

VI Encuentro Nacional de Investigación Formativa Ingeniería Industrial Medellín

Memorias

Grupo de Investigación en Sistemas Aplicados
en la Industria (GISAI)



Universidad
Pontificia
Bolivariana

© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana

VI Encuentro Nacional de Investigación Formativa - Memorias

ISSN: 2322-7672

Primera edición, 2015

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Industrial

Arzobispo de Medellín y Gran Canciller UPB: Mons. Ricardo Tobón Restrepo

Rector General: Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

Vicerrector Académico: Álvaro Gómez Fernández

Decana Escuela de Ingenierías: Piedad Gañán Rojo

Directora Facultad de Ingeniería Industrial: Diana Rocío Roldán Medina

Editora (e): Natalia Uribe Angarita

Coordinación de producción: Ana Milena Gómez Correa

Diagramación: María Isabel Arango Franco

Corrector de estilo: Fernando Aquiles Arango Navarro

Dirección editorial:

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2015

Email: editorial@upb.edu.co

www.upb.edu.co

Telefax: (57) (4) 354 4565

A.A. 56006 - Medellín - Colombia

Radicado: 1377-27-07-15

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

Modelo de asignación de transporte para la minimización de costos de cosecha en un trapiche panelero

Laura Cristina Guzmán Nieto (Estudiante)

Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia - Palmira
laurentina_guzni@hotmail.com

Mariela Galindo Barbosa (Docente)

Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia - Palmira
mariegaba@yahoo.com

Resumen

El Valle del Cauca siembra 124.210 hectáreas de caña panelera con una participación del 41% del PIB agrícola y cosecha 14 millones de toneladas año. El productor panelero hace parte de una coordinación logística empírica, lo cual ha hecho que incurra en altos costos de poscosecha; para dar solución efectiva a esta problemática, se propone un modelo de programación lineal entera mixta, donde se evalúan diversos escenarios del sistema para optimizar el sistema de costos de operación logística de transporte; para un periodo anual desarrollado a través del simulador AMPL.

Palabras clave

Cosecha, caña, panela, programación lineal enteramixta, logística de transporte, AMPL.

Abstract

The Valle del Cauca planting 124,210 hectares of sugarcane with a 41% of agricultural PIB and 14 million tonnes crop year. Panela producer , is part of an empirical logistic coordination which has made high costs incurred in postharvest; to give effective solution to this problem, a model of mixed integer linear programming system where different scenarios are evaluated to optimize the system of logistics costs transport operation; for an annual period developed through the AMPL simulator.

Keywords

Harvest, cane, brownsugar, Mixedinteger linear programming, transportation-logistics, AMPL.

Introducción

Este estudio se basa en una investigación descriptiva científica de metodología mixta, enfocada en examinar una problemática que se evidencia en la factoría y en el sector agroindustrial de la región y el país.

La subutilización de la capacidad de los vagones es originada por el sistema actual de operación logística en la poscosecha (alce y transporte), dado a través de una metodología empleada a lo largo de los años que ha llevado cada vez más a un incremento sostenido de costos de operación, causados por la ausencia de planeación de rutas efectivas para el alce y la cosecha donde no se aprovecha al máximo la capacidad

de los vagones. Otro factor es el desabastecimiento de caña generada por la cogeneración de biocombustibles donde se ofrecen mejores precios por hectárea cultivada.

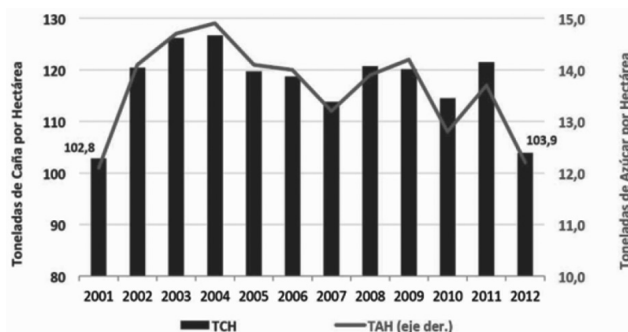
En este orden de ideas, se generarán propuestas para la optimización de proceso industrial del transporte de caña panelera, desde el campo hasta la molienda, que contribuyen al mejoramiento continuo del proceso generando alta inversión en mantenimiento, para estar encaminados en la búsqueda de procesos eficientes, siendo importante la continuidad de investigación y medición del proceso.

El sector cañicultor está bajo cierta influencia de costos de envío por tonelada desde el campo hasta la fábrica, lo cual es variable dependiendo de la ubicación entre el 25% y el 35% del costo total, donde el 35% es combustible, 28% mantenimiento de equipos, el 27% costos de operación, 10% llantas y filtros (Ramírez y García 2006).

Ante esta situación, la factoría incurre en altos costos de producción para ser competitivo. Esto genera la motivación para indagar una posible solución a la problemática, donde la implementación de estrategias logísticas efectivas hace que la toma de decisiones sea eficaz en pro del transporte, visión de sostenibilidad y sustentabilidad empresarial para implementar estrategias que beneficien la rentabilidad, la reducción de costos al momento de transportar la materia prima a la planta, vista como una estrategia efectiva que logre la minimización de costos y eficiencia productiva, a través de análisis y mejoras a intervenir sobre el proceso, por medio de un modelo de optimización logística.

