



**CONCEPTUALIZACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DE UN MODELO DE  
SIMULACIÓN PARA EL CONTROL DE ABASTECIMIENTO EN LA  
CADENA DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

**PROYECTO DE GRADO**

**EDWARD YEIR FAJARDO LENIS**

**ASESOR DE INVESTIGACIÓN**

**FERNANDO QUINTERO**

**UNIVERSIDAD ICESI**

**FACULTA DE INGENIERIA INDUSTRIAL**

**MAESTRIA EN INGENIERIA INDUSTRIAL**

**SANTIAGO DE CALI**

**2013**

# RESUMEN

La importancia de contextualizar toda la dinámica del proceso de abastecimiento de caña con una visión holística que integre las variables del proceso con los eventos o contingencias que pueden ocurrir durante la ejecución del programa de cosecha, y como afecta estas decisiones de reprogramaciones en el abastecimiento de materia prima a la fábrica, ha suscitado el interés de investigadores que buscan establecer sistemas avanzados de decisiones en la logística de caña.

El presente trabajo mostrará la conceptualización de un modelo dinámico de simulación. La importancia de este modelo operacional radica en la posibilidad que brinda al administrador de la logística de cosecha de experimentar y medir el impacto de las decisiones en el proceso de abastecimiento a fábrica.

El modelo de simulación desarrollado en Promodel, imita la realidad de la cadena de abastecimiento, representando el desempeño de la operación y los percances o fallas en la programación que se desee simular, con un nivel de detalle en la información, que permitirá evaluar cada escenario propuesto por el administrador frente a la continuidad de la molienda y los niveles de inventario que se logran tener con la programación simulada. Este proyecto tiene aplicación en industrias similares, donde los tiempos de entrega, afectan la calidad de la materia prima y la continuidad del proceso de producción.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>4. OBJETIVOS .....</b>	<b>6</b>
<b>5. ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
<b>6. MARCO REFERENCIA .....</b>	<b>9</b>
6.1 DESCRIPCIÓN DE LA CADENA DE ABASTECIMIENTO .....	10
6.1.1. ACTIVIDADES.....	10
6.1.2. RECURSOS Y CONFIGURACIONES.....	12
6.1.3. ELEMENTOS CRÍTICOS DE EFICIENCIA.....	15
6.1.4. VARIABLES NO CONTROLABLES.....	18
6.1.5 INDICADORES.....	19
<b>7. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
7.1. LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTROS.....	21
7.2. DISPONIBILIDAD DE INVENTARIOS Y CONFIABILIDAD EN LA OPERACIÓN .	22
7.3. PLANEACIÓN DE LAS OPERACIONES DE ABASTECIMIENTO.....	25
7.3.1 CANTIDAD DE EQUIPOS CARGANDO EN CAMPO.....	27
7.3.2 CANTIDAD DE EQUIPOS EN ESPERA EN CAMPO.....	28
7.3.3 CANTIDAD DE EQUIPOS VACÍOS.....	28
7.4 CALIDAD Y TIEMPOS DE PERMANENCIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR .....	29
7.5. SIMULACIÓN DE PROCESOS .....	32
7.5.1 DEFINICIÓN .....	32
7.5.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.....	32
7.5.3. VENTAJAS.....	32
7.6. SIMULADORES COMERCIALES .....	33
<b>8. METODOLOGÍA.....</b>	<b>34</b>

8.1. IDENTIFICACIÓN DE INFORMACIÓN RELEVANTE PARA TOMA DE DECISIONES EN LA COORDINACIÓN LOGÍSTICA .....	35
8.1.1 ADMINISTRACIÓN DE INVENTARIOS: .....	35
8.1.2. CUMPLIMIENTO EN ABASTECIMIENTO .....	35
8.1.3 ADMINISTRACIÓN DE FLOTA .....	35
8.2. CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS CONDUCENTES A LA REPROGRAMACIÓN .....	35
8.2.1 CLIMA .....	36
8.2.2 FALTA DE CAÑA EN LOS FRENTE DE COSECHA .....	36
8.2.3 DAÑOS EN LA MAQUINARIA .....	37
8.2.4 BLOQUEOS DE VÍA .....	38
8.3. DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE DECISIÓN EN LA REPROGRAMACIÓN..	38
8.3.1 ALTERNATIVA ANTE COMPLICACIONES DE INVIERNO. ....	38
8.3.2 ALTERNATIVA ANTE FALTA DE CAÑA EN LOS FRENTE DE COSECHA. .	39
8.3.3 ALTERNATIVA ANTE DAÑOS EN LA MAQUINARIA. ....	39
8.4 PLAN METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DEL MODELO .....	39
8.4.1 FORMULACIÓN DE ESCENARIOS: .....	39
8.4.2 ESTABLECIMIENTO DE PREGUNTAS U OBJETIVOS DE LA SIMULACIÓN.	40
8.4.3 CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO .....	40
8.4.4 RECOLECCIÓN DE LOS DATOS .....	40
8.4.5 VERIFICACIÓN .....	40
8.4.6 VALIDACIÓN .....	40
8.4.7. CORRIDAS Y ANÁLISIS.....	40
<b>9. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>42</b>
9.1 LAS ENTIDADES .....	42
9.2 LOS ATRIBUTOS.....	44
9.2.1 VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO .....	44
9.2.2. VARIABLES DE SALIDAS.....	45
9.3 LAS RELACIONES .....	45
9.4 FASES DEL MODELO .....	48
9.4.1 FASE INICIALIZACIÓN.....	48

9.4.2 FASE DE DESARROLLO .....	48
9.4.3 FASE DE REUBICACIÓN.....	48
<b>10. DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>51</b>
10.1. SUPUESTOS DEL MODELO .....	55
10.2 INFORMACIÓN INICIAL .....	56
10.3 DESARROLLO DEL PLAN METODOLÓGICO DE EVALUACIÓN DEL MODELO	57
10.4 ESTRATEGIA DE REPROGRAMACIÓN .....	66
10.5 GUIA PARA EL USO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL .....	68
<b>11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>69</b>
<b>12. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>72</b>

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Cargue de vagones .....	11
Ilustración 2 Mesa de descargue .....	12
Ilustración 3 Alzadora de caña.....	13
Ilustración 4 Tractor .....	13
Ilustración 5 Tipo de vagones .....	14
Ilustración 6 Configuración de equipos de transporte .....	15
Ilustración 7 Sistema de colas en campo.....	15
Ilustración 8 Terreno con humedad .....	16
Ilustración 9 Entrada de caña por hora Marzo vs Abril 2012 .....	20
Ilustración 10 Esquema de entradas y salidas del proceso de corte de caña.....	25
Ilustración 11 Esquema de entradas y salidas del proceso de transporte .....	26
Ilustración 12 Distribución porcentual de tiempos de transporte.....	30
Ilustración 14 Diagrama Entidad-Relación en la cadena de abastecimiento .....	47
Ilustración 16 Esquema de simulación Promodel .....	52
Ilustración 17 Simulación de la cadena de abastecimiento en Promodel .....	53

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Entidades y variables del proceso.....	36
Tabla 2 Datos escenario 1.....	58
Tabla 3 Datos escenario 2.....	59
Tabla 4 Datos escenario 3.....	60
Tabla 5 Datos escenario 4.....	61
Tabla 6 Comparación de resultados de los escenarios simulados.....	65
Tabla 7 Datos de resultado reprogramación.....	67

# 1. INTRODUCCION

El abastecimiento de caña a fábrica requiere de una logística sincronizada que permita no solo garantizar unos tiempos de entrega oportunos para evitar paradas de molienda, si no también asegurar la calidad de la materia prima, puesto que esta pierde contenido de sacarosa una vez es quemada y cortada en el campo. Esta eficiencia de calidad y tiempo de entrega, es medida a través del indicador tiempo de permanencia, el cual mide la duración del tiempo de entrada de la caña a fábrica desde el momento en que se quema y corta en el campo. Dependiendo de la modalidad de corte, los tiempos de entrega a la fábrica deben oscilar entre 20 y 35 horas.

En estudios realizados por Cenicaña en la variedad CC 85-92 se demostró que las pérdidas de sacarosa (en sacarosa % caña) en el campo, oscilaron entre 0,07 % y 0,14% por hora para la caña entera quemada y sin quemar.

Para cumplir con el objetivo de entregar la materia prima a la fábrica, se organizan unos recursos (personal y maquinaria) en unos frentes de aprovisionamiento, ubicados geográficamente, alrededor del ingenio, los cuales deben trabajar coordinadamente, primero para asegurar el rápido aprovisionamiento y segundo, la eficiencia en costos de llevar la caña con el menor costo de corte, alce y transporte.

Una parada de los molinos no programada por falta de caña no solo afecta la producción de quintales producidos por hora, si no también costos de energía en fábrica, pérdida de sacarosa de la caña cortada en campo e ineficiencia en los equipos de transporte de caña.

La cadena de abastecimiento debe tener un nivel de respuesta apropiado en términos de prontitud en la entrega, sujeta a todos los percances o fallas de programación que se puedan generar.

La programación de la logística diaria de cosecha debe dar cumplimiento a la planeación de los cultivos de caña (edad y maduración) y los programas de fábrica en cuanto a cuotas de producciones de quintales y energía, de ahí el replanteamiento de actividades y asignaciones ante imprevistos que se pueden presentar en la operación diaria. Para esto al ingenio le compete tener una herramienta de soporte que represente la dinámica de propuestas de reprogramación que plantee el coordinador logístico. Este modelo debe recrear las operaciones de la cadena y permitir estimar las tasas de abastecimiento durante el resto del día. Representar dicha dinámica en un contexto complejo de interrelaciones de recursos y espacios, demanda un modelo de simulación.

## **2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

La tecnología que se utiliza para administrar toda la logística de cosecha no permite visualizar o prever los riesgos de desabastecimiento a la fábrica y contextualizar la dinámica del sistema de acuerdo con múltiples contingencias que pueden ocurrir de forma concurrente durante el día. Estos escenarios son complejos para la persona responsable que coordina la logística puesto que no alcanza a visualizar de forma holística como impactarían los eventos presentes o futuros en su proceso, recurriendo a decisiones empíricas que muchas veces no son las mejores acorde a cada causa y terminan ocasionando paradas de fábrica, e ineficiencia en los equipos de alce y transporte de la caña.

El programa original se construye de acuerdo con las rutas preseleccionadas de recolección de materia prima (edad y maduración de la caña), caña amanecida (inventario final) y cuotas de abastecimiento de acuerdo con la capacidad instalada de cada frente (nodo). Sin embargo la ejecución es flexible debido a las diversas situaciones que alteran el cumplimiento, tales como: problemas de la maquinaria, reducciones de las tasas de entrega del campo hacia la fábrica por efectos del clima, eventuales bloqueos de vías, paros de molienda no programados. Por lo tanto, deben existir herramientas computacionales que ayuden a tomar la mejor decisión de acuerdo con cada contingencia, con el fin de garantizar el abastecimiento continuo a la fábrica.

Actualmente los administradores de la logística, usan proyecciones de suministro en formulación realizadas en Excel, basados en tasas, capacidades y tiempos estimados de actividades, pero en esas proyecciones no hay factores de demora o espera que se generan en diversas colas de la cadena. Tanto la caña como los vehículos deben hacer tiempos de espera en sus flujos respectivos y solo la simulación puede dar registro de su impacto.

### 3. JUSTIFICACIÓN

En el año 2012, el tiempo perdido de fábrica por causa de desabastecimiento de materia prima fue del 12%, la meta es estar por debajo del 2%. Cada hora de paro de molienda genera altos costos por consumo de energía y material en proceso, que oscilan entre U\$30.000 y U\$50.000. Adicionalmente, la calidad de la materia prima depende del tiempo de exposición al medio ambiente una vez es quemada o cortada, debido a que se pierde sacarosa por cada hora que se demore en ser molida. Por lo tanto, el tiempo entre la cosecha y molienda debe ser mínima, para lograr la máxima recuperación de azúcar.

Debido a la complejidad de este proceso, los tiempos de entrega deben ser eficientes con el fin de garantizar una cantidad de caña a los molinos por cada hora y evitar el deterioro de la misma una vez es cortada en campo. Luego el modelo de abastecimiento de materia prima del campo hacia la fábrica debe ser justo a tiempo, con unos inventarios de materia prima adecuados tanto en patios de pre-molienda como en campo.

Los inventarios en patio de pre-molienda son utilizados para absorber los problemas de la logística de transporte y alce. Los inventarios de campo se utilizan para cubrir los tiempos del corte de la caña.

