55 < 10000 ! Empresa panelera El Vergel

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

x11+x21+x31+x41+x51 = 10000 ! Cliente en Cali
x12+x22+x32+x42+x52 = 10000 ! Cliente en Ibagué
x13+x23+x33+x43+x53 = 10000 ! Cliente en Neiva
x14+x24+x34+x44+x54 = 10000 ! Cliente en Medellín
x15+x25+x35+x45+x55 = 10000 ! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.1767980E+09

Infeasibilities: 0.000000

Total solver iterations: 12

Elapsed runtime seconds: 0.15

Model Class: LP

Total variables: 25

Nonlinear variables: 0

Integer variables: 0

Total constraints: 11

Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 75
 Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 0.000000 | 108.0000 |
| X12 | 6000.000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 10000.00 | 0.000000 |
| X22 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 108.0000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |
| X33 | 0.000000 | 0.000000 |
| X34 | 2000.000 | 0.000000 |
| X35 | 10000.00 | 0.000000 |
| X41 | 0.000000 | 108.0000 |
| X42 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 4000.000 | 0.000000 |
| X44 | 8000.000 | 0.000000 |
| X45 | 0.000000 | 0.000000 |
| X51 | 0.000000 | 108.0000 |
| X52 | 4000.000 | 0.000000 |
| X53 | 6000.000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 0.000000 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.1767980E+09 | -1.000000 |
| 2 | 2000.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 54.00000 |
| 4 | 0.000000 | 153.0000 |
| 5 | 0.000000 | 153.0000 |
| 6 | 0.000000 | 54.00000 |
| 7 | 0.000000 | -3478.000 |
| 8 | 0.000000 | -3658.000 |
| 9 | 0.000000 | -3640.000 |
| 10 | 0.000000 | -3685.000 |
| 11 | 0.000000 | -3694.000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current Coefficient | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| X11 | 3586.000 | INFINITY | 108.0000 |
| X12 | 3658.000 | 0.000000 | 54.00000 |
| X13 | 3640.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 3685.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X15 | 3694.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 3424.000 | 108.0000 | INFINITY |
| X22 | 3604.000 | 0.000000 | 108.0000 |
| X23 | 3586.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X24 | 3631.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 3640.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 3433.000 | INFINITY | 108.0000 |
| X32 | 3505.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 3487.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X34 | 3532.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X35 | 3541.000 | 0.000000 | INFINITY |
| X41 | 3433.000 | INFINITY | 108.0000 |
| X42 | 3505.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X43 | 3487.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 3532.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 3541.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X51 | 3532.000 | INFINITY | 108.0000 |
| X52 | 3604.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 3586.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 3631.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 3640.000 | INFINITY | 0.000000 |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current RHS | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 2 | 8000.000 | INFINITY | 2000.000 |
| 3 | 10000.00 | 6000.000 | 0.000000 |
| 4 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 5 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 6 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 7 | 10000.00 | 0.000000 | 6000.000 |
| 8 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 9 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 10 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 11 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |

! Pesimista

! FUNCION OBJETIVO

Min

$$4781X11+4877X12+4853X13+4913X14+4925X15+4565X21+4805X22+4781X23+4841X24+4853X25+4577X31+4673X32+4649X33+4709X34+4721X35+4577X41+4673X42+4649X43+4709X44+4721X45+4709X51+4805X52+4781X53+4841X54+4853X55$$

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

| | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| $x11+x12+x13+x14+x15 < 7200$ | ! Empresa panelera El Saman |
| $x21+x22+x23+x24+x25 < 9000$ | ! Empresa panelera Las Delicias |
| $x31+x32+x33+x34+x35 < 10800$ | ! Empresa panelera La Avispa |
| $x41+x42+x43+x44+x45 < 10800$ | ! Empresa panelera Villa Inés |
| $x51+x52+x53+x54+x55 < 9000$ | ! Empresa panelera El Vergel |

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

| | |
|------------------------------|-----------------------|
| $x11+x21+x31+x41+x51 = 9000$ | ! Cliente en Cali |
| $x12+x22+x32+x42+x52 = 9000$ | ! Cliente en Ibagué |
| $x13+x23+x33+x43+x53 = 9000$ | ! Cliente en Neiva |
| $x14+x24+x34+x44+x54 = 9000$ | ! Cliente en Medellín |
| $x15+x25+x35+x45+x55 = 9000$ | ! Cliente en Bogotá |