El sector azucarero es una actividad productiva que debe moverse en un mundo cada vez más competido, en el que los mercados preferenciales están siendo cosa del pasado y los mecanismos de protección agrícola tienden a desaparecer. Es decir, que más pronto que tarde una industria como la azucarera debe estar en capacidad de competir a los precios de los mercados mundiales. Por eso, el sector está en proceso de evolución, haciendo esfuerzos continuados por mejorar aún más su eficiencia y competitividad en procura de alcanzar condiciones que permitan competir en algún momento del futuro sin protecciones y en los términos que lo permita el mercado internacional; como lo evidencia el crecimiento del indicador líder en materia azucarera, el cual resume la eficiencia de los procesos de producción tanto de campo como de fábrica, Toneladas de Caña obtenidas por Hectárea de caña cosechada (TCH), en Colombia según Asocaña el promedio del 2001 al 2012 en toneladas de caña por hectárea fue de 102,8 THC para el 2001 y de 103,9 THC para el 2012 presentando un comportamiento cíclico, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Indicadores de productividad THC Y TAH (2001)



Fuente: Informe anual 2012-2013; Asocaña

La subutilización de la capacidad de los vagones es originada por el sistema actual de operación logística en la poscosecha (alce y transporte), dado a través de una metodología empleada a lo largo de los años que ha llevado cada vez más a un incremento sostenido de costos de operación causados por la ausencia de planeación de rutas efectivas para el alce y la cosecha donde no se aprovecha al máximo la capacidad de los vagones. Otro factor es el desabastecimiento de caña generada por la cogeneración de biocombustibles donde se ofrecen mejores precios por hectárea cultivada.

En este orden de ideas, se generarán propuestas para la optimización de proceso industrial del transporte de caña panelera, desde el campo hasta la molienda que contribuyen al mejoramiento continuo del proceso generando alta inversión en mantenimiento, para estar encaminados en la búsqueda de procesos eficientes, siendo importante la continuidad de investigación y medición del proceso.

Ante esta situación, la factoría incurre en altos costos de producción para ser competitivo. Esto genera la motivación para indagar una posible solución a la problemática, donde la implementación de estrategias logísticas efectivas hace que la toma de decisiones sea eficaz en pro del transporte, visión de sostenibilidad y sustentabilidad empresarial para implementar estrategias que beneficien la rentabilidad, la reducción de costos al momento de transportar la materia prima a la planta, vista como una estrategia efectiva que logre la minimización de costos y eficiencia productiva, a través de análisis y mejoras a intervenir sobre el proceso por medio de un modelo de optimización logística.

En este orden de ideas, se generarán propuestas para la optimización de proceso industrial del transporte de caña panelera desde el campo hasta la molienda, que contribuyen al mejoramiento continuo del proceso su alta inversión y mantenimiento, para estar encaminados en la búsqueda de procesos eficientes, siendo importante la continuidad de investigación y medición del proceso, para así, sustentar científicamente esta estrategia con el fin de poder obtener mejores resultados.

Antecedentes investigativos

En la revisión literaria se evidenció que en el sector azucarero existen diversas investigaciones relacionadas con la optimización de costos de transporte desde el alce hasta la planta de producción.

A continuación se presenta una serie de estudios que ha implementado la programación lineal para la optimización de costos y la mejora continua en sus sistemas logísticos.

Higgins (2006), da a conocer la problemática de la industria azucarera australiana, donde se identifica la ausencia de integración en la cadena de abastecimiento ante las ineficiencias entre el sistema de cosecha y poscosecha desde el punto de vista del transporte.

Este problema se aborda a través del desarrollo de una estructura que permite integrar estos dos sistemas, mediante la reducción en el número de cosechadoras en la región y la implementación de mejoras en la práctica de la cosecha, con el objetivo de reducir los costos de producción. El desarrollo e implementación lo describe Higgins analizando dos casos dentro de las áreas de los molinos de la industria azucarera en Australia. El modelo fue aplicado en una región perteneciente a un ingenio, en el 2003, logrando un incremento en sus utilidades de AU\$1.000.000 por año [7].

En otra investigación Vidal (2006), propone un modelo de optimización de cadenas de abastecimiento y su uso potencial en sistemas de transporte de caña de azúcar, enfocado en *supplychainmanagement (SCM)*, que integra actividades de suministro y demanda dentro de y entre las compañías. El planteamiento es enfocado en la región Andina y Centro América, estableciendo características de localización de una nueva planta, proveedores de materia prima, dos etapas de manufactura y centros

de distribución, modelos de transporte definidos a priori, consideración de precios de transferencia y consideración simultánea de optimización y análisis de factibilidad técnica y económica.

Para dar respuesta a este planteamiento emplea técnicas de solución como:

- Lenguajes generadores de modelos, como el AMPL;
- Software para resolver programación mixta, como por ejemplo CPLEX;
- Métodos heurísticas basados en transformaciones del modelo no-lineal y en PL sucesivos; y
- Algoritmos de optimización global.

La implementación de este modelo genera beneficios que se ven reflejados en:

- Instalación de la planta que opera en Colombia;
- Análisis de sensibilidad rápidos y precisos;
- Justificación científica de la toma de decisiones;
- Identificación de inconsistencias y estandarización de datos; y
- Optimización de estructura, flujos y precios de transferencia.