Por buenas prácticas de calidad no se recomienda almacenar la caña de azúcar en los patios de pre-molienda en el suelo sino en vagones debido a que el deterioro de la calidad es menor. Sin embargo, se requiere hacer una alta inversión en estos equipos, cuyo precio de compra oscila entre los U\$ 950.000 y U\$ 100.000.

En estudios realizados por Cenicaña en el año 2001 por el Dr. Jesús Larrohondo se demostró que las pérdidas de sacarosa en 24 horas de arrume en el suelo del patio de pre-molienda fluctúan entre 7.5 % y 11.4%, y equivalen a 72 horas de almacenamiento en los vagones o equipos de transporte (7,7% a 12%) o a 120

horas de apilamiento en el campo (6,3% a 14,3% de pérdidas). Es decir que las pérdidas de sacarosa de la caña durante un día de permanencia en el suelo del patio son equivalentes a las ocurridas durante cinco días de permanencia en el campo; por tanto, es más conveniente dejar la caña cortada en campo que en grandes arrumes en el suelo de los patios de caña.

Con la ejecución de este proyecto se espera diseñar un modelo operacional cercano a las condiciones reales que permita tomar decisiones, medir su impacto y así reducir o mitigar los tiempos perdidos por falta de caña. La simulación debe reportar cuanto tiempo en promedio tarda la caña en llegar a molienda y que niveles de inventario se logran tener con la programación simulada.

El modelo de simulación no tiene como alcance, controlar los tiempos de permanencia de la caña en el campo y patio. Esta es una labor del administrador de la logística, quien debe coordinar que la programación de corte y transporte no excedan los máximos inventarios permitidos en la cadena de abastecimiento. El enfoque principal del proyecto será evitar el desabastecimiento de materia prima a la fábrica y no la de controlar los inventarios, simplemente describe el desempeño del programa que se desee simular.

En conclusión, la realidad logística de la cadena de la caña de azúcar demanda herramientas computacionales que representen la dinámica del sistema en el horizonte día, que le permita al usuario responsable de la coordinación, soportar decisiones pertinentes en la asignación y utilización de equipos de trabajo y maquinaria en los diversos puntos potenciales de cosecha.

En este contexto, y de manera previa se requiere analizar y definir un modelo conceptual que especifique entradas, salidas e interrelaciones requeridas en la construcción del modelo computacional, pensado en el marco de la técnica de simulación. Igualmente, se explora la construcción y uso de un modelo primario que simule el estado presente o actual de ejecución del programa logístico.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo general**

- Diseñar una herramienta de apoyo para la toma de decisiones ante contingencias ocurridas en la ejecución de la logística de cosecha de caña de azúcar

### **4.2 Objetivos específicos**

- Identificación y caracterización de situaciones críticas que alteren el programa diario de operaciones en la cadena de abastecimiento de la caña.
- Definición y conceptualización de un modelo dinámico con los requerimientos de entrada de información, interrelacionando las variables endógenas y exógenas del sistema frente a las estadísticas, estructura y operación de un simulador.
- Construcción y validación del modelo computacional.

## 5. ANTECEDENTES

En el año 2007 el centro de investigación de la caña CENICAÑA conformó un grupo investigador para trabajar en proyecto de mejoramiento de la cosecha. Este proyecto se denominó CATE, el cual investigó las actividades del corte, alce, transporte y entrega. Los avances y resultados del estudio se detallaron en la publicación anual de Cenicaña, 2006. Cali 108 pág.

En este trabajo se definieron y evaluaron los indicadores logísticos, se realizaron estudios de tiempos y movimientos en los patios de caña de tres ingenios, se desarrolló un modelo de simulación para el sistema de alce, transporte y recepción aplicando el software Crystal Ball, y se realizó el análisis y operación de las tractomulas en distancias cortas.

Las conclusiones son las siguientes:

- 1- El tiempo improductivo de los equipos de transporte (tractores y tractomulas) en los patios de caña fue de 60% en promedio
- 2- La velocidad de descargue de los vagones está influenciada por la capacidad de molienda del ingenio y por el número de mesas de descargue; a su vez los tiempos de descargue tienen un impacto directo sobre los tiempos de ciclo y sobre el requerimiento de equipos de transporte.
- 3- Las evaluaciones preliminares indican que el uso de tracto mulas en distancias cortas (aproximadamente 6 km) permiten aumentar hasta en 34% el número de viajes/día por equipo, incrementar en 17% las toneladas/día promedio por equipo y por tanto disminuir el número de vehículos requeridos por día.
- 4- El control de la flota durante el alce y el transporte y la correcta asignación de los equipos de transporte a las mesas de descargue son factores trascendentales para la optimización de recursos (tiempo, maquinaria y equipos) y para el suministro oportuno de caña a la fabrica

- 5- En un ingenio con molienda de 9000 t/día es posible recuperar aproximadamente 113 toneladas anuales de sacarosa si se disminuye en 10 minutos los tiempos de ciclo promedio desde el alce hasta la molienda. La estimación se basa en la ecuación de pérdidas de sacarosa entre cosecha y molienda definida por Cenicaña (Larrahondo J.E. 2002)
- 6- Los resultados obtenidos mediante simulación muestran que con una coordinación apropiada de las labores de alce, transporte y descargue hay un potencial de disminución hasta de 15% en el número de equipos de transporte empleados por día. **La disminución en el número de equipos es particular de cada ingenio y depende de la variabilidad de sus actividades**

En la publicación carta trimestral. Cenicaña, 2007. V29, no. 4. P.20-22 se presenta el estudio “simulación de la logística de abastecimiento utilizando el software Crystal Ball”.

El autor desarrolló un modelo de simulación para la logística de cosecha, con el objetivo de analizar el comportamiento de las variables del sistema, desde el campo hasta la fábrica, a partir de la configuración de recursos y la evaluación de estrategias operacionales, aplicando simulación estocástica con la ayuda del software Crystal Ball.

Sin embargo este software presenta limitaciones en dinámicas complejas cuando hay demasiados recursos y entidades interactuando (como es el caso de la cadena de abastecimiento de caña de azúcar), por ello un simulador más operativo como Promodel si permite llegar a un mayor detalle de la operación de suministro.

## 6. MARCO REFERENCIA

El modelo de simulación no está hecho a la medida de un ingenio en particular. Se estudió el Ingenio La Cabaña como un referente, puesto su esquema de operación en corte, alce, transporte y entrega de la caña, es similar a la mayoría de Ingenios del sector azucarero en Colombia y por ello, se dan cifras y se describen operaciones, restricciones y tecnología.

Ingenio La cabaña es una empresa dedicada a la producción y comercialización de caña de azúcar. Tiene una capacidad anual de molienda de 1.700.000 toneladas de caña con una producción de 4.580.000 quintales de azúcar. De los cuales el 40% es destinado al mercado interno y el 60% al externo.

Está ubicada en Colombia en el departamento del Cauca. Fue creada hace 55 años por Moisés Seiner. Laboran 2714 personas de las cuales 1487 son empleos directos y 1227 indirectos.

Cuenta con un área sembrada en caña de 17.835 ha, de las cuales el 40% presenta excesos de humedad (entre 400 y 600 mm al año).

Para el año 2014 finalizará el proyecto de cogeneración de energía, donde se espera generar 12 KW, los cuales serán utilizados para abastecer los procesos fabriles y los excedentes venderlos a la red pública nacional. Adicionalmente, aumenta su capacidad de molienda diaria pasando de 6000 a 7000 toneladas. En el año 2017 se tiene proyectado iniciar con la construcción de la planta de destilería de alcohol carburante, convirtiéndose así en una empresa de vanguardia en la región.

El proceso de industrialización de azúcar está compuesto por cuatro macro procesos que de manera sistémica se integran formando la base de una cadena de valor. Estos son: producción campo, abastecimiento de caña, fabricación y comercialización.

## **6.1 DESCRIPCIÓN DE LA CADENA DE ABASTECIMIENTO**

### **6.1.1. ACTIVIDADES**

La cadena de abastecimiento se compone de las siguientes actividades: programación, corte, recolección, transporte y descargue de la caña.

#### **6.1.1.1 Programación**

Se realizan dos programaciones para el abastecimiento de caña: mensual y diaria

- a) Programación mensual: Contiene la cantidad de caña requerida para el abastecimiento de la fábrica, detalla las haciendas y suertes a cosechar de acuerdo a la edad de los cultivos y las semanas de maduración. A partir de esta programación se determina la cantidad personas (corteros), tractomulas, tractores y alzadoras.
- b) Programación diaria: Teniendo en cuenta el clima, los recursos disponibles, los inventarios de caña en patio y campo se construye el programa de corte, recolección y transporte.

#### **6.1.1.2 Corte de caña**

El proceso se inicia con la quema de la caña. Al siguiente día se envía el personal de corte de caña a cada una de las haciendas relacionadas en el programa diario para ejecutar la labor.

#### **6.1.1.3. Recolección de la caña**

El proceso de recolección se realiza con cuatro frentes (nodos) ubicados geográficamente dependiendo de la distancia donde se encuentre el cultivo. Cada frente cuenta con tractores y alzadoras para cargar los equipos de transporte.

En la ilustración 1 se representa el proceso de cargue de los vagones. Cuando la caña se encuentre acomodada en el suelo, los tractores proceden a enganchar cada vagón vacío y transportarlo dentro de la suerte, para iniciar el proceso de llenado con la alzadora. Una vez se complete la totalidad de la capacidad del vagón, el tractor lo lleva hasta el sitio donde se encuentra el cabezote de la tractomula para engancharlo.

Ilustración 1 Cargue de vagones



Fuente: Ingenio la Cabaña. 2013

#### **6.1.1.4 Transporte de caña**

La tractomula o tractor engancha los vagones cargados hasta completar la totalidad del tren y se dirige al ingenio. Al llegar debe pasar por la báscula, con el fin de conocer el peso de la caña transportada.

#### **6.1.1.5 Descargue de vagones**

El proceso inicia con la llegada del equipo cargado a patio, el coordinador indica la mesa por la que debe descargar, este se posiciona frente a la mesa y la grúa procede a levantar cada vagón, hasta terminar de vaciar todo el equipo. Tan pronto como termine el proceso de descarga, la tractomula vuelve al campo para ser cargado, y el ciclo comienza de nuevo.

Para el descargue de la caña el ingenio la cabaña tiene tres (3) mesas, como indica la ilustración 2, con una capacidad de molienda de 250 ton/hora.

Ilustración 2 Mesa de descargue



Fuente: Ingenio la Cabaña. 2013

### 6.1.2. RECURSOS Y CONFIGURACIONES

Para el proceso de cargue se cuenta con alzadoras de caña y tractores. Las alzadoras (ver ilustración 3) son equipos que permiten recoger la caña del suelo de forma continua a través de un sistema hidráulico que acciona la uña con la que se recoge la caña. El ingenio cuenta con 10 equipos de estos.

Ilustración 3 Alzadora de caña



Fuente: Ingenio la Cabaña. 2013

Los tractores de cadeneo en total son 15 con potencias de entre 200 y 210 HP articulados (ver ilustración 4).

Ilustración 4 Tractor



Fuente: Ingenio la Cabaña. 2013

Para el transporte de la caña el ingenio cuenta con un total de 144 vagones para la operación. Cada uno de estos presenta capacidades distintas:

- a) HD 8000 volteo alto: Vagón denominado “cauca seco”, más liviano y de menor capacidad 8.0 toneladas en verano y en invierno de 6 ton. De este tipo se cuenta con un total de 40 vagones
- b) HD12000 Milenio: Vagón denominado Milenio tiene 2 ejes, llantas de alta flotación, capacidad de carga de 12 toneladas en verano y en invierno de 10 toneladas. De este tipo se cuenta con un total de 40 vagones

- c) HD 20000 Súper milenio: Vagón denominado supermilenio tiene 3 ejes, llantas de alta flotación, capacidad de carga de 18 ton en verano y en invierno de 14 ton. De este tipo se cuenta con un total de 64 vagones

En la ilustración 5 se discriminan los vagones mencionados.

#### Ilustración 5 Tipo de vagones



Vagón HD 8000



Vagón HD 12000



Vagón HD 20000

Fuente: Ingenio la Cabaña. 2013

El transporte de caña se realiza con tracto mulas y tractores. La primera se utiliza para recolectar la caña que se encuentra a largas distancias y el segundo para distancias no mayores a 5 km del ingenio. La flota de transporte está compuesta por 19 tractomulas y 4 tractores (280 HP).