Global optimal solution found.

| | |
|--------------------------|---------------|
| Objective value: | 0.2121426E+09 |
| Infeasibilities: | 0.000000 |
| Total solver iterations: | 12 |
| Elapsed runtime seconds: | 0.11 |

Model Class: LP

| | |
|------------------------|----|
| Total variables: | 25 |
| Nonlinear variables: | 0 |
| Integer variables: | 0 |
| Total constraints: | 11 |
| Nonlinear constraints: | 0 |
| Total nonzeros: | 75 |
| Nonlinear nonzeros: | 0 |

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 0.000000 | 144.0000 |
| X12 | 5400.000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 9000.000 | 0.000000 |
| X22 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 144.0000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |
| X33 | 0.000000 | 0.000000 |
| X34 | 1800.000 | 0.000000 |
| X35 | 9000.000 | 0.000000 |
| X41 | 0.000000 | 144.0000 |
| X42 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 3600.000 | 0.000000 |
| X44 | 7200.000 | 0.000000 |
| X45 | 0.000000 | 0.000000 |
| X51 | 0.000000 | 144.0000 |
| X52 | 3600.000 | 0.000000 |
| X53 | 5400.000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 0.000000 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.2121426E+09 | -1.000000 |
| 2 | 1800.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 72.00000 |
| 4 | 0.000000 | 204.0000 |
| 5 | 0.000000 | 204.0000 |
| 6 | 0.000000 | 72.00000 |
| 7 | 0.000000 | -4637.000 |
| 8 | 0.000000 | -4877.000 |
| 9 | 0.000000 | -4853.000 |
| 10 | 0.000000 | -4913.000 |
| 11 | 0.000000 | -4925.000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current Coefficient | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|----------|---------------------|--------------------|--------------------|
| X11 | 4781.000 | INFINITY | 144.0000 |
| X12 | 4877.000 | 0.000000 | 72.00000 |
| X13 | 4853.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 4913.000 | INFINITY | 0.000000 |

| | | | |
|-----|----------|----------|----------|
| X15 | 4925.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 4565.000 | 144.0000 | INFINITY |
| X22 | 4805.000 | 0.000000 | 144.0000 |
| X23 | 4781.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X24 | 4841.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 4853.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 4577.000 | INFINITY | 144.0000 |
| X32 | 4673.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 4649.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X34 | 4709.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X35 | 4721.000 | 0.000000 | INFINITY |
| X41 | 4577.000 | INFINITY | 144.0000 |
| X42 | 4673.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X43 | 4649.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 4709.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 4721.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X51 | 4709.000 | INFINITY | 144.0000 |
| X52 | 4805.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 4781.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 4841.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 4853.000 | INFINITY | 0.000000 |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current RHS | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 2 | 7200.000 | INFINITY | 1800.000 |
| 3 | 9000.000 | 5400.000 | 0.000000 |
| 4 | 10800.00 | 5400.000 | 1800.000 |
| 5 | 10800.00 | 5400.000 | 1800.000 |
| 6 | 9000.000 | 5400.000 | 1800.000 |
| 7 | 9000.000 | 0.000000 | 5400.000 |
| 8 | 9000.000 | 1800.000 | 5400.000 |
| 9 | 9000.000 | 1800.000 | 5400.000 |
| 10 | 9000.000 | 1800.000 | 5400.000 |
| 11 | 9000.000 | 1800.000 | 5400.000 |

! Shock

! FUNCION OBJETIVO

Min

5976X11+6096X12+6066X13+6141X14+6156X15+5706X21+6006X22+5976X23+6051X24+
6066X25+5721X31+5841X32+5811X33+5886X34+5901X35+5721X41+5841X42+5811X43+
5886X44+5901X45+5886X51+6006X52+5976X53+6051X54+6066X55