Este estudio abre el camino para otras áreas de investigación del sector azucarero, como: análisis de la cadena de abastecimiento completa incluyendo cultivo, fabricación y distribución, optimización de transporte y análisis de costos de logística a lo largo de la cadena. [16]

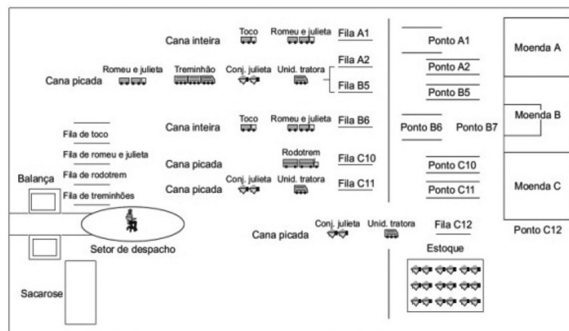
Décima y otros (2011) exponen la problemática de la agroindustria azucarera de Tucumán, Argentina, presentando numerosos problemas en el transporte de materia prima proveniente del campo que se transporta a los centros de producción en diferentes tipos de vehículos usando la red vial existente, generando gastos excesivos en la distribución. [5]

La propuesta de trabajo que se realizó para la optimización del tránsito de caña, desde el alce hasta los ingenios, se hace empleando sistemas multiagentes y algoritmos genéticos tipo *gruouping*, donde logran verificar el sistema actual de transporte sobre datos artificiales, hallando así la solución óptima al problema. [5]

García y otros (2007) plantean un análisis del sistema logístico para la recepción de caña de azúcar empleando la simulación discreta, mostrando lo vital que es un sistema logístico para mejorar la eficiencia operacional de las centrales azucareras, puesto que actúan sobre la integración de las operaciones agrícolas e industriales. [8]

Abordan un estudio basado en la recepción de caña en uno de los más grandes molinos de caña en Ribeirão Preto, Brasil. El trabajo se desarrolló con el objetivo de analizar el rendimiento del sistema e investigar configuraciones y políticas alternativas para su funcionamiento. Debido a varias fuentes de incertidumbre y la complejidad operativa del sistema, el método utilizado fue mediante técnicas basadas en la simulación discreta. Las principales medidas de rendimiento están relacionados con el tiempo promedio en el que los vehículos permanecen en el sistema de recepción y la cantidad promedio de azúcar en los ingenios descargados por unidad de tiempo. A continuación se presenta el estudio. [9]

Figura 2. Recepción de caña. El equilibrio, la expedición y el sector de la descarga



Antecedentes

Las bases teóricas sobre las que reposa esta propuesta de investigación son cuatro: la primera base proviene de los planteamientos formulados en la Segunda Guerra Mundial, de donde se generarán grandes avances en diversas ciencias; esta se ubica desde la perspectiva teórica de la programación lineal; la segunda base denominada Programación Lineal Entera (PLE) proviene de los planteamientos formulados por Wagner y Martne, pioneros en este tipo de modelación; el tercer fundamento teórico hace referencia al modelo de redes de transporte formulados por Charles Babbage, padre de la Investigación Operativa, la cual en la actualidad es pionera y aplicable en

diversas áreas. Por último, se hace referencia al estudio de métodos y tiempos, creando la ingeniería de métodos que data desde la escuela de Taylor y la escuela de Gilbreth, vista como herramienta de medición de tareas y grado de rendimiento con que se emplean los recursos disponibles. Todos estos autores e investigadores son importantes ya que sus aportes permiten fundamentar la idea base de esta investigación llamada: Modelo logístico de transporte para la factoría.

Programación Lineal (PL)

Las bases para forjar la Programación Lineal se dieron en 1947 durante la Segunda Guerra Mundial con ideas efectivas en la asignación de recursos en operaciones militares. Culminada la guerra, se adaptaron estas ideas para mejorar la eficiencia y productividad en la industria. Luego en 1950 se introdujo la investigación de operaciones en las organizaciones como ente facilitador para la toma de decisiones eficientes y óptimas; ya para 1980 se desarrolló la inteligencia artificial y la heurística como grandes avances en la investigación de la ciencia, vista como la implementación de las matemáticas que facilita la toma de decisiones. En general, la PL trata de buscar la mejor forma de asignar recursos limitados a diferentes actividades.

Programación Lineal Entera (PLE)

Sus pioneros fueron Wagner y Martne. Los modelos de Programación Lineal Entera (PLE) son considerados subclases de la programación lineal, sus variables sólo pueden tomar valores enteros, es decir, deja atrás la hipótesis de perfecta divisibilidad de variables. Por ende, se concentra en dos categorías: directa y transformada. En la primera categoría, la naturaleza de la situación imposibilita asignar valores fraccionarios a los modelos. En la segunda categoría se emplean variables enteras auxiliares para convertir situaciones abstractas en modelos óptimos a través de algoritmos de optimización disponibles.