Estos equipos pueden transportar entre 60 y 70 toneladas por viaje dependiendo del tipo y la cantidad de vagones. El máximo número de vagones autorizados por legislación de tránsito en vías nacionales, es de cinco (5) vagones alcanzando una longitud de 53.7 metros y un tonelaje por tren de 42.5 a 55 toneladas. Esta

modalidad de transporte se emplea en un perímetro mayor a 15 kilómetros de la fábrica. En vías internas privadas se remolca un sexto vagón, incrementando en un 20% los tonelajes transportados por tren.

Ilustración 6 Configuración de equipos de transporte

Configuración	Vagón	Diagrama
C3-S1, R2, R2, R2, R2	HD12.000	
C3-S2, R3, R3, R3	HD17.000	
C3-S2, R4	HD30.000	

Fuente: Asocaña. 2011

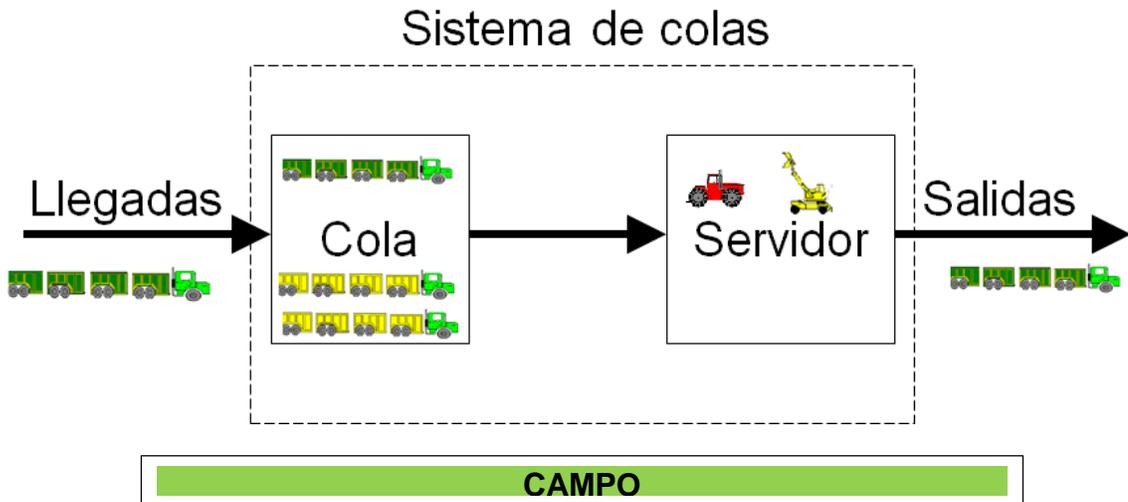
En la ilustración 6 se detallan las configuraciones autorizadas. Las letras R2, R3 y R4 representan los vagones que transporta un cabezote (C3). La letra S1, S2 representan los semiremolques.

### 6.1.3. ELEMENTOS CRÍTICOS DE EFICIENCIA

El cargue en el campo se puede asimilar a un sistema de colas, donde las alzadoras y tractores son el servidor y la cola son las tracto mulas que llegan al campo.

Por lo tanto, cuando se habla de eficiencia del cargue, se habla de la capacidad de entrega por hora del servidor. Si esta es menor a la tasa de llegada se presenta colas de los equipos de transporte. En caso contrario se presenta tiempos perdidos por falta de vagón. Por lo tanto, el coordinador logístico debe estar en la capacidad de evitar estos tiempos de espera considerables para el equipo de transporte dado la oportunidad en otros frentes y además, evitar la carencia de vagones para la actividad de alce.

Ilustración 7 Sistema de colas en campo



Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

La estrategia fundamental para reducir las esperas de los equipos de transporte en el campo, consiste en sincronizar las llegadas a los frentes, evitando que los equipos de transporte que se envíen no superen la capacidad de respuesta del servidor. De lo contrario se incrementará la longitud de la cola.

La eficiencia del cargue (servidor) depende de las condiciones del terreno, el cual determinara la cantidad de equipos a utilizar.

En épocas de verano los frentes trabajan con dos alzadoras y tres tractores. En épocas de invierno se mantiene el número de alzadoras y se aumenta la necesidad de tractores por cada frente, debido a que la humedad dentro de la suerte (ver ilustración 8) disminuye notablemente el rendimiento de los equipos, puesto que no pueden transitar fácilmente y es necesario empujarlos por otros equipos de mayor tracción. Esto trae como consecuencia, demoras en la entrega de la materia prima a la fábrica y una disminución en la cantidad de caña transportada.

Ilustración 8 Terreno con humedad



Fuente: Ingenio la Cabaña. 2013

Cuando el terreno está seco, los equipos pueden fluir fácilmente, aumentando la capacidad de entrega, al poder cargar los equipos en el menor tiempo posible y con un mejor aprovechamiento de la capacidad máxima del vagón. Por lo tanto los administradores deben aprovechar esta condición para mejorar la eficiencia del cargue.

A continuación se detallan algunas consideraciones que ayudarían a mejorar la eficiencia de la cadena de abastecimiento.

- La optimización del cargue depende del flujo constante de los vagones para la alzadora.
- La eficiencia del alce la determinan los tractores. Los cuales deben ser ágiles para enganchar, transportar y desenganchar los vagones haciendo ciclos continuos.
- Entre mayor sea el número de vagones halados dentro de la suerte, el tiempo de servicio será menor, reduciendo las esperas de las tractomulas.
- Equipos de transporte con cinco o seis vagones por viaje.
- Monitoreo de los pesos por vagón y viaje, con el fin de retroalimentar a los frentes de cosecha.
- Los trenes de avance en campo y patio, agiliza los procesos de cargue y descargue de la caña, logrando una reducción en la necesidad de camiones.

- Mejorar la oportunidad en el soporte de mantenimiento de los equipos en campo ayuda a mantener la disponibilidad de los equipos.
- Contar con maquinaria disponible para realizar los cambios oportunos, cuando los daños en los equipos titulares son graves, ayudan a reducir problemas de abastecimiento.
- Priorizar los descargues de los equipos teniendo en cuenta la vejez de la caña, la distancia de la hacienda y las tasas de entrega.
- Control de colas de equipos de transporte en el campo dejando equipos disponibles en patio o reasignándolo a otro frente si se requiere.
- Realizar cambios de turno en horarios distintos para cada frente.
- Herramientas tecnológicas de monitoreo de flota de transporte y equipos de alce que permitan identificar eficiencias, tiempos de varadas, posicionamiento geográfico.
- Coordinación de los traslados de hacienda en los frentes. Se debe evitar que los frentes se trasladen simultáneamente. Esto genera problemas de abastecimiento que pueden generar paradas de molienda.
- Planeación de los diseños de campo en coordinación con agronomía. El diseño debe considerar la dirección y longitud de los surcos, unas zonas amplias de enganche, adecuado tamaño de los callejones. Esto permitirá una logística de cargue adecuada para maximizar la eficiencia.

#### **6.1.4. VARIABLES NO CONTROLABLES**

Durante la ejecución del programa diario se presentan diversos eventos que no son controlados por el administrador de la logística, por lo cual se toman decisiones de reprogramación. Estos eventos son: daños en la maquinaria, condiciones del clima, bloqueos de vía, paros de fábrica por daños en los molinos. En varias situaciones

estos han ocurrido de forma simultáneamente durante lapsos de tiempo prolongado, ocasionando desabastecimiento de caña a la fábrica.

### **6.1.5 INDICADORES**

Los indicadores que se utilizaron para diagnosticar la productividad son ton/equipo/día, y entrada de caña por hora.

#### **6.1.5.1 Ton/equipo/día:**

Mide la cantidad de caña transportada por cada equipo durante el día. La meta para este indicador es de 320 ton/equipo/día que corresponde a realizar en promedio 5 viajes con una media de 65 toneladas por cada viaje.

En el año 2011 el promedio fue de 204 ton/equipo/día, una variación del 35% por debajo de la meta. A una distancia promedio de 24 km y con un peso por viaje de 60 toneladas. En el año 2012 la productividad fue de 240 una variación de 20% por debajo de la meta.

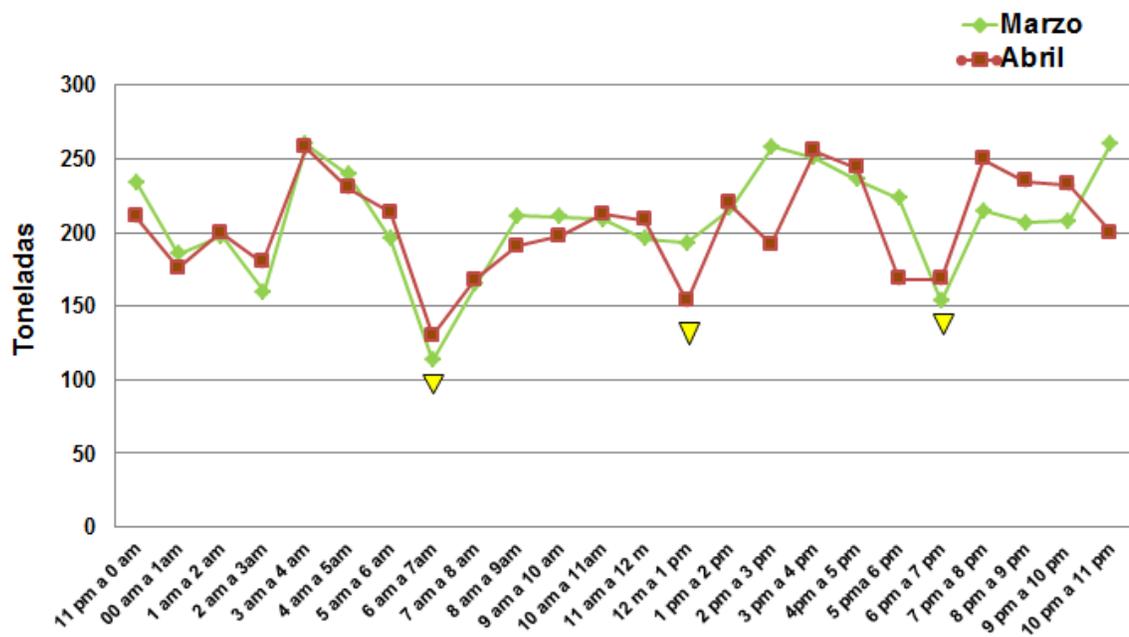
La variable Ton/equipo/día depende del número de equipos utilizados para transportar la caña y presenta una relación inversa. Es decir entre mayor sea el número de equipos utilizados menor será el valor.

#### **6.1.5.2 Entrada de caña vs molienda por hora**

Mide la cantidad de caña ingresada por cada hora de molienda. En la ilustración 9 se compara la entrada de caña por cada hora de molienda de dos meses. En estas se observa una alta variación en el proceso. Los picos bajos generan escases y los picos altos excesos de inventarios en patio.

Estas fluctuaciones se presentan en forma de oleada, y puede ser ocasionadas por: cambios de turno, baja de eficiencia en el cargue, problemas en transporte, maquinaria varada.

Ilustración 9 Entrada de caña por hora Marzo vs Abril 2012



Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

## 7. MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo de este proyecto se han aplicado una serie de conceptos, que sirven de fundamento para el cumplimiento de los objetivos. A continuación se describen:

- Logística y cadena de suministros
- Disponibilidad de inventarios y confiabilidad de operación
- Planeación de las operaciones de abastecimiento
- Calidad y Tiempo de permanencia de la caña de azúcar
- Simulación de procesos
- Software de simulación

### 7.1. LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTROS

“La logística y cadena de suministros es un conjunto de actividades funcionales (transporte, control de inventarios, etc.) que se repiten muchas veces a lo largo del canal de flujo, mediante las cuales la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor para el consumidor”<sup>1</sup>

La gestión logística de sistemas de abastecimiento en procesos continuos, como es el caso de la producción de azúcar y alcohol, representa un reto cuando se trata de mejorar y mantener eficiencias integrales a partir de la coordinación entre las actividades agrícolas y los procesos industriales (Hahn; Ribeiro, 1999).

Según esta definición, podríamos decir que el abastecimiento de caña es un flujo continuo de materia prima, la cual debe ser cortada, alzada y transportada desde campo hasta la fábrica en el menor tiempo posible, con un adecuado manejo de los

---

<sup>1</sup> BALLOU RONALD H. Logística. administración de la cadena de suministros. Quinta edición. Pearson educación, Mexico,2004 (BALLOU, 2004)

inventarios de caña en campo y patios de pre-molienda, con el fin de garantizar la calidad de la caña en cuanto a la máxima extracción de sacarosa.