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

$x_{11}+x_{12}+x_{13}+x_{14}+x_{15} < 8000$! Empresa panelera El Saman
 $x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}+x_{25} < 10000$! Empresa panelera Las Delicias
 $x_{31}+x_{32}+x_{33}+x_{34}+x_{35} < 12000$! Empresa panelera La Avispa
 $x_{41}+x_{42}+x_{43}+x_{44}+x_{45} < 12000$! Empresa panelera Villa Inés
 $x_{51}+x_{52}+x_{53}+x_{54}+x_{55} < 10000$! Empresa panelera El Vergel

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

$x_{11}+x_{21}+x_{31}+x_{41}+x_{51} = 10000$! Cliente en Cali
 $x_{12}+x_{22}+x_{32}+x_{42}+x_{52} = 10000$! Cliente en Ibagué
 $x_{13}+x_{23}+x_{33}+x_{43}+x_{53} = 10000$! Cliente en Neiva
 $x_{14}+x_{24}+x_{34}+x_{44}+x_{54} = 10000$! Cliente en Medellín
 $x_{15}+x_{25}+x_{35}+x_{45}+x_{55} = 10000$! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.2946300E+09
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 12
 Elapsed runtime seconds: 0.18

Model Class: LP

Total variables: 25
 Nonlinear variables: 0
 Integer variables: 0

Total constraints: 11
 Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 75
 Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 0.000000 | 180.0000 |
| X12 | 6000.000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 10000.00 | 0.000000 |
| X22 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 180.0000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| X33 | 0.000000 | 0.000000 |
| X34 | 2000.000 | 0.000000 |
| X35 | 10000.00 | 0.000000 |
| X41 | 0.000000 | 180.0000 |
| X42 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 4000.000 | 0.000000 |
| X44 | 8000.000 | 0.000000 |
| X45 | 0.000000 | 0.000000 |
| X51 | 0.000000 | 180.0000 |
| X52 | 4000.000 | 0.000000 |
| X53 | 6000.000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 0.000000 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.2946300E+09 | -1.000000 |
| 2 | 2000.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 90.00000 |
| 4 | 0.000000 | 255.0000 |
| 5 | 0.000000 | 255.0000 |
| 6 | 0.000000 | 90.00000 |
| 7 | 0.000000 | -5796.000 |
| 8 | 0.000000 | -6096.000 |
| 9 | 0.000000 | -6066.000 |
| 10 | 0.000000 | -6141.000 |
| 11 | 0.000000 | -6156.000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current | Allowable | Allowable |
|----------|-------------|-----------|-----------|
| | Coefficient | Increase | Decrease |
| X11 | 5976.000 | INFINITY | 180.0000 |
| X12 | 6096.000 | 0.000000 | 90.00000 |
| X13 | 6066.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 6141.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X15 | 6156.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 5706.000 | 180.0000 | INFINITY |
| X22 | 6006.000 | 0.000000 | 180.0000 |
| X23 | 5976.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X24 | 6051.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 6066.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 5721.000 | INFINITY | 180.0000 |
| X32 | 5841.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 5811.000 | INFINITY | 0.000000 |

| | | | |
|-----|----------|----------|----------|
| X34 | 5886.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X35 | 5901.000 | 0.000000 | INFINITY |
| X41 | 5721.000 | INFINITY | 180.0000 |
| X42 | 5841.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X43 | 5811.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 5886.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 5901.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X51 | 5886.000 | INFINITY | 180.0000 |
| X52 | 6006.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 5976.000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 6051.000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 6066.000 | INFINITY | 0.000000 |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current RHS | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 2 | 8000.000 | INFINITY | 2000.000 |
| 3 | 10000.00 | 6000.000 | 0.000000 |
| 4 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 5 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 6 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 7 | 10000.00 | 0.000000 | 6000.000 |
| 8 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 9 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 10 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 11 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |

Apéndice C

Modelos en el Programa LINGO 21.0 para Análisis de Escenarios Únicamente Para Costo de

Transporte por Kilogramo

! BASE

! FUNCION OBJETIVO

Min

184X11+264X12+244X13+294X14+304X15+174X21+254X22+234X23+284X24+294X25+16
4X31+244X32+224X33+274X34+284X35+164X41+244X42+224X43+274X44+284X45+174
X51+254X52+234X53+284X54+294X55