Esta clasificación es primordial, puesto que los algoritmos de resolución de problemas lineales enteros se fundamentan directa o indirectamente en la versión continua de las problemáticas. [14]

La toma de decisiones en este tipo de modelación se llega a valores continuos, dando origen a decisiones dicotómicas y decisiones que deben tomarse en unidades discretas. La PLE se clasifica en tres tipos:

- Problemas enteros puros: todas las variables son enteras, donde se diferencian los problemas totalmente enteros;
- Problemas enteros mixtos: contiene al mismo tiempo variables continuas y variables que solo pueden tomar valores enteros; y
- Problemas binarios: las variables enteras solo pueden tomar valores de cero y uno. Estos, hacen parte de los algoritmos de decisión, asignación, localización, etc.

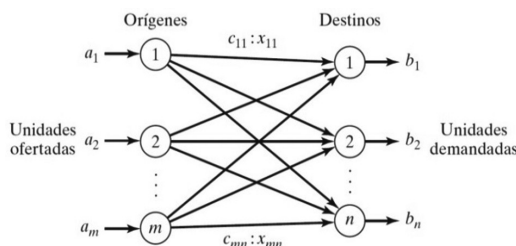
Modelo de redes de transporte

Se cree que Charles Babbage es el padre de la Investigación Operativa, debido a sus investigaciones acerca de los costos de transporte y clasificación del correo realizada en la *Uniform Penny Post* de Inglaterra en 1840. Durante los años 50 y 60, creció el interés por desarrollar nuevos modelos para aplicarlos en la industria y el comercio.

Los modelos de transporte hacen referencia al envío de artículos desde el origen hasta su destino, la finalidad es determinar el programa óptimo de transporte que minimice el costo total y, así mismo, satisfaga los límites de la oferta y demanda. Este tipo de modelos se puede implementar en diversas áreas de operación, tales como la programación de empleos, control de inventarios y asignación de personal.

La red que se presenta en la figura 2 representa el problema, donde hay m orígenes y n destinos, cada uno representado por un nodo. Los arcos representan las rutas que unen los orígenes con los destinos. El arco (i, j) que une el origen i con el destino j tiene dos informaciones: el costo de transporte por unidad c_{ij} y la capacidad x_{ij} . La cantidad de la oferta en el origen i es a_i y la cantidad de la demanda en el destino j es b_j . El objetivo del modelo es minimizar el costo de transporte total al mismo tiempo que se satisfacen las restricciones de la oferta y la demanda. [15]

Figura 3. Representación del modelo de transporte con nodos y arcos



Planteamiento del problema

En el Valle del Cauca, y específicamente en el municipio de Pradera se encuentra ubicado el trapiche panelero, que cuenta con un procedimiento tradicional para la distribución de vagones que está generando inconformidad en la empresa. Se ha encontrado un incremento sostenido del costo de distribución en 25%, 35% es combustible, 28% mantenimiento de equipos, 27% costos de operación, 10% llantas y filtros. Estos ítems pueden variar dependiendo de la ubicación del lote para el alce de la caña cortada, sin embargo siempre se ven incrementados.

También se han encontrado otros valores de incremento como:

- La mano de obra es el factor de mayor participación en los costos totales con un 29.6%, representado por las cuadrillas.
- Los costos de transporte representan el 14.5% de los costos totales y corresponden casi en su totalidad al traslado de la cosecha al ingenio.
- La tierra participa con el 14.3% de los costos totales.
- El factor “otros” agrupa los costos correspondientes a energía eléctrica para bombeo, control biológico, el cual ascendió al 13.9% de los costos totales.
- Los agroquímicos, representados por el costo de los fertilizantes y los plaguicidas, participan con el 8.5% de los costos totales.
- El agua para riego, retribución a la maquinaria, labor de alce de la cosecha, combustibles y semilla, participan con un porcentaje menor al 5.5% cada uno en los costos totales de producción.

Por lo anterior es importante resaltar que el ítem de mayor participación es el costo de producción, mano de obra y costos de transporte; por el traslado de la caña desde el campo hasta el molino.

Las unidades de transporte que se emplean en el trapiche panelero tienen una capacidad límite de maquinaria que cuenta con 7 tractores con la capacidad de remolcar 5 vagones cada uno; estos cuentan con capacidades que oscilan entre 4 y 6 toneladas. Estas unidades de transporte son enviadas desde su origen hasta las suertes que están a lejanas distancias que varían entre 5 y 60 km.

Sistematización del problema

Tradicionalmente, se ha evidenciado facilidad en su ejecución, no se ha ido más allá de donde simulan un análisis de costo, donde se verifique la viabilidad del escenario actual; igualmente es importante el simular la asignación de las unidades de transporte desde las suertes hasta la planta, pues tampoco se cuenta con una configuración óptima para el proceso de asignación de trenes cañeros.

Actualmente, para el envío de los trenes cañeros a las suertes se cuenta con un pronóstico de cañas cosechadas, el cual consiste en datos históricos sobre la demanda mensual de los terrenos, para su posterior corte y alce.

Para el control del corte se debe disponer de un sistema de registro que incluye datos como condición del cultivo, fecha de corte, hora de inicio y finalización del corte, código del transporte (tractores y vagones cañeros). Una vez la caña se encuentra en los patios de recepción, se pesa y se toman las muestras necesarias para el cálculo del tonelaje, esta es la forma actual de controlar el ingreso de materia prima a la planta de producción.