Para analizar esta cadena de abastecimiento en particular, se debe realizar de forma integral apoyado en una visión holística. Cuando se divide el proceso en sub-sistemas para mejorar cada una de ellas de manera aislada con metas propias e individuales, puede ocasionar un incremento en la capacidad de cada sub-sistema, en el que el eslabón siguiente posiblemente no puede responder ante este nuevo flujo, convirtiéndolo en un punto débil o cuello de botella (restricción). Por ejemplo, si aumentamos las capacidades de los nodos haciendo que estos entreguen una mayor cantidad por día (1600 a 2000 toneladas), puede ocasionar un exceso de inventario en patio y campo, debido a que la capacidad de molienda se mantiene constante. Por lo tanto el proceso de abastecimiento se debe establecer de acuerdo al balance y sincronización con la capacidad de molienda (restricción).

## **7.2. DISPONIBILIDAD DE INVENTARIOS Y CONFIABILIDAD EN LA OPERACIÓN**

“El principal objetivo del manejo de inventarios es asegurar que el producto esté disponible en el momento y en las cantidades deseadas. Normalmente, esto se basa en la probabilidad de la capacidad de cumplimiento a partir del stock actual. A esta probabilidad, o tasa de surtimiento del artículo, nos referimos como el nivel de servicio”<sup>2</sup>

Cuanto más lentos y menos confiable sean los servicios que se seleccionen, mas inventario aparecerá en el canal<sup>3</sup>.

Esto sucede cuando la disponibilidad de los equipos de transporte no es satisfactoria (por debajo del 70%), ocasionando una reducción en la tasa de entrega que estaría por debajo a la tasa de producción o rata de molienda.

---

<sup>2</sup> (BALLOU, 2004)

<sup>3</sup> (BALLOU, 2004)

Los sistemas de producción que operan con poco o ningún inventario de materias primas son muy vulnerables a los retrasos y paros por la variabilidad en el desempeño del transporte<sup>4</sup>

La variabilidad en las entregas está sujeta a las contingencias que puedan ocurrir en el transcurso del día, lo cual ocasionan reprogramaciones. Esta es la flexibilidad que debe tener una cadena de abastecimiento, la cual está expuesta a eventos externos no controlables. Para mitigarlos, se requieren estrategias adecuadas que permitan disminuir los riesgos.

Garantizar un rango de inventarios mínimos y máximos de caña disponible tanto en campo como en patio, es una opción viable, puesto que permite absorber los problemas en toda la cadena. Otras estrategias que podemos implementar son: aumentar la disponibilidad de equipos, sincronizar los tiempos logísticos de entrega con los tiempos de molienda y aplicar modelos de simulación para la toma de decisiones.

La disponibilidad de los equipos es parte fundamental en la operación. La podemos definir como la cantidad de tiempo hábil que tiene un equipo para trabajar en un horizonte de tiempo sin ocurrencia de fallas. Cuando la disponibilidad es baja, la confiabilidad de la operación disminuye.

La cadena de abastecimiento requiere de un soporte de mantenimiento eficiente que le permita cumplir con las entregas planeadas.

Un sistema de mantenimiento eficiente implica actividades dirigidas a conservar la vida útil de los equipos en excelentes condiciones de operación para evitar las fallas imprevistas<sup>5</sup>.

Esto requiere de una política al interior de la organización que permita emigrar de la ejecución de las actividades correctivas a reparaciones programadas. Cuando

---

<sup>4</sup> (BALLOU, 2004)

<sup>5</sup> PALENCIA, Oliverio. La cultura de confiabilidad operacional En: Congreso internacional de mantenimiento, VI, Universidad pedagógica de Colombia. P 2.

hablamos de políticas nos referimos a establecer programas de reposición de equipos basados en la disponibilidad, antigüedad y costo de mantenimiento. Acompañado del aseguramiento de calidad en las reparaciones, una logística de suministros de repuestos a tiempo, rutinas de mantenimiento periódicas de acuerdo a recomendaciones del fabricante, tecnologías de diagnóstico de fallas tempranas, decisiones basadas en análisis de fallas, información histórica de las reparaciones, seguimiento a las condiciones de operación, logística de atención oportuna en campo y entrenamiento al personal técnico y operativo.

Cuando el soporte de mantenimiento falla y no garantiza una buena disponibilidad, hace que la operación no sea confiable, incrementando así los niveles de inventario para evitar desabastecimiento.

La sincronización de los tiempos de entrega con la molienda depende de la “rata de molienda”, a partir de aquí se calcula la cantidad de tracto mulas, tractores cadeneros, el número y capacidad de los frentes.

En un estudio realizado por el autor en el Ingenio la cabaña en el año 2011, se demostró que la eficiencia de la operación de cadeneo depende de:

- a) El número de vagones a trabajar dentro de la suerte
- b) El número de vagones enganchados en las tracto mulas
- c) El número de tracto mulas en cola de espera para ser cargadas
- d) Rata de molienda por hora
- e) Condiciones de terreno
- f) Distancia del sitio de enganche de vagones a la tracto mula

Todas estas variables más la coordinación de los programa de corte y transporte son responsabilidad del administrador de la logística quien apoyado en herramientas de Excel, utiliza tasas predeterminadas de eficiencia, que proyectan

acumulaciones de inventarios en las suertes y patios de pre-molienda. Adicional de manera estática calcula los requerimientos de equipos. Sin embargo, el administrador no cuenta con una herramienta dinámica que proyecte la interacción y utilización de los equipos, disputándose espacios (patio) y cargues (frente).

### **7.3. PLANEACIÓN DE LAS OPERACIONES DE ABASTECIMIENTO**

La planeación del abastecimiento debe realizarse de forma integral, teniendo en cuenta todas las variables que tienen incidencia directa sobre el proceso, con el fin de establecer programas que permitan un buen uso de los recursos, un cumplimiento de las cantidades, tiempos de entrega y la calidad esperada. En procesos agrícolas como el de la caña de azúcar, donde el tiempo es un factor determinante de la calidad, es importante una sincronización de los inventarios de materia prima con los procesos de corte, recolección y transporte.

El administrador de la logística o planeador de la cadena de abastecimiento debe tener toda la capacidad analítica y la experiencia para coordinar de forma adecuada, la ejecución de los programas, a fin de evitar excesos de inventarios, principalmente en patios.

Un programa de corte debe planearse teniendo en cuenta: la modalidad, es decir si es quemada o en verde, la productividad de la caña (TCH), la edad, la maduración, los saldos iniciales y finales de caña, la cantidad de personas necesarias para ejecutar la labor. Esta última depende de la eficiencia hombre día en las diferentes modalidades. En la ilustración 10 se presenta el esquema del programa de corte, donde se detallan las entradas y salidas del proceso.

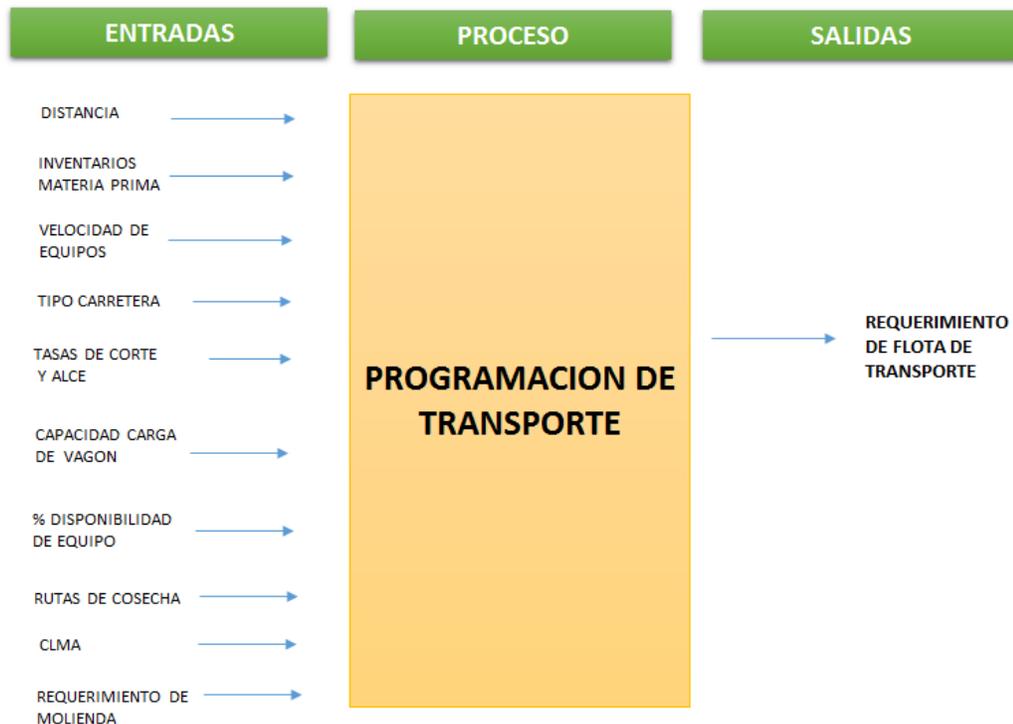
Ilustración 10 Esquema de entradas y salidas del proceso de corte de caña



Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

Un programa de transporte debe realizarse teniendo en cuenta: la cantidad de caña disponible en cada frente, la distancia, la velocidad según el tipo de carretera, los tiempos promedios de cargue en los frentes, capacidad de cargue de los vagones según el clima, el porcentaje de disponibilidad de los equipos. Esta formulación de variables da como resultado el número de equipos por frente y el total de la flota para la ejecución del programa diario. Cuando se excede en el número de equipos con respecto al requerido, genera una saturación en el sistema, ocasionando una menor productividad en términos de viajes/día y unos largos tiempos de espera en patios y campo. En la ilustración 12 se detalla el esquema de programación de transporte, con las entradas de información y las salidas del proceso.

Ilustración 11 Esquema de entradas y salidas del proceso de transporte



Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

La asignación de tractomulas debe ejecutarse de acuerdo con los siguientes requerimientos:

- Equipos cargando en campo.
- Equipos en espera en campo.
- Equipos en traslado vacíos.

### 7.3.1 CANTIDAD DE EQUIPOS CARGANDO EN CAMPO

Debe ser mínimo uno (1) en cada frente. Si es igual a cero se presentan un efecto denominado “bloqueo”, que en la ejecución de un modelo de simulación hace que el material no puede seguir avanzando y los equipos (alzadora y tractores) queden estáticos.

### **7.3.2 CANTIDAD DE EQUIPOS EN ESPERA EN CAMPO.**

La cantidad de tractomulas en espera para ser cargadas, está relacionada con la optimización de tiempos de los equipos de alce. Las alzadoras deben tener el máximo aprovechamiento durante el día, por lo tanto los tiempos de espera por vagones no deben superar los 15 minutos.

Un frente de cosecha debe tener un equipo cargando y otro en espera, tener dos o más tractomulas esperando puede incurrir en tiempos muertos de los equipos. Un criterio para determinar el largo de la cola en el campo, es la diferencia de tiempos entre el cargue y el trayecto vacío del ingenio hacia el frente de cosecha. El resultado no debe ser inferior a 15 minutos, esto para evitar tiempo de espera en las alzadoras.

### **7.3.3 CANTIDAD DE EQUIPOS VACÍOS.**

El despacho de equipos hacia un frente depende de la disponibilidad de inventarios, el número de equipos cargando y en espera de cargue en cada frente, la cantidad de equipos enviados vacíos previamente hacia el mismo sitio y si no hay bloqueos de vías o traslados del frente.

La lógica de la secuencia de envío consiste en estimar cuando finaliza de cargar uno, tal que para ese momento ya debe haber otro vehículo listo para seguir. En caso contrario el equipo debe permanecer disponible en el patio.

Una buena gestión logística garantiza unos rangos de inventarios mínimos y máximos en el campo, en tránsito y en el patio. Además de reducir los tiempos de espera de las tracto mulas.

Uno de los mayores problemas en la coordinación de transporte en los ingenios azucareros de Colombia, es que los despachos de los equipos de transporte del ingenio hacia los frentes de cosecha, se realizan sin herramientas computacionales,

ejecutándose de forma empírica. Es muy frecuente encontrar en frentes de cosecha, más de dos equipos en cola en espera de cargue. El administrador debe realizar un balance en todos los frentes de cosecha y distribuir la flota de acuerdo con los criterios antes mencionados para evitar escases o excesos de inventario.