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

x11+x12+x13+x14+x15 < 8000 ! Empresa panelera El Saman
x21+x22+x23+x24+x25 < 10000 ! Empresa panelera Las Delicias
x31+x32+x33+x34+x35 < 12000 ! Empresa panelera La Avispa
x41+x42+x43+x44+x45 < 12000 ! Empresa panelera Villa Inés
x51+x52+x53+x54+x55 < 10000 ! Empresa panelera El Vergel

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

x11+x21+x31+x41+x51 = 10000 ! Cliente en Cali
x12+x22+x32+x42+x52 = 10000 ! Cliente en Ibagué
x13+x23+x33+x43+x53 = 10000 ! Cliente en Neiva
x14+x24+x34+x44+x54 = 10000 ! Cliente en Medellín
x15+x25+x35+x45+x55 = 10000 ! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.1222000E+08
Infeasibilities: 0.000000
Total solver iterations: 13
Elapsed runtime seconds: 0.23

Model Class: LP

Total variables: 25
Nonlinear variables: 0
Integer variables: 0

Total constraints: 11

Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 75

Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 6000.000 | 0.000000 |
| X12 | 0.000000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 0.000000 | 0.000000 |
| X22 | 2000.000 | 0.000000 |
| X23 | 8000.000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 0.000000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |
| X33 | 2000.000 | 0.000000 |
| X34 | 10000.00 | 0.000000 |
| X35 | 0.000000 | 0.000000 |
| X41 | 2000.000 | 0.000000 |
| X42 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 10000.00 | 0.000000 |
| X51 | 2000.000 | 0.000000 |
| X52 | 8000.000 | 0.000000 |
| X53 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 0.000000 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.1222000E+08 | -1.000000 |
| 2 | 2000.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 10.00000 |
| 4 | 0.000000 | 20.00000 |
| 5 | 0.000000 | 20.00000 |
| 6 | 0.000000 | 10.00000 |
| 7 | 0.000000 | -184.0000 |
| 8 | 0.000000 | -264.0000 |
| 9 | 0.000000 | -244.0000 |
| 10 | 0.000000 | -294.0000 |
| 11 | 0.000000 | -304.0000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current | Allowable | Allowable |
|----------|-------------|-----------|-----------|
| | Coefficient | Increase | Decrease |
| X11 | 184.0000 | 0.000000 | 10.00000 |
| X12 | 264.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X13 | 244.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 294.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X15 | 304.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 174.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X22 | 254.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 234.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 284.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 294.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 164.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X32 | 244.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 224.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X34 | 274.0000 | 0.000000 | INFINITY |
| X35 | 284.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X41 | 164.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X42 | 244.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X43 | 224.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X44 | 274.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X45 | 284.0000 | 0.000000 | INFINITY |
| X51 | 174.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X52 | 254.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 234.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X54 | 284.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 294.0000 | INFINITY | 0.000000 |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current | Allowable | Allowable |
|-----|----------|-----------|-----------|
| | RHS | Increase | Decrease |
| 2 | 8000.000 | INFINITY | 2000.000 |
| 3 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 4 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 5 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 6 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 7 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 8 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 9 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 10 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 11 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |

! OPTIMISTA

! FUNCION OBJETIVO

Min

$$166X_{11}+238X_{12}+220X_{13}+265X_{14}+274X_{15}+157X_{21}+229X_{22}+211X_{23}+256X_{24}+265X_{25}+148X_{31}+220X_{32}+202X_{33}+247X_{34}+256X_{35}+148X_{41}+220X_{42}+202X_{43}+247X_{44}+256X_{45}+157X_{51}+229X_{52}+211X_{53}+256X_{54}+265X_{55}$$

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

$x_{11}+x_{12}+x_{13}+x_{14}+x_{15} < 8000$! Empresa panelera El Saman
 $x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}+x_{25} < 10000$! Empresa panelera Las Delicias
 $x_{31}+x_{32}+x_{33}+x_{34}+x_{35} < 12000$! Empresa panelera La Avispa
 $x_{41}+x_{42}+x_{43}+x_{44}+x_{45} < 12000$! Empresa panelera Villa Inés
 $x_{51}+x_{52}+x_{53}+x_{54}+x_{55} < 10000$! Empresa panelera El Vergel