Las temporadas de madurez de la caña varían entre 13 meses para caña soca y 14 meses para plantilla (caña nueva). Se toma como dato inicial para el pronóstico de corte de la siguiente zafra el mes del año anterior a partir de este se cuenta el periodo correspondiente de madurez de la caña, variando está según sea el tipo. A continuación se presenta la capacidad de molienda diaria y anual a la que se debe dar respuesta.

Tabla 1. Capacidad de molienda

	MOLIENDA
Día	130 Tn/día
Año	1560 Tn/año

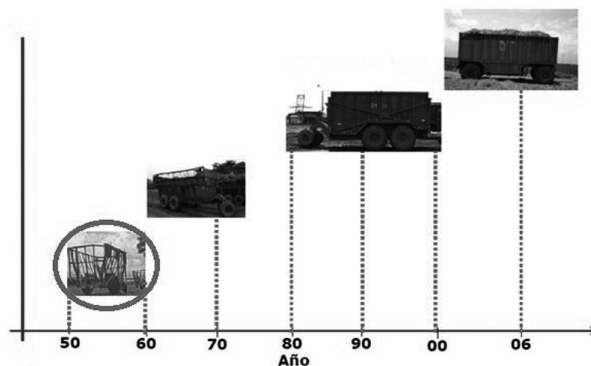
Por otra parte, el transporte desde las suertes hasta la planta se realiza en vagones (unidades de transporte) pequeños, cuyas capacidades oscilan entre 4 tn y 6 tn. En la siguiente tabla se presentan los vagones EWS.

Figura 4. Unidades de transporte disponibles

	Vagón	Capacidad [Tn]	Cantidad
	Vagón EWS	4	35
	Vagón EWS	6	35

La maquinaria disponible en la factoría es muy tradicional, cronológicamente se ubica en los años 50 – 60. Como lo muestra la ilustración, logrando así evidenciar la tradición que se ha sostenido por más de 50 años.

Figura 5. Sistema de transporte con tractores



Actualmente, se cuenta con 80 vagones cañeros de los cuales 10 son para transportar bagazo dentro de la planta y el resto son empleados para labores de campo para el posterior abastecimiento de los patios; son 35 vagones de 4 tn y 35 vagones de 6 tn en promedio.

Tanto los vagones como los tractores cuentan con una vida útil de 8 años y una depreciación de 2 años. En cuanto a la maquinaria de arrastre hay 5 propias y 2 contratadas. En la tabla que se presenta a continuación, sobre características de

remolcadoras, se hace referencia al tipo de tractor y las características relevantes a tener en cuenta en la situación problema.

Tabla 2. Características de remolcadoras

Potencia [Hp]	Capacidad de carga [TC]
120	30
150	37,5
230	57,5
120	30
230	57,5
250	62,5
130	32,5

Por otra parte, otra de las variables necesarias a contemplar para el análisis de escenarios es la capacidad anual de cosecha de las suertes, como se muestra en la siguiente tabla. La caña cosechada se clasifica en propias y de proveedores; para la modelación algebraica es necesario resaltar que al presentar costos que oscilan entre los mismos rangos se emplea como un solo parámetro.

Tabla 3. Cosecha anual de caña

	Capacidad anual [Tn/año]	Área [Hect]
Caña propia	15000	± 50
Caña proveedores	20000	± 65

Es importante identificar que para el proceso de poscosecha se deben evaluar los parámetros corte y alce considerados dentro de la variable cuadrilla. Estos cuentan con una capacidad estimada de mano de obra que muestra la figura 9.

Tabla 4. Capacidad estimada de cuadrillas (corte y alce) manual

Cuadrilla	Contratista	Mano de obra (M.O)	Capacidad estimada	\$/Tn
Corte	1 - 2	60	2,5	8300
Alce	1 - 2	20	10	4150

Estructura del modelo matemático

Los datos a analizar en los diversos escenarios han sido recolectados directamente de Agropanela. Donde se realizó una investigación dispendiosa y concreta sobre la situación actual evidenciada en la factoría, cantidad de maquinaria disponible entre vagones cañeros y tractores, datos históricos sobre cantidad de suertes cosechadas, prontuario de corte, mano de obra disponible para corte y apronte (alce y transporte).

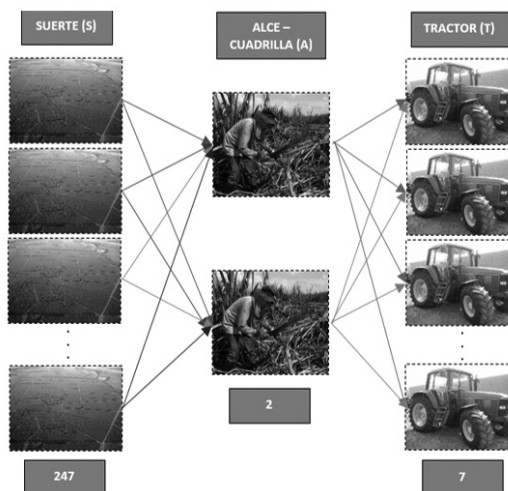
Características del modelo

El modelo de decisión propuesto se basa en información suministrada por Agropanela, empresa ubicada en el Valle geográfico del río Cauca y dedicada a la producción de panela bajo los altos estándares de calidad. Actualmente, implementan un modelo de asignación de trenes cañeros de manera empírica.