#### **7.4 CALIDAD Y TIEMPOS DE PERMANENCIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

El tiempo de permanencia de la caña de azúcar, es un indicador de *lead time* de la sacarosa, que mide el tiempo desde que la caña es cosechada hasta que es molida.

“El deterioro de la caña y las pérdidas de sacarosa inherentes a los procesos entre cosecha y fabrica, empiezan inmediatamente después del corte. La tasa de deterioro depende de las condiciones ambientales, la variedad de caña y los sistemas de cosecha. Además, se ha establecido que la materia extraña, como las hojas o los residuos de poscosecha, contribuyen a incrementar las pérdidas de sacarosa.”<sup>6</sup>

“Las mayores pérdidas de sacarosa ocurren en los patios de fábrica. Esta es la conclusión después de diferentes ensayos realizados con caña entera, en los cuales se compararon los efectos del tiempo de permanencia de la caña cosechada sobre la concentración de sacarosa, en tres lugares: el campo, los vagones o equipos de transporte y los patios de caña. En solo 24 horas de apilamiento en patios la caña entera perdió hasta 18% de sacarosa. Este valor fue muy superior al estimado en la caña apilada en el campo o en los vagones de transporte, incluso después de 136 horas de permanencia en estos sitios.”<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> LARRAHONDO, J.; CASTILLO, S.; ISAACS, C.; CASTILLO, M.; GALVIS, M.; PERALTA, Y. Calidad de la caña y las pérdidas de sacarosa después del corte bajo los sistemas de cosecha manual y mecanizada. En: Congreso colombiano de la Asociación colombiana de técnicos de la Caña de Azúcar, VIII, Cali, Colombia, 16 al 18 de septiembre de 2009. Memorias, Cali, TECNICAÑA, 2009. P 484.

<sup>7</sup> LARRAHONDO, Jesús. Perdidas de sacarosa por arrumes de caña poscosecha. **En:** carta trimestral 1 de 1998. p 3-4.

La estadía de los equipos en patio ocupa el tiempo más alto dentro del ciclo de abastecimiento, según estudios realizados en el Ingenio La Cabaña en el año 2011, las esperas en patio de los equipos para ser descargados oscila entre 25 y 30% del ciclo total. En la ilustración 13 se detalla la distribución porcentual de las etapas del ciclo del transporte.

Ilustración 12 Distribución porcentual de tiempos de transporte



Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

El tiempo de ciclo incluye el viaje vacío del ingenio al campo, los tiempos de espera y cargue de la caña en los frentes de cosecha, el viaje cargado hasta el ingenio, la espera y el descargue en patio, este proceso tiene una duración promedio de 5,7 horas por ciclo, de las cuales el 45% son esperas.

La administración de la logística debe controlar las esperas en el proceso, a través de una buena gestión en los programas de transporte, la asignación de rutas y una eficiente gestión en los patios.

Iannoni y Morabito (2006) demostraron un 13,5% de reducción de los tiempos de espera de los vehículos cuando simulaban cambios estratégicos en la regla de despacho de los vehículos en la industria azucarera de Brasil.

En este estudio se plantearon tres escenarios distintos y lo compararon con el modelo original. El escenario 1, presentó mejoras significativas en cuanto a tiempos de espera en patios. Este consistió en liberar los remolques cargados en la zona de recepción (patio de caña) y tomar unos vacíos. El propósito es proporcionar una mejor circulación y la distribución de la materia prima entre las líneas de descarga y alimentación uniforme de los molinos.

En Colombia esta metodología es conocida como sistema de trenes de avance. Consiste en tener un grupo de vagones vacíos en patio para que una vez llegue cargada la tractomula del campo, desenganche el tren y enganche los vacíos. Esto reduce los tiempos de espera en patio de caña. También es aplicable en los frentes de cosecha en campo, pero en este caso, los vagones deben estar cargados. Esto con el fin de reducir los tiempos de cargue en campo. La forma de operar es similar, desengancha los vacíos y engancha los cargados.

Esta metodología genera un flujo de vagones moviéndose en toda la cadena de abastecimiento, reduciendo las esperas, los tiempos de entrega y el número de tractomulas.

Los escenarios 2 y 3 planteados por Iannoni y Morabito, consistieron en realizar cambios proporcionales en la flota de transporte de acuerdo con su configuración y prioridades de descargue, logrando una mayor cantidad de caña entregada a los molinos. Sin embargo, los tiempos de espera en el patio aumentaron en un 17.9% (comparado con el modelo original), debido a la limitación de la capacidad de los molinos.

Hansen et. Al. (1998) enfocó sus modelos de simulación en la reducción de tiempos de permanencia de la caña, alcanzando una reducción hasta de 40% de este tiempo, en un caso de estudio en Sur África, mediante la coordinación de las actividades de cosecha y molienda.

## **7.5. SIMULACIÓN DE PROCESOS**

### **7.5.1 DEFINICIÓN**

La simulación de eventos discretos es el conjunto de relaciones lógicas, matemáticas, determinísticas y probabilísticas que integra el comportamiento de un sistema bajo estudio cuando se presenta un evento determinado. El objetivo del modelo de simulación consiste, precisamente, en comprender, analizar y mejorar las condiciones de operación relevantes del sistema<sup>8</sup>

La simulación de eventos discretos se configura cuando las variables de estado del sistema cambian en puntos contables en el tiempo.

### **7.5.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES**

- Este comportamiento discreto del sistema permite la implementación del mismo en un programa de ordenador mediante una lista de sucesos futuros, un reloj que salte en el tiempo hacia el siguiente suceso y unos acumuladores estadísticos que actualicen las variables de estado y las variables de salida que miden el comportamiento
- Se trata de realizar una historia artificial del sistema a partir de las suposiciones del modelo para que, de esta forma, las observaciones obtenidas sirvan para comprobar el real funcionamiento de dicho sistema

### **7.5.3. VENTAJAS**

---

<sup>8</sup> GARCIA, E.; GARCIA, H.; CARDENAS, L.; Simulación y análisis de sistemas con ProModel . Primera edición. Pearson educación, México, 2006

- Una vez que el modelo está construido, se puede utilizar repetidamente para analizar cambios en el diseño o diversas políticas
- Suele ser menos costoso obtener datos de un proceso de simulación que de un sistema real.
- Los modelos analíticos normalmente requieren asumir muchas simplificaciones para hacerlos matemáticamente tratables. Los modelos de simulación no tienen estas restricciones.
- El entorno en el que se va a incluir el sistema puede ser modelado por el usuario.

## **7.6. SIMULADORES COMERCIALES**

En el mercado actualmente hay diversos software de simulación tales como: PROMODEL, WITNESS, FLEXIM, ARENA, EXTEND.

El simulador que se utiliza en este trabajo será Promodel, el cual es uno de los paquetes de software comercial para simulación más usados en el mercado. Cuenta con una herramienta de análisis y diseño, que unidas a la animación de los modelos bajo estudio, permiten al analista conocer mejor el problema y alcanzar resultados más confiables respecto de las decisiones a tomar.

## **8. METODOLOGÍA**

La metodología que se va a utilizar para llevar a cabo las diferentes etapas del proyecto de grado son:

8.1. Identificación de información relevante para toma de decisiones en la coordinación logística

8.2. Caracterización de eventos conducentes a la reprogramación.

8.3. Definición de alternativas de decisión en la reprogramación.

8.4 Plan metodológico para la evaluación del modelo.

## **8.1. IDENTIFICACIÓN DE INFORMACIÓN RELEVANTE PARA TOMA DE DECISIONES EN LA COORDINACIÓN LOGÍSTICA**

El administrador de la logística debe monitorear todo el sistema de abastecimiento, controlando específicamente: los inventarios, el abastecimiento continuo a los molinos y la flota

### **8.1.1 ADMINISTRACIÓN DE INVENTARIOS:**

- Cantidad de inventarios de caña en tránsito por frente y en patio
- Saldos de caña disponible en los frentes

### **8.1.2. CUMPLIMIENTO EN ABASTECIMIENTO**

- Cantidad de caña entregada por frente en cada turno de fábrica
- Alertas de desabastecimiento

### **8.1.3 ADMINISTRACIÓN DE FLOTA**

- Visualización de los estados de transporte: cuantos equipos en traslado hay vacíos, cargados, en espera de cargue, cargando, espera de descargue y descargando.
- Número de equipos varados
- Cantidad de caña transportada por unidad de transporte

## **8.2. CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS CONDUCENTES A LA REPROGRAMACIÓN**

Para establecer el diseño operacional del abastecimiento de caña es necesario identificar todas las entidades y variables del proceso de abastecimiento. A continuación se describe en el siguiente cuadro:

Tabla 1 Entidades y variables del proceso

<i>NUM ALZADORAS ASIGNADAS POR FRENTE</i>
<i>NUM TRACTORES ASIGNADOS POR FRENTE</i>
<i>TONELADAS SUERTE</i>
<i>TONELADAS ENTREGADAS (INSTALACIONES INGENIO)</i>
<i>TONELADAS EN TRANSITO</i>
<i>TONELADAS PENDIENTE POR COSECHAR</i>
<i>VAGONES YA LLENOS EN SUERTE</i>
<i>TASA DE ALCE Y RECOLECCIÓN (TON/MIN)</i>
<i>TONELADAS PROMEDIO POR VAGON</i>
<i>CARGA PROMEDIO POR TRACTOMULA (TON)</i>
<i>TIEMPO DE CARGUE EN SUERTE (MIN)</i>
<i>TIEMPO PROMEDIO POR TRAYECTO (MIN)</i>

Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

Los cambios en la programación de cosecha se dan principalmente por diversas contingencias que afectan el abastecimiento de materia prima a la fábrica. A continuación se detallan:

### **8.2.1 CLIMA**

Las condiciones de invierno sobre la suerte (pluviometría por encima de 40 mm), ocasiona problemas en la operación de la maquinaria por las condiciones de humedad del terreno, dificultando el tránsito de los equipos de alce dentro de la suerte, además de generar daños graves al cultivo, que se ven reflejados en una baja productividad en la próxima cosecha.

### **8.2.2 FALTA DE CAÑA EN LOS FRENTE DE COSECHA**

Esto se puede presentar por varias situaciones. Un mal aforo de la cantidad de caña en la suerte, un incremento en la rata de molienda de la fábrica, que se le asignen más equipos de transporte por encima de lo requerido.

### **8.2.3 DAÑOS EN LA MAQUINARIA**

Los problemas de maquinaria es el factor principal que afecta la confiabilidad de las entregas de caña a la fábrica. Especialmente en las alzadoras. Estos equipos deben tener una confiabilidad del 90%. Si esto no ocurre, un frente de cosecha queda parado instantáneamente, interrumpiendo el proceso de cargue de la caña de la suerte hacia a los equipos de transporte. Cada frente (nodo) cuenta con dos alzadoras, debido a que su disponibilidad por cada equipo es del 70%. La tasa de entrega de un frente se encuentra entre 75 a 80 ton/hora en épocas de verano y en épocas de invierno en 50 ton/hora.

Por lo tanto, si las alzadoras de un frente están varadas. A la fábrica no le llegaría por cada hora entre 50 y 75 toneladas, lo que puede ocasionar un paro de molienda si se coincide con otra contingencia o novedad en otro frente. Es decir a la fábrica se le debe entregar por cada hora 250 toneladas y si dos frentes de 70 ton/hora presentan problemas, la entrega total por parte de cosecha a fábrica sería de 110 toneladas. Lo que indica que la fábrica no puede moler y obligaría a parar su proceso.

Las varadas en los tractores afectan la productividad de un frente de cosecha. Si se vara el 50% de estos equipos simultáneamente la tasa de entrega de un frente se baja un 30%. Es decir que la tasa de entrega pasa de 70 a 50 toneladas por hora. También puede ocurrir que se varen todos los tractores asignados a un frente (3 o 4 dependiendo del clima). En este caso, el frente queda totalmente parado y la entrega por hora se convierte en cero

En las tractomulas las varadas afectan a todo el sistema de abastecimiento. Cuando se opera por debajo de los requerimientos del programa de transporte. Como consecuencia, los frentes se paran por falta de vagón en el campo, por lo tanto la cantidad de caña en tránsito siempre va a ser mínima y no se alcanzara a cumplir con las entregas.