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

$x_{11}+x_{21}+x_{31}+x_{41}+x_{51} = 10000$! Cliente en Cali
 $x_{12}+x_{22}+x_{32}+x_{42}+x_{52} = 10000$! Cliente en Ibagué

 $x_{13}+x_{23}+x_{33}+x_{43}+x_{53} = 10000$! Cliente en Neiva
 $x_{14}+x_{24}+x_{34}+x_{44}+x_{54} = 10000$! Cliente en Medellín
 $x_{15}+x_{25}+x_{35}+x_{45}+x_{55} = 10000$! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.1101800E+08
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 13
 Elapsed runtime seconds: 0.15

Model Class: LP

Total variables: 25
 Nonlinear variables: 0
 Integer variables: 0

 Total constraints: 11
 Nonlinear constraints: 0

 Total nonzeros: 75
 Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 6000.000 | 0.000000 |
| X12 | 0.000000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 0.000000 | 0.000000 |
| X22 | 2000.000 | 0.000000 |
| X23 | 8000.000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 0.000000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |
| X33 | 2000.000 | 0.000000 |
| X34 | 10000.00 | 0.000000 |
| X35 | 0.000000 | 0.000000 |
| X41 | 2000.000 | 0.000000 |
| X42 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 10000.00 | 0.000000 |
| X51 | 2000.000 | 0.000000 |
| X52 | 8000.000 | 0.000000 |
| X53 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 0.000000 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.1101800E+08 | -1.000000 |
| 2 | 2000.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 9.000000 |
| 4 | 0.000000 | 18.00000 |
| 5 | 0.000000 | 18.00000 |
| 6 | 0.000000 | 9.000000 |
| 7 | 0.000000 | -166.0000 |
| 8 | 0.000000 | -238.0000 |
| 9 | 0.000000 | -220.0000 |
| 10 | 0.000000 | -265.0000 |
| 11 | 0.000000 | -274.0000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current Coefficient | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|----------|---------------------|--------------------|--------------------|
| X11 | 166.0000 | 0.000000 | 9.000000 |
| X12 | 238.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X13 | 220.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 265.0000 | INFINITY | 0.000000 |

| | | | |
|-----|----------|----------|----------|
| X15 | 274.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 157.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X22 | 229.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 211.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 256.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 265.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 148.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X32 | 220.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 202.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X34 | 247.0000 | 0.000000 | INFINITY |
| X35 | 256.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X41 | 148.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X42 | 220.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X43 | 202.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X44 | 247.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X45 | 256.0000 | 0.000000 | INFINITY |
| X51 | 157.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X52 | 229.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 211.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X54 | 256.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 265.0000 | INFINITY | 0.000000 |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current RHS | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 2 | 8000.000 | INFINITY | 2000.000 |
| 3 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 4 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 5 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 6 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 7 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 8 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 9 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 10 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 11 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |

! PESIMISTA

! FUNCION OBJETIVO

Min

221X11+317X12+293X13+353X14+365X15+209X21+305X22+281X23+341X24+353X25+19
7X31+293X32+269X33+329X34+341X35+197X41+293X42+269X43+329X44+341X45+209
X51+305X52+281X53+341X54+353X55

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

$x_{11}+x_{12}+x_{13}+x_{14}+x_{15} < 7200$! Empresa panelera El Saman
 $x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}+x_{25} < 9000$! Empresa panelera Las Delicias
 $x_{31}+x_{32}+x_{33}+x_{34}+x_{35} < 10800$! Empresa panelera La Avispa
 $x_{41}+x_{42}+x_{43}+x_{44}+x_{45} < 10800$! Empresa panelera Villa Inés
 $x_{51}+x_{52}+x_{53}+x_{54}+x_{55} < 9000$! Empresa panelera El Vergel

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

$x_{11}+x_{21}+x_{31}+x_{41}+x_{51} = 9000$! Cliente en Cali
 $x_{12}+x_{22}+x_{32}+x_{42}+x_{52} = 9000$! Cliente en Ibagué
 $x_{13}+x_{23}+x_{33}+x_{43}+x_{53} = 9000$! Cliente en Neiva
 $x_{14}+x_{24}+x_{34}+x_{44}+x_{54} = 9000$! Cliente en Medellín
 $x_{15}+x_{25}+x_{35}+x_{45}+x_{55} = 9000$! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.1320660E+08
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 13
 Elapsed runtime seconds: 0.09