Seguidamente, se hace referencia a las generalidades del proceso de cosecha (corte, alce y transporte) de caña panelera, para así dar mayor precisión al momento de exponer el modelo propuesto.

Esquemáticamente el modelo se puede ilustrar como se presenta a continuación:

Figura 6. Situación problema



Fuente: Datos tomados por el investigador

Características y datos que configuran el modelo de programación lineal mixto:

Tabla 5. Características generales del modelo

Cantidad de suertes	s=247
Cantidad de cuadrillas de alce	a=2
Cantidad de tractores	T=7
Tipo de tractores	Ver tabla 7. Características de remolcadoras
Cantidad de vagones	T _v =70
Tipo de vagones	Vagones EWS modelo 1960
Capacidad de molienda	130Tn/día
Total de variables	3 - Binaria
Total de restricciones	5
Función objetivo	1

Fuente: Datos tomados por el investigador

Supuestos generales del sistema estratégico a modelar:

- El modelo se diseña para un periodo de planeación a 1 año, siendo factible ya que los periodos de maduración de la caña oscilan entre 13 meses para caña cepa (ya ha sido cortada y queda la semilla en el terreno) y 14 meses para la plantilla (caña nueva).
- La cantidad de caña a cosechar en cada suerte es dada por el prontuario de corte.
- Al ser la caña un producto perecedero se deben tener presentes los indicadores de sacarosa que contiene la caña.
- Se incluyen restricciones de capacidad, demanda y periodos de zafra.
- La función objetivo evalúa el costo de capacidad de la cuadrilla (corte y alce) asociado a las suertes para asignarlos a las unidades de transporte buscando la minimización de costos de asignación.
- Los costos de cosecha (corte, alce y transporte) son tomados a partir de la información suministrada por el trapiche panelero.

Modelo de asignación de unidades de transporte a las suertes

A continuación se presenta la notación y formulación matemática de la situación problema, por medio de un modelo de programación lineal entera mixta. Donde se define la función objetivo, conjuntos e índices, parámetros, restricciones y variables de decisión.

Formulación verbal del modelo de asignación de unidades de transporte a las suertes

Índices, conjuntos y subconjuntos

$s \in S$	Suertes
$c \in C$	Cuadrillas
$t \in T$	Tipo de transporte
$t \in T_p$	Transporte propio
$t \in T_c$	Transporte de contratistas

Parámetros

- K_{st} : Costo de transporte de una tonelada de caña de la suerte “s” en la unidad de transporte “t” [\$/tn*km]
 K_a : Costo de alce de una tonelada de caña por la cuadrilla “c”. [\$/tn]
 K_c : Costo de corte de una tonelada de caña por la cuadrilla “c”. [\$/tn]
 T_s : Caña cosechada en la suerte “s”. [tn/año]
 C_c : Capacidad estimada por la cuadrilla “c”. [tn/año]
 C_t : Capacidad del tipo de transporte “t” con la unidad de transporte “v”. [tn/año]
 R_q : Requerimiento o demanda de caña para molienda [tn/año]
 D_s : Distancia de la suerte “s” al molino. [Km]
No: Número de viajes por máquina [viajes/año]

Se establecen parámetros unidimensionales, tales como la capacidad de molienda anual de caña, cantidad de vagones o canastas y remolcadoras. Al igual que parámetros bidimensionales, como costos variables de transporte, alce, corte, cantidad de caña cosechada, capacidad estimada de las cuadrillas.

Función objetivo

Minimizar costos de asignación, referentes a la capacidad de la cuadrilla (corte y alce) asociado a las suertes para asignarlos a las unidades de transporte; con un horizonte de doce (12) meses ya que el periodo de maduración de la caña oscila entre 13 y 14 meses, para cepa y plantilla respectivamente.

*[[(Costo de cuadrilla de una tonelada de caña + (Costo de transporte de una tonelada de caña de la suerte en las unidades de transporte * Distancia de la suerte hasta el trapiche)] * Caña cosechada anualmente por las suertes } * Si la suerte "s" es cortada por la cuadrilla "a" y transportada por "t".*

Restricciones

Se consideraron las siguientes restricciones, para la viabilidad del problema de decisión:

- Capacidad de cuadrilla
- Capacidad de unidades de transporte por viaje
- Demanda
- Corte anual de suertes
- Número de viajes por unidad de transporte
- Binaria

Formulación del modelo matemático en notación algebraica

Variable de decisión

$$X_{\text{sat}} = \begin{cases} 1 & \text{Si la suerte "s" es cortada por la cuadrilla "c" y} \\ & \text{transportada por "t".} \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

Las variables de decisión evidenciadas en el análisis del escenario pueden ser controlables por el trapiche, dando el manejo idóneo se lograría optimizar este eslabón de la cadena de suministro de materia prima ya sea de modo directo o indirecto. Pues estará en la capacidad de decidir cuál configuración de unidades de transporte es la óptima a enviar a la suerte que está siendo cortada y alzada por las cuadrillas. Logrando así la reducción de costos logísticos de asignación.