#### **8.2.4 BLOQUEOS DE VÍA.**

**Esta sucede cuando la comunidad donde transita las tractomulas bloquean la vía por razones de protesta social donde exigen al ingenio adecuación de la misma, arreglo de vivienda cuando estas han sido afectadas por el tránsito de maquinaria pesada y constante, o alguna vuelta ciclística. Estos bloqueos son temporales con lapsos de tiempo que oscilan entre 2 y 3 horas durante el día. Esta contingencia ocasiona una parálisis del frente, interrumpiendo las entregas de caña de la hacienda hacia la fábrica.**

### **8.3. DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE DECISIÓN EN LA REPROGRAMACIÓN**

#### **8.3.1 ALTERNATIVA ANTE COMPLICACIONES DE INVIERNO.**

Si las condiciones del terreno se agravan, se puede tomar la decisión de trasladar el frente hacia otra hacienda que tenga mejores condiciones de terreno.

Implicaciones o riesgos: Esto genera una pérdida de tiempo en los traslados de la maquinaria afectando la entrega de materia prima a la fábrica, dejando de entregar unas 70 ton/hora por cada frente. Si esto ocurre los demás frentes deben aumentar su capacidad de entrega para cubrir esta necesidad de materia prima. Lo que puede generar que durante el día, la caña o cuota que tenga asignada la termine antes de tiempo.

Otras alternativas que se pueden tomar son: reducción de la cantidad de caña cargada por vagón, esto permite transitar por el terreno con menor dificultad; Reducir la cantidad de vagones por tren, coordinar con la fábrica una disminución en la tasa de molienda.

### **8.3.2 ALTERNATIVA ANTE FALTA DE CAÑA EN LOS FRENTEROS DE COSECHA.**

Si esto ocurre durante el turno es necesario realizar una reprogramación, enviando la maquinaria hacia otra hacienda que no estaba dentro de su programa y que estaba asignada a otro frente de cosecha.

Implicaciones o riesgos: pérdidas de tiempo en traslados de la maquinaria. Otra decisión es dejar los frentes en el sitio esperando que al día siguiente los corteros de caña entreguen materia prima para alzar. Esta decisión es la más costosa, puesto que deja inactiva toda la maquinaria y el personal hasta que haya caña disponible. Adicional se genera un desbalance en las entregas totales a la fábrica puesto que cada frente debe aportar una cuota para completar las 250 ton/hora. Esto se puede agravar si de forma simultánea otro frente presenta novedades tales como: alzadoras varadas, los operadores del frente cambie de turno, se queden sin caña para alzar. Esto aumenta el desabastecimiento a la fábrica puesto que ya son dos frentes parados, generando riesgos de paros de molienda.

### **8.3.3 ALTERNATIVA ANTE DAÑOS EN LA MAQUINARIA.**

Se debe solicitar al departamento de maquinaria el despacho de los equipos disponibles para realizar el cambio mientras queda habilitado el equipo titular.

## **8.4 PLAN METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DEL MODELO**

### **8.4.1 FORMULACIÓN DE ESCENARIOS:**

Todos los supuestos o escenarios deben ser acordados con el usuario. Se debe evaluar el abastecimiento en condiciones ideales de operación y con la ocurrencia de contingencias tales como: dificultades con el clima, falta de caña en los frentes, problemas de maquinaria. La comparación de los resultados, nos mostrara los beneficios del modelo.

#### **8.4.2 ESTABLECIMIENTO DE PREGUNTAS U OBJETIVOS DE LA SIMULACIÓN.**

Promodel ofrece una serie de estadísticas como resultado de las corridas de simulación. Sin embargo la información a entregar a los usuarios debe ser eficaz para la toma de decisiones.

#### **8.4.3 CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO**

En esta etapa debe establecerse las relaciones lógicas y matemáticas que representan los diferentes componentes y estructura del sistema. El modelo debe abarcar todas las etapas de la cadena de abastecimiento. Esto le permitirá al usuario tener una visión holística del proceso y la simulación será más cercana a la realidad.

#### **8.4.4 RECOLECCIÓN DE LOS DATOS**

Los datos de entrada deben ser definidos en la etapa de conceptualización del modelo y deben ser de fácil consecución para el analista de cosecha. Con esto se garantiza una mayor rapidez en la utilización del simulador.

#### **8.4.5 VERIFICACIÓN**

En esta etapa se evalúa si el modelo está funcionando apropiadamente. La verificación es un proceso continuo a lo largo de todo el proceso de simulación.

#### **8.4.6 VALIDACIÓN**

Se debe validar si el modelo conceptual es una acertada aproximación del sistema real. Para esto se debe comparar los resultados del modelo con los del sistema real.

#### **8.4.7. CORRIDAS Y ANÁLISIS**

Las diferentes corridas y su posterior análisis son utilizadas para estimar medidas de desempeño de los diferentes escenarios que han sido simulados y responder a las preguntas iniciales establecidas como objetivos de la simulación.

## **9. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO**

En este trabajo se propone un modelo de simulación que representa la cadena de abastecimiento de materia prima desde el campo hasta la fábrica en el Ingenio la Cabaña. Para la descripción del modelo se emplea el diagrama entidad - relación que nos servirá para analizar la información como un conjunto de entidades y las relaciones existentes entre ellas.

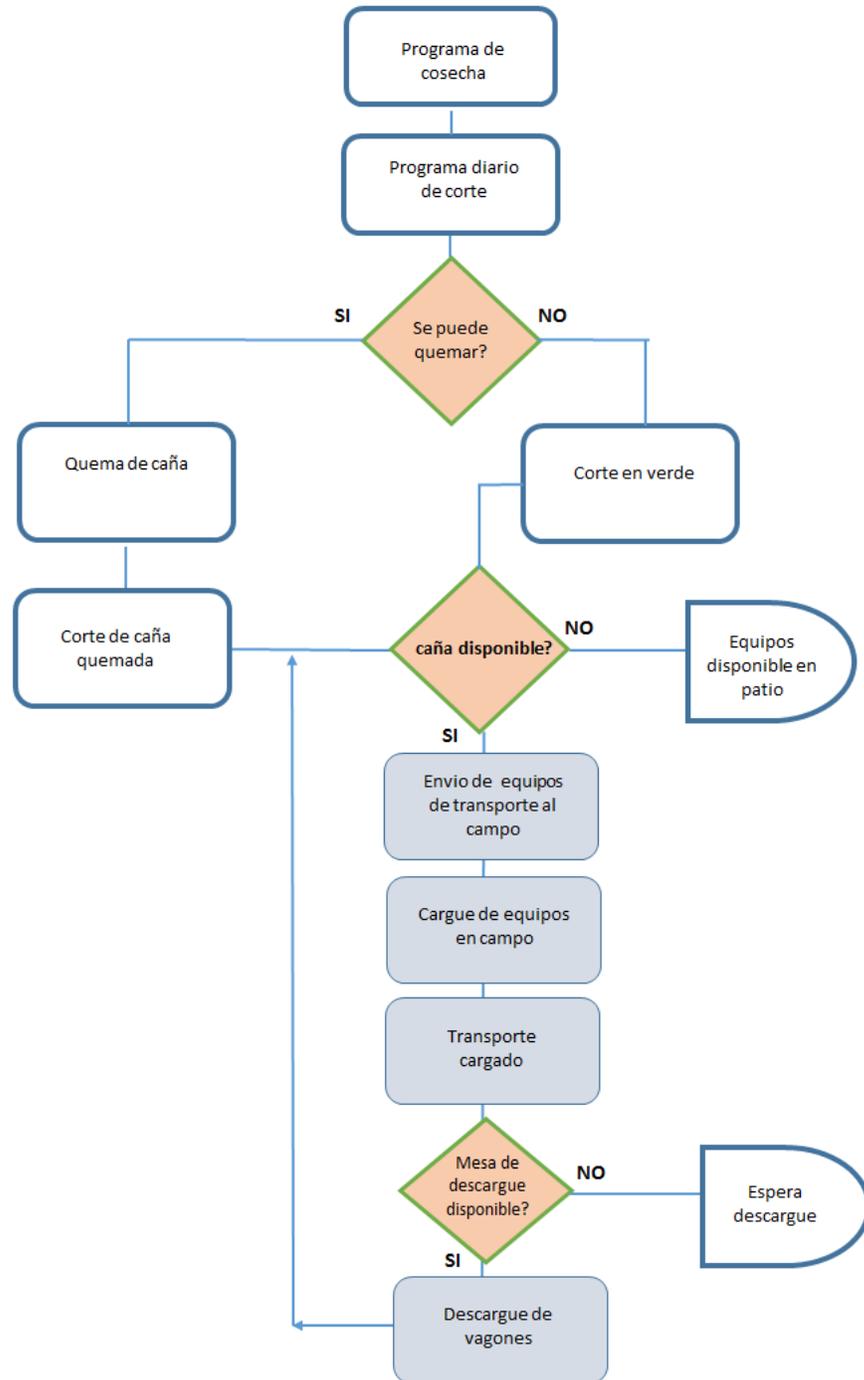
### **9.1 LAS ENTIDADES**

Son objetos o procesos que existen en un sistema. A continuación se definen las entidades que hacen parte del sistema de abastecimiento:

- Programación
- Aprovechamiento (corte de caña)
- Recolección de la caña (Frentes de cosecha)
- Transporte de caña
- Descargue de vagones
- Molienda

Estos procesos fueron descritos en el marco de referencia. En este capítulo, mediante un diagrama de flujo (ver ilustración 13) se representa la secuencia de las operaciones.

Ilustración 13 Diagrama de flujo de la cadena de abastecimiento



Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

## **9.2 LOS ATRIBUTOS**

Son las características de cada entidad que se convierte en datos. Se representan mediante una circunferencia. Para este proyecto los atributos se dividirán en datos de entrada y salida.

### **9.2.1 VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO**

Atributos de recolección:

1. Numero de alzadoras y tractores por cada frente
2. Capacidad de entrega por hora de cada frente
3. % de Disponibilidad de la maquinaria
4. Niveles de inventario

Atributos de transporte:

5. Tipo de transporte para cada frente
6. Numero de vagones por tren y capacidad
7. Tiempo de ciclo
8. Número de equipos

Atributos de descargue

9. Inventario de caña en patio

Atributos de molinos

10. Horas de trabajo
11. Rata de molienda por hora

### 9.2.2. VARIABLES DE SALIDAS

1. Cantidad de caña entregada por hora, turno y día
2. Saldos de inventario en los frentes
3. Número de viajes por frente

### 9.3 LAS RELACIONES

Es una asociación entre dos o varias entidades. Se simbolizan de la siguiente forma:

- Relación uno a uno (1,1).
- Relación uno a muchos (1,N)
- Relación muchos a muchos (N,N)

#### **Relación uno a uno (1,1).**

Cuando un registro de una entidad está relacionado únicamente con otro registro de otra entidad y viceversa. En el modelo estas son las relaciones:

- El Programa de corte debe estar asignado a un programa diario.
- El descargue de los vagones debe estar asignado a un solo conductor de la mesa.

#### **Relación uno a uno (1, N).**

Se da cuando un registro de una entidad puede estar relacionado con más de un registro de otra entidad y viceversa