Model Class: LP

Total variables: 25
 Nonlinear variables: 0
 Integer variables: 0

Total constraints: 11
 Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 75
 Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 5400.000 | 0.000000 |
| X12 | 0.000000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 0.000000 | 0.000000 |
| X22 | 1800.000 | 0.000000 |
| X23 | 7200.000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 0.000000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| X33 | 1800.000 | 0.000000 |
| X34 | 9000.000 | 0.000000 |
| X35 | 0.000000 | 0.000000 |
| X41 | 1800.000 | 0.000000 |
| X42 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 9000.000 | 0.000000 |
| X51 | 1800.000 | 0.000000 |
| X52 | 7200.000 | 0.000000 |
| X53 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 0.000000 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.1320660E+08 | -1.000000 |
| 2 | 1800.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 12.00000 |
| 4 | 0.000000 | 24.00000 |
| 5 | 0.000000 | 24.00000 |
| 6 | 0.000000 | 12.00000 |
| 7 | 0.000000 | -221.0000 |
| 8 | 0.000000 | -317.0000 |
| 9 | 0.000000 | -293.0000 |
| 10 | 0.000000 | -353.0000 |
| 11 | 0.000000 | -365.0000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current | Allowable | Allowable |
|----------|-------------|-----------|-----------|
| | Coefficient | Increase | Decrease |
| X11 | 221.0000 | 0.000000 | 12.00000 |
| X12 | 317.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X13 | 293.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 353.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X15 | 365.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 209.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X22 | 305.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 281.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 341.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 353.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 197.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X32 | 293.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 269.0000 | 0.000000 | 0.000000 |

| | | | |
|-----|----------|----------|----------|
| X34 | 329.0000 | 0.000000 | INFINITY |
| X35 | 341.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X41 | 197.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X42 | 293.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X43 | 269.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X44 | 329.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X45 | 341.0000 | 0.000000 | INFINITY |
| X51 | 209.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X52 | 305.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 281.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X54 | 341.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 353.0000 | INFINITY | 0.000000 |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current RHS | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 2 | 7200.000 | INFINITY | 1800.000 |
| 3 | 9000.000 | 5400.000 | 1800.000 |
| 4 | 10800.00 | 5400.000 | 1800.000 |
| 5 | 10800.00 | 5400.000 | 1800.000 |
| 6 | 9000.000 | 5400.000 | 1800.000 |
| 7 | 9000.000 | 1800.000 | 5400.000 |
| 8 | 9000.000 | 1800.000 | 5400.000 |
| 9 | 9000.000 | 1800.000 | 5400.000 |
| 10 | 9000.000 | 1800.000 | 5400.000 |
| 11 | 9000.000 | 1800.000 | 5400.000 |

! SHOCK

! FUNCION OBJETIVO

Min

$$276X_{11}+396X_{12}+366X_{13}+441X_{14}+456X_{15}+261X_{21}+381X_{22}+351X_{23}+426X_{24}+441X_{25}+246X_{31}+366X_{32}+336X_{33}+411X_{34}+426X_{35}+246X_{41}+366X_{42}+336X_{43}+411X_{44}+426X_{45}+261X_{51}+381X_{52}+351X_{53}+426X_{54}+441X_{55}$$

S.T.

! RESTRICCIONES DE SUMINISTRO

| | |
|--|---------------------------------|
| $x_{11}+x_{12}+x_{13}+x_{14}+x_{15} < 8000$ | ! Empresa panelera El Saman |
| $x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}+x_{25} < 10000$ | ! Empresa panelera Las Delicias |
| $x_{31}+x_{32}+x_{33}+x_{34}+x_{35} < 12000$ | ! Empresa panelera La Avispa |
| $x_{41}+x_{42}+x_{43}+x_{44}+x_{45} < 12000$ | ! Empresa panelera Villa Inés |
| $x_{51}+x_{52}+x_{53}+x_{54}+x_{55} < 10000$ | ! Empresa panelera El Vergel |

! RESTRICCIONES DE DEMANDA

$$x_{11}+x_{21}+x_{31}+x_{41}+x_{51} = 10000 \quad ! \text{ Cliente en Cali}$$

$x_{12}+x_{22}+x_{32}+x_{42}+x_{52} = 10000$! Cliente en Ibagué
 $x_{13}+x_{23}+x_{33}+x_{43}+x_{53} = 10000$! Cliente en Neiva
 $x_{14}+x_{24}+x_{34}+x_{44}+x_{54} = 10000$! Cliente en Medellín
 $x_{15}+x_{25}+x_{35}+x_{45}+x_{55} = 10000$! Cliente en Bogotá

Global optimal solution found.