Función objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_{s \in S} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} [K_c + (K_{st} * D_s) * T_s] * X_{sct}$$

La función objetivo, evalúa el costo de capacidad de la cuadrilla (corte y alce) asociado a las suertes para asignarlas las unidades de transporte buscando la minimización de costos de asignación.

Restricciones

1. *Capacidad de cuadrilla*

$$\sum_{s \in S} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} T_s * X_{sct} \leq C_c \left[\frac{tn}{año} \right]; \forall c \in C$$

Número total de suertes cortadas por cada cuadrilla según su capacidad estimada.

2. *Capacidad de unidades de transporte por viaje*

$$\sum_{s \in S} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} T_s * X_{sct} \leq C_t \left[\frac{tn}{año} \right]; \forall t \in T$$

El número total de suertes que se asignarán a cada cuadrilla, estará dado a partir de la capacidad de la cuadrilla y por la capacidad de las unidades de transporte, asignando las unidades propias y de contratistas; como se muestra en la restricción 1.

3. *Demanda*

$$\sum_{s \in S} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} T_s * X_{sct} = R_q \left[\frac{tn}{año} \right]$$

Permitirá que la cantidad de caña cosechada en las suertes la capacidad satisfaga la capacidad de molienda anual.

4. *Corte anual de suertes*

$$\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} X_{sct} = 1; \forall s \in S \left[\frac{tn}{año} \right]$$

El ciclo de maduración de caña para su posterior corte se encuentra en los rango de 13 y 14 meses, lo cual se quiere garantizar con esta restricción que la suerte se corta solamente una vez al año.

5. *Binarias:*

$$X_{sat} \in \{0,1\}$$

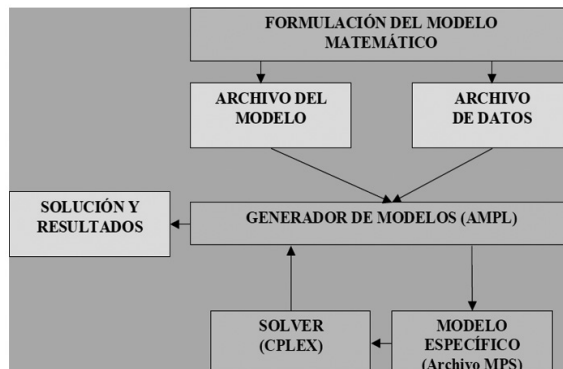
Esta restricción define el dominio de la variable de decisión.

Modelación en AMPL – solución del modelo

Vidal (2010) plantea que cuando los problemas son de mayor tamaño, como ocurre en el caso de modelos reales, se debe utilizar software especializado para la generación y solución de los modelos. Esto se debe a que los modelos reales pueden llegar a tener decenas de miles, centenas de miles e incluso millones de variables, con otro tanto de restricciones. El proceso de generación del modelo consiste en que al software generador se le suministra la estructura matemática del modelo, de acuerdo con su propia sintaxis, y el generador combina los archivos del modelo y de datos para producir un archivo ejecutable por el solucionador correspondiente.

Para este trabajo se diseñó el modelo en AMPL (A Modeling Language for Mathematical Programming), debido a que se obtiene un grado de independencia entre los valores, que permite que pueda tenerse un archivo de modelo maestro y correrlo con varios archivos de datos diferentes. Es un lenguaje de programación que permite optimizar la función objetivo y ayuda a encontrar la mejor solución [2]. La Figura 12 describe el funcionamiento del lenguaje de modelamiento para programación matemática AMPL:

Figura 7. Funcionamiento general de n programa generador de modelos y solucionador (solver) asociado. [15]



A continuación se plantea el modelo de programación lineal entera mixta. El modelo en AMPL se muestra a continuación, para tener mayor claridad nótese la correspondencia entre los nombres de los conjuntos, parámetros y variables del modelo como se definió anteriormente en la notación verbal y algebraica.

```
# MODELO DE ASIGNACION DE UNIDADES DE TRANSPORTE A LAS
SUERTES
```

```
# INDICES, CONJUNTOS Y SUBCONJUNTOS
```

```
set SUERTES; # Conjunto de extension de tierra disponibles
para cosechada indexado por s
```

```
set CUADRILLA; # Frentes de alce y corte indexado por c
```

```
set TIPOTRANS; # Transporte a emplear tractores y vagones
indexado por t
```

```
set TRANSPROP within TIPOTRANS; # tractores propios
```

```
set TRANCONTR within TIPOTRANS; # Tractores contratados
```

```
# PARÁMETROS
```

```
paramKst {s in SUERTES, t in TIPOTRANS} >= 0;
```

```
# Costo de transporte de una tonelada de caña de la suerte
"s" en la unidad de transporte "t"
```

```
# ($/ton*km)
```

```
param Kc {c in CUADRILLA} >= 0;
```

```
# Costo de corte y alce por cuadrillas de una tonelada de
caña por la cuadrilla "c"
```

```
# ($/ton)
```

```
paramTs {s in SUERTES} >= 0;
```

```
# Caña cosechada en la suerte "s"
```

```
# (ton/año)
```

```
paramCc {c in CUADRILLA} >= 0;
```

```
# Capacidad estimada de la cuadrilla "c"
```

```
# (tn/año)
```

```

paramCp {t in TRANSPROP} >= 0;
# Capacidad del tipo de transporte propio "t"
# (ton/año)

paramCc {t in TRANSCONTR} >= 0;
# Capacidad del tipo de transporte contratista "t"
# (ton/año)

paramRq >= 0;
# Requerimiento de anual de caña a moler
# (ton/año)

paramDs {s in SUERTES} >= 0;
# Distancia de la suerte "s" al molino
# (Km)

param No {t in TIPOTRANS} >= 0;
# Numero de viajes
# (No/año)

# VARIABLES DE DECISIÓN

var X {s in SUERTES, c in CUADRILLA, t in TIPOTRANS} >= 0 binary;
# Si la suerte "s" es cortada por la cuadrilla "a" transportada por "t" en la unidad "v".

# FUNCIÓN OBJETIVO

minimize COSTO_ANUAL: # ($/año)

sum {s in SUERTES, t in TIPOTRANS, c in CUADRILLA} (Kc[c] + (Ks[t,s,t]*Ds[s]))*Ts[s])*X[s,a,t];
# RESTRICCIONES

subjecto CAPACIDAD_CUADRILLA {c in CUADRILLA}:
sum {s in SUERTES, c in CUADRILLA, t in TIPOTRANS} T[s]*X[s,c,t] <= Cc[c];