- El programa diario es distribuido a varios frentes

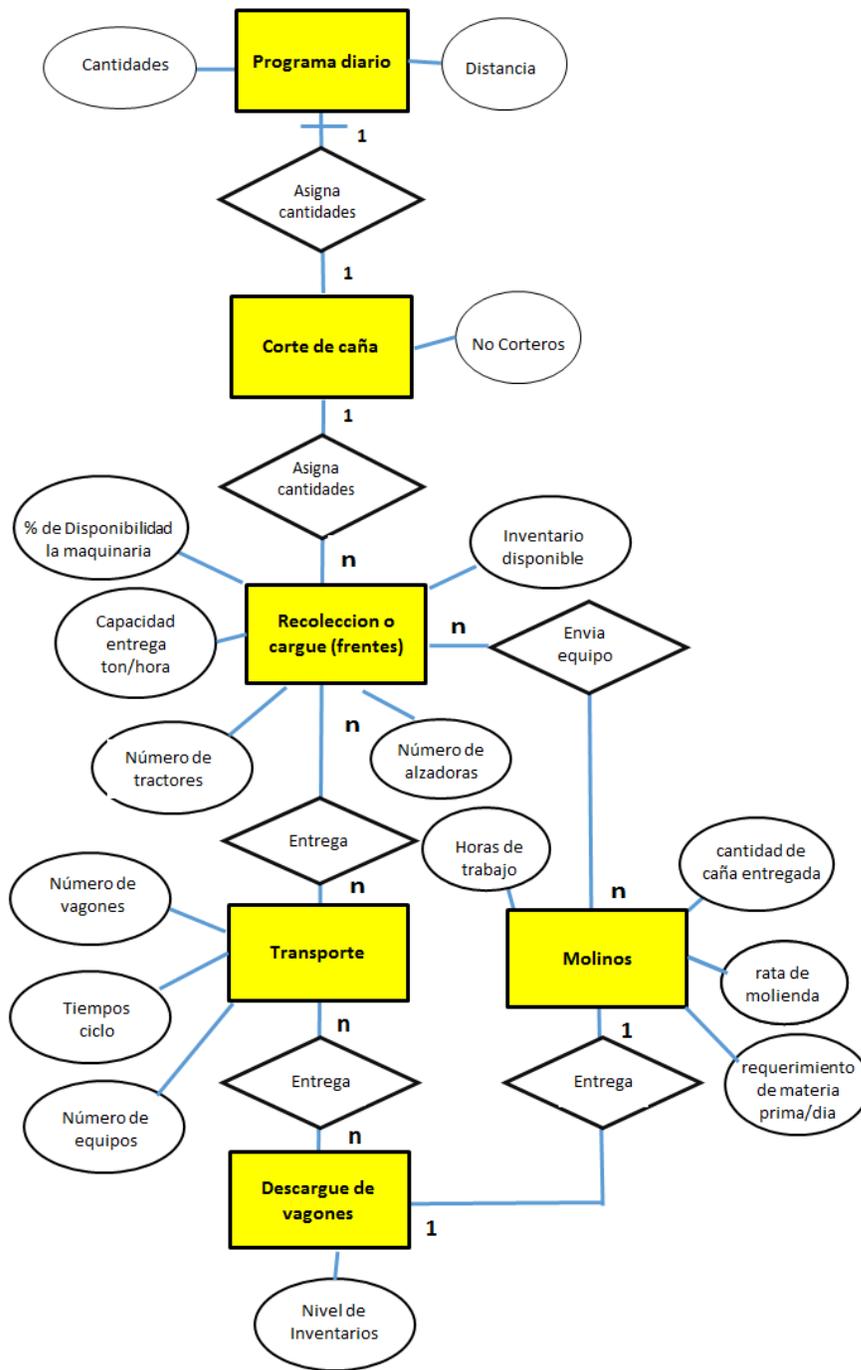
### **Relación muchos a muchos (N, N)**

- El transporte puede estar asignado a varios frentes
- El transporte puede descargar en cualquiera de las tres mesas

En la ilustración 14 se presenta el diagrama de entidad- relación de la cadena de abastecimiento. Cada una de las entidades se integra secuencialmente generando una relación de dependencia. Los atributos son las variables que se ingresan al modelo de simulación por parte del analista para recrear una situación ante cualquier contingencia. Cada uno de estos atributos está conectados a las entidades, por lo tanto al correr el modelo con los datos de entrada, se podrá conocer el comportamiento de cada entidad y su impacto en la continuidad de molienda.

La estructura del modelo inicia con el programa diario, donde se determina las cantidades a cortar en una suerte definida, los corteros asignados entregan caña disponible para ser recolectada por los frentes de cosecha. Una vez se tenga el inventario suficiente en campo, se envía equipos de transporte, los cuales al quedar cargados, se desplazan al ingenio para ser descargados y empezar un nuevo ciclo.

Ilustración 14 Diagrama Entidad-Relación en la cadena de abastecimiento



Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

## **9.4 FASES DEL MODELO**

En la ilustración 15 se presenta el modelo conceptual de la cadena de abastecimiento que servirá para el desarrollo del modelo de simulación en Promodel. Se plantea tres fases, estas son:

### **9.4.1 FASE INICIALIZACIÓN.**

Se definen las entidades y los estados del sistema. Las entidades definidas son: vagones, caña y tractomulas. Los estados del sistema corresponden a la información que el modelo de simulación entrega cada vez que se corre. Estos datos son: cantidad y ubicación. Adicionalmente para las tractomulas, se necesita conocer los caminos o rutas. En la ilustración 15, están representados en rectángulos (entre barras) de color azul.

### **9.4.2 FASE DE DESARROLLO**

Corresponde a la definición de cada proceso y la secuencia lógica. Estos son: corte, recolección, transporte, cargue, pesaje, descargue en molinos. En la ilustración 15 están representadas por cuadros de color azul

### **9.4.3 FASE DE REUBICACIÓN**

Consiste en la decisión que debe tomarse ante una contingencia o falta de inventario en un frente, que obliga a trasladarse a otra hacienda.

Adicionalmente la ilustración 15 contiene otros subprocesos, nodos y variables de decisión. Como son:

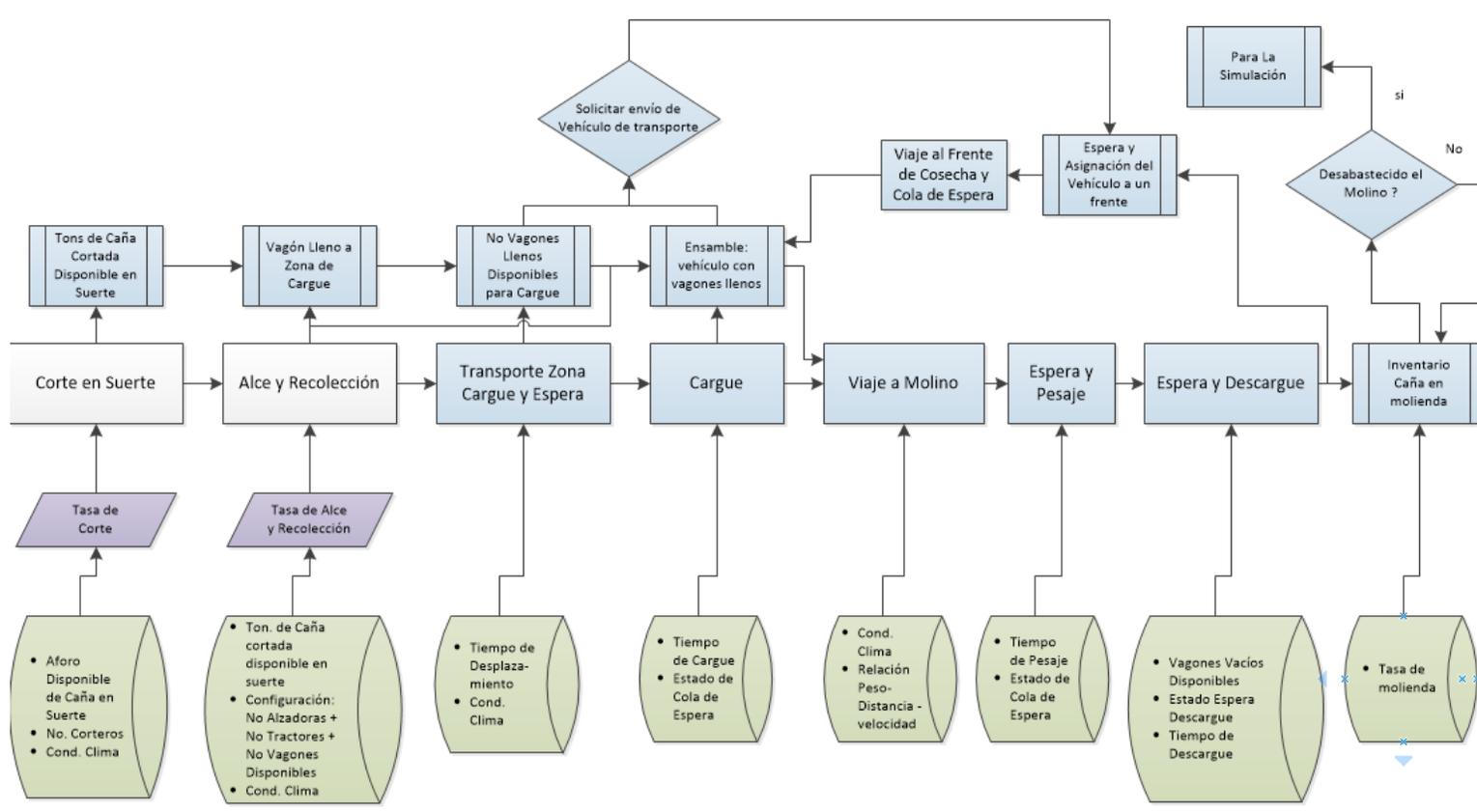
- Tasas: son valores predeterminados calculados por el analista de acuerdo con las condiciones de operación. Esta sustituye el detalle de los procesos en fondo blanco (corte en suerte y recolección). Es decir, el modelo no simula

las condiciones de operación de corte de caña y cargue de los equipos dentro de la suerte. Los rectángulos de color morado representan las tasas del modelo.

- Decisiones: la primera corresponde al envío de equipos dependiendo de la cantidad de vagones cargados dentro de la suerte, evitando tiempos muertos en alzadoras y tractores. La segunda decisión, genera una alerta en el modelo, cuando se presenta desabastecimiento de materia prima en la fábrica. Esta finalmente es la función principal del modelo de simulación y el proyecto de grado.

Base de datos: son los cilindros de color verde y representan los datos claves de la operación de la Cadena. El analista alimenta esta información en el momento que desea simular una situación determinada.

Ilustración 15 Modelo de simulación



Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

## 10. DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN

El proceso de abastecimiento de caña es un proceso estocástico, puesto que hay un alto grado de incertidumbre en la ejecución del programa debido a las múltiples contingencias (varadas de la maquinaria, clima, daños en la fábrica, etc.) que ocasionan una variación en las variables durante el tiempo, es decir que para un conjunto de datos de entrada, las salidas no serían siempre las mismas. Sin embargo el modelo construido se realizó de forma determinística, puesto que es un prototipo del modelo conceptual no la imitación del Ingenio la Cabaña, por lo tanto los datos de entrada que se definen al comienzo de la simulación se mantiene sin variación durante el tiempo de la corrida y al terminar serán los mismos datos, como son: número de tractomulas y vagones por viajes, toneladas por vagón, número de alzadoras y tractores en los frentes, las tasas de eficiencia de corte, alce y molienda.

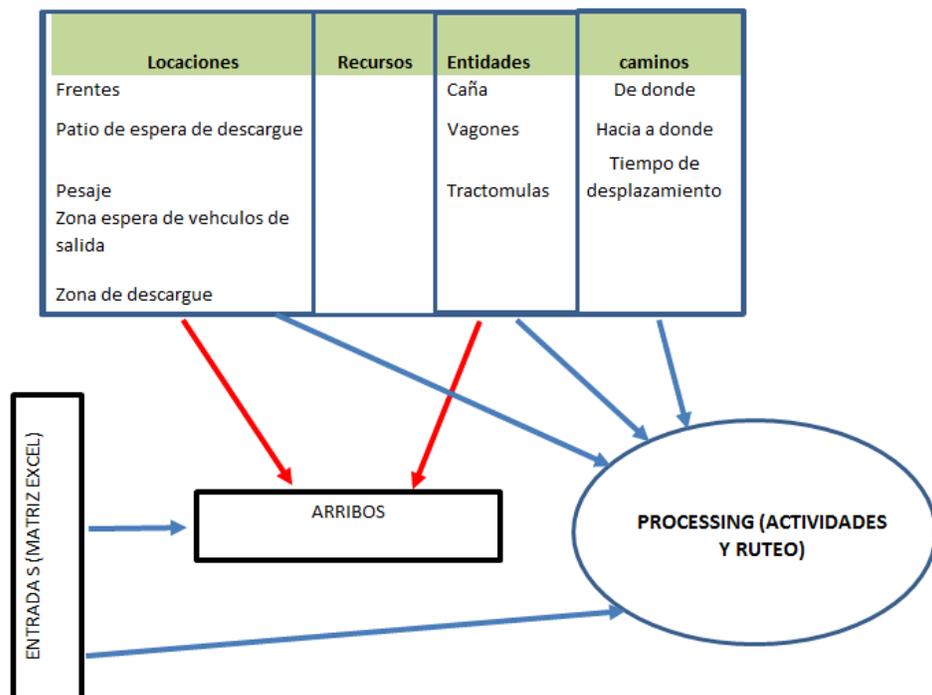
Se recomienda usar distribuciones uniformes, triangulares o normales en caso que se quiera una simulación aplicada sin el detalle probabilístico de ajuste.

En este capítulo se diseña el modelo de simulación en Promodel, donde se recoge toda la información del modelo conceptual y lo simplifica en un prototipo piloto cuya función principal será imitar el proceso de abastecimiento y alertar cuando se presenta riesgo de desabastecimiento en los molinos.

La función principal de este prototipo de simulación es la reprogramación del día a día con un horizonte de corto plazo (24 horas), actuando como modelo de diagnóstico. Este tipo de modelos en programación lineal, no sería posible manejarlo.