Objective value: 0.1833000E+08
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 13
 Elapsed runtime seconds: 0.20

Model Class: LP

Total variables: 25
 Nonlinear variables: 0
 Integer variables: 0

 Total constraints: 11
 Nonlinear constraints: 0

 Total nonzeros: 75
 Nonlinear nonzeros: 0

| Variable | Value | Reduced Cost |
|----------|----------|--------------|
| X11 | 6000.000 | 0.000000 |
| X12 | 0.000000 | 0.000000 |
| X13 | 0.000000 | 0.000000 |
| X14 | 0.000000 | 0.000000 |
| X15 | 0.000000 | 0.000000 |
| X21 | 0.000000 | 0.000000 |
| X22 | 2000.000 | 0.000000 |
| X23 | 8000.000 | 0.000000 |
| X24 | 0.000000 | 0.000000 |
| X25 | 0.000000 | 0.000000 |
| X31 | 0.000000 | 0.000000 |
| X32 | 0.000000 | 0.000000 |
| X33 | 2000.000 | 0.000000 |
| X34 | 10000.00 | 0.000000 |
| X35 | 0.000000 | 0.000000 |
| X41 | 2000.000 | 0.000000 |
| X42 | 0.000000 | 0.000000 |
| X43 | 0.000000 | 0.000000 |
| X44 | 0.000000 | 0.000000 |
| X45 | 10000.00 | 0.000000 |
| X51 | 2000.000 | 0.000000 |
| X52 | 8000.000 | 0.000000 |

| | | |
|-----|----------|----------|
| X53 | 0.000000 | 0.000000 |
| X54 | 0.000000 | 0.000000 |
| X55 | 0.000000 | 0.000000 |

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1 | 0.1833000E+08 | -1.000000 |
| 2 | 2000.000 | 0.000000 |
| 3 | 0.000000 | 15.00000 |
| 4 | 0.000000 | 30.00000 |
| 5 | 0.000000 | 30.00000 |
| 6 | 0.000000 | 15.00000 |
| 7 | 0.000000 | -276.0000 |
| 8 | 0.000000 | -396.0000 |
| 9 | 0.000000 | -366.0000 |
| 10 | 0.000000 | -441.0000 |
| 11 | 0.000000 | -456.0000 |

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges:

| Variable | Current Coefficient | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|----------|---------------------|--------------------|--------------------|
| X11 | 276.0000 | 0.000000 | 15.00000 |
| X12 | 396.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X13 | 366.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X14 | 441.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X15 | 456.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X21 | 261.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X22 | 381.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X23 | 351.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X24 | 426.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X25 | 441.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X31 | 246.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X32 | 366.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X33 | 336.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X34 | 411.0000 | 0.000000 | INFINITY |
| X35 | 426.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X41 | 246.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X42 | 366.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X43 | 336.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X44 | 411.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X45 | 426.0000 | 0.000000 | INFINITY |
| X51 | 261.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X52 | 381.0000 | 0.000000 | 0.000000 |
| X53 | 351.0000 | INFINITY | 0.000000 |

| | | | |
|-----|----------|----------|----------|
| X54 | 426.0000 | INFINITY | 0.000000 |
| X55 | 441.0000 | INFINITY | 0.000000 |

Righthand Side Ranges:

| Row | Current RHS | Allowable Increase | Allowable Decrease |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 2 | 8000.000 | INFINITY | 2000.000 |
| 3 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 4 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 5 | 12000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 6 | 10000.00 | 6000.000 | 2000.000 |
| 7 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 8 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 9 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 10 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |
| 11 | 10000.00 | 2000.000 | 6000.000 |