```

```

subjectto CAPTIPO_TRANSPROP {t in TRANSPROP}:
sum {s in SUERTES, c in CUADRILLA, t in TRANSPROP}
T[s]*X[s,c,t] <= Ct[t,v];

```

```

subjectto CAPTIPO_TRANSCONTR {t in TRANSCONTR}:
sum {s in SUERTES, c in CUADRILLA, t in TRANSPROP}
T[s]*X[s,c,t] <= Ct[t,v];
subjectto DEMANDA_MOLIENDA :
sum {s in SUERTES, c in CUADRILLA, t in TIPOTRANS}
D[s]*X[s,c,t] = Rq;

```

```

subjectto CORTEANUAL_SUERTES {s in SUERTES} :
sum {c in CUADRILLA, t in TIPOTRANS} X[s,c,t] = 1;

```

El modelo propuesto anteriormente, es la propuesta de solución para la problemática evidenciada en la factoría; buscando así la solución más aproximada a la óptima.

Conclusiones

Con el modelo de optimización propuesto, se busca dar respuesta al proceso de asignación de transporte para disminuir los costos de distribución del alce de caña de azúcar cortada por el trapiche.

Logrando así describir y analizar efectivamente el sistema actual de apronte de caña de azúcar y la forma idónea de optimizarlo. A través del modelo de asignación de transporte para el máximo aprovechamiento de la capacidad del sistema compuesto por suertes, cuadrillas y transporte. A través de escenarios que faciliten la toma de decisiones

Referencias

1. Amú, L. Logística de cosecha: evaluación de tiempos y movimientos. Indicadores y control, Revista Técnicaña 26, 2010, pp. 27 – 32

2. Arboleda J, & Ramirez, N. Modelamiento Matemático del programa maestro de producción [MPS] en una empresa de sector de plásticos. Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia, 2014.
3. Cenicaña, Centro de investigación de caña de azúcar de Colombia (2014). [En línea] Disponible en: <http://www.cenicana.org/>
4. Corpoica, Corporación colombiana de investigación agropecuaria. (2014), [En línea] Disponible en: www.corpoica.org.co/
5. Décima, A. Majorel, N. Will, A., Rodríguez, S. & Diez, O. Optimización del transporte de caña de azúcar utilizando sistemas multiagentes y algoritmos genéticos grouping, Rosario, Argentina, 2011.
6. Fedepanela, Federación Nacional de Productores de Panela (2014) [En línea] Disponible en: <http://www.fedepanela.org.co/>
7. Higgins, Andrew. Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: A case study at an Australian sugar mill. *European Journal of Operational Research*. Vol.170. 2006, pp.987.
8. I.A. García, H. M.V.Z. Albarracín, L, I.Q. Toscano, A. I.A. Santana, N. & I.A. Insuasty, O. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera, Bogotá, DC., Colombia, 2007.
9. Iannomi, A. & Morabito, R. (2002), Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: Um estudo de caso utilizando simulação discreta, *SciELO Brazil*, 9 (2), 107 – 110
10. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Observatorio Agrocadenas Colombia, la cadena agroindustrial de la panela en Colombia. Bogotá, Colombia, 2005.
11. Procaña, Asociación Colombiana de Productores y Proveedores de Caña de Azúcar. (2014), [En línea] Disponible en: <http://www.procana.org/>
12. Ramírez, G. & García, C. Sistema de transporte de caña de azúcar en Colombia, Pradera, Colombia, 2006.
13. Taha, H. Investigación de operaciones (9na Ed), Pearson, Naucalpan de Juárez, Estado de México, 2012.
14. Vidal, C. Introducción a la modelación matemática y optimización. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, 2005.
15. Vidal, C. Planeación, optimización y administración de cadenas de abastecimiento. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, 2010.
16. Vidal, C. Foro-taller internacional sobre cosecha y transporte de caña de azúcar. Optimización de cadenas de abastecimiento y su uso potencial en sistemas de transporte de caña de azúcar, Palmira, Colombia, 2006.