En la ilustración 16 se presenta el esquema simplificado del modelo conceptual. Las locaciones, entidades y caminos definidos para Promodel, la información análoga de entrada contenida en la matriz de Excel (ver tabla no 4) que es importada por el software, para ser leída y procesada de acuerdo con el lenguaje de programación.

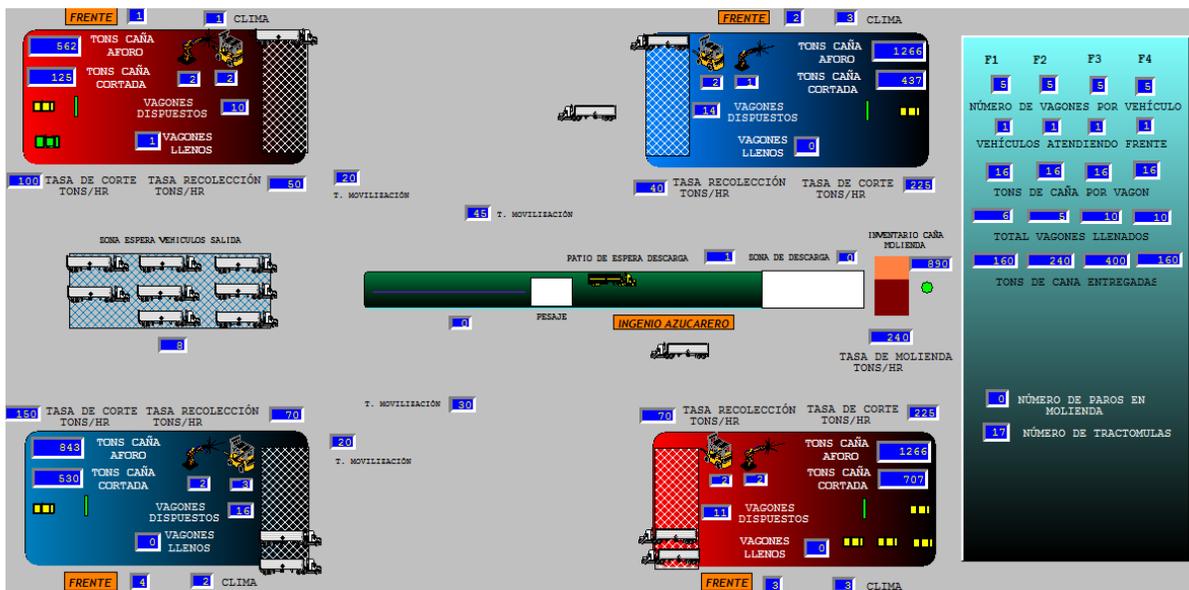
Ilustración 16 Esquema de simulación Promodel



Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

En la ilustración 17 se muestra la configuración del modelo en Promodel en la fase de desarrollo, donde se imita el proceso de abastecimiento de caña, de acuerdo con la información ingresada por el analista y entregara como resultado, la cantidad y ubicación de cada entidad, evaluando la continuidad de la molienda.

Ilustración 17 Simulación de la cadena de abastecimiento en Promodel



Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

En el layout del Promodel se ubica los frentes de cosecha, el ingenio azucarero (planta) y la zona de espera de los vehículos que van de salida vacíos. En cada una se han definido las siguientes locaciones:

### Frentes de cosecha

- **Toneladas de caña aforo (Aforo):** cuenta la cantidad de caña que aún falta por cortar desde el tiempo definido por el analista hasta las 16:00 p.m. Tiempo en el que finaliza la jornada laboral de los corteros.
- **Toneladas de caña cortada (corte):** cuenta la caña disponible ya cortada, lista para ser recogida.
- **Vagones llenos:** es la zona donde se cuentan los vagones ya cargados, listo para ser enganchados por la tractomula.
- **Vagones dispuestos:** cuenta el número de vagones vacíos y cargados en el frente.

- **Zona de enganche (Car):** sitio donde los vagones esperan para ser enganchados a las tractomulas.
- **Zona de parqueo de tractomulas (cargue):** sitio donde las tractomulas llegan vacías y se disponen a enganchar los vagones llenos.

### **Ingenio azucarero**

- **Fila entrada:** cuenta el número de tractomulas cargadas que entran a la zona de descarga.
- **Pesaje:** cada vehículo cargado debe ser pesado antes de ser descargado.
- **Patio de descarga:** sitio donde las tractomulas esperan para ser descargadas.
- **Zona de descarga:** sitio donde las tractomulas son descargadas.
- **Inventario de caña:** cuenta la cantidad de caña que ha sido descargada en el molino.

### **Zona espera vehículos salida**

Una vez las tractomulas son descargadas, se dirigen a la zona de espera de vehículos de salida para ser despachadas a los frentes de cosecha.

### **Rutas y decisión de despacho:**

La regla de despacho de tractomulas vacías, depende del número de vagones que se tiene cargados en cada frente. Por lo tanto el modelo calcula que antes de que una tractomula complete los cinco vagones llenos, ya hay una esperando. Esto evita pérdida de tiempo en las alzadoras por falta de vagones. El modelo se programó para tener como máximo 2 tractomulas en los frentes, esto para evitar tiempos ociosos y garantizar un abastecimiento continuo de vagones vacíos.

El sistema simula el desempeño de la operación con unas tasas estimadas por el analista. Estas son: tasa de corte y tasa de recolección. La primera representa la cantidad de caña cortada por hora o el ritmo en el que va disminuyendo la cantidad

de caña de aforo, para pasarla a la locación toneladas de caña cortada (caña disponible en arrumas). La segunda tasa equivale, a la velocidad con la que se recoge la caña del suelo. Esta simplificación en el modelo, permite representar varias contingencias, como son: falla de una alzadora, cambio del estado del clima, disminución en el número de vehículos. Puesto que el analista pueda simular la tasa de recolección, de acuerdo con la situación presentada y medir el impacto en la continuidad de la molienda.

A medida que el modelo de simulación corra, el sistema informa detalladamente los niveles de inventario en toda la cadena, la cantidad de caña entregada, el número de tractomulas en el circuito, los vagones llenos por cada frente y el número de veces que se desabasteció el molino.

#### **10.1. SUPUESTOS DEL MODELO**

- La configuración del transporte es fija. Es decir no cambia el número de vagones transportados en el trayecto.
- Los datos de número de alzadoras, tractores y el clima son informativos.
- Los procesos de corte y cargue de la caña no son imitados, se simplifica con la utilización de tasas calculadas por el analista de acuerdo con las condiciones de operación.
- El despacho de los equipos vacíos a los frentes se realiza de acuerdo con la lógica de envío, convirtiéndose en automáticos (es decir el analista no tiene que definir ruta).
- La lógica de envío de equipos a los frentes depende de la acumulación de vagones llenos que no han sido enganchados, de la cantidad de equipos en espera de cargue y en traslado vacíos.
- El simulador imita el enganche de los vagones.
- El simulador, una vez un frente de cosecha queda sin material, se traslada hacia otro frente.

- Una vez se presente un desabastecimiento en la fábrica por materia prima, pausa la simulación.
- Una vez se acabe la caña en los cuatro frentes el modelo para. Lo que permite establecer el tiempo de agotamiento de la caña para molienda.

## **10.2 INFORMACIÓN INICIAL**

La información que el analista debe digitar cada vez que requiera correr el modelo están contenidas en la tabla no 4. Estos datos deben ser calculados de acuerdo con las condiciones de operación actuales y el tiempo restante de la jornada laboral.

### **10.2.1 Configuración de Cantidad de caña y vagones (color verde en la tabla no 2)**

- Capacidad: aquí se detalla la cantidad de toneladas que están aún por cortar. Si la simulación inicia desde el momento cero (al inicio de la jornada) se coloca la cantidad programada para cortar. Si se realiza en otro instante (10 o 11 a.m.) es la cantidad de caña que aún falta por cortar restando lo entrado hasta ese momento.
- Toneladas de caña ya cortadas, listas para ser recogidas. A medida que va transcurriendo la jornada, se aumenta la caña disponible en arrumas. Aquí también se suma la cantidad de caña amanecida o saldo final del día anterior.
- Cantidad de tractomulas, vagones vacíos y llenos en zona de cargue.

### **10.2.2. Configuración de tasas (color rojo en la tabla no 2)**

Las tasa de corte, recolección, molienda y tiempos de movilización del frente hacia el ingenio, deben definirse de acuerdo con el desempeño de la operación.

### **10.2.3 Configuración del transporte (color café en la tabla no 2)**

Es la información más amplia digita por el analista. Si la tractomula está en tránsito debe colocar los tiempos estimados de arribo, adicionalmente, la cantidad de caña cargada por cada vagón (tamaño del lote de recolección), el número de vagones por viaje y tiempo de enganche de los vagones.

## **10.3 DESARROLLO DEL PLAN METODOLÓGICO DE EVALUACIÓN DEL MODELO**

### **10.3.1 Formulación de escenarios**

Se formularan cuatro escenarios para validar y evaluar el modelo de simulación:

- Situación real.
- Problema de falta de caña en un frente de cosecha.
- Problema de condiciones de clima en un frente de cosecha.
- Problema de maquinaria varada en transporte.

#### **Escenario 1. Situación real**

En la tabla no 2 se detallan los datos, en este escenario los frentes de cosecha amanecen con caña disponible para alzar, el patio inicia con inventario de 500 toneladas, se tiene un total de 20 tractomulas. Los tiempos y tasas son tomados en tiempo real.

Tabla 2 Datos escenario 1

SIGNIFICADO RENGLÓN	FRENTE 1	FRENTE 2	FRENTE 3	FRENTE 4	INGENIO
CAPACIDAD: TONS AÚN POR CORTAR (resta x cosechar hasta las 4 pm)	800	1800	1800	1200	20
TONS DE CAÑA YA CORTADAS LISTAS PARA SER RECOLECTADAS	250	350	350	350	0
ALZADORAS DISPONIBLES	2	1	2	2	500
TRACTORES DISPONIBLES	2	2	2	3	240
VAGONES ASIGNADOS	10	14	16	11	
VAGONES LLENOS EN ZONA CARGUE	5	5	5	5	
VAGONES VACIOS EN ZONA CARGUE	5	5	6	5	
TASA DE CORTE (TONS/HR)	100	225	225	150	
TASA DE RECOLECCIÓN (TONS/HR) INCLUYE TIEMPOS DE TRASLADOS	50	70	70	60	
TIEMPO ESTIMADO DE DESPLAZAMIENTO ENTRE SUERTE E INGENIO (MIN)	20	45	30	20	
TIPO CLIMA (1= SECO, 2= LLUVIA 3= PANTANOSO)	1	1	1	1	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 1 AL INGENIO (MIN)	10	8	24	15	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 2 AL INGENIO (MIN)	0	18	0	0	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 3 AL INGENIO (MIN)	0	0	0	0	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 1 AL FRENTE (MIN)	8	8	18	10	240
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 2 AL FRENTE (MIN)	0	0	0	0	4
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 3 AL FRENTE (MIN)	0	0	0	0	5
NUMERO DE TRACTOMULAS EN ZONA CARGUE	0	0	0	1	
NUMERO DE TRACTOMULAS EN ZONA DE ESPERA DESCARGUE	0	0	1	0	
VAGONES CARGADOS POR VEHICULO	7	5	5	5	3
TAMAÑO LOTE DE RECOLECCIÓN	8	16	16	16	3
TIEMPO ESTIMADO DE CARGUE EN EL FRENTE (MIN)	10	12	8	15	
TIEMPO DESPLAZAMIENTO AL FRENTE 1+4 (MIN)	40	50	60	30	

Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

## Escenario 2. Problema de falta de caña en un frente de cosecha

En la tabla No 3 se detalla los datos de este escenario, en este el frente 1 y 3 amanecen sin caña, por lo tanto las tractomulas que en el escenario 1 se dirigía hacia estos frentes, en este escenario se simulara como si ya estuviera en el ingenio descargando. Las demás condiciones del patio y los frentes 2,3 y 4 se mantienen.

Tabla 3 Datos escenario 2

SIGNIFICADO RENGLÓN	FRENTE 1	FRENTE 2	FRENTE 3	FRENTE 4	INGENIO
CAPACIDAD: TONS AÚN POR CORTAR (resta x cosechar hasta las 4 pm)	800	1800	1800	1200	20
TONS DE CAÑA YA CORTADAS LISTAS PARA SER RECOLECTADAS		350		350	0
ALZADORAS DISPONIBLES	2	1	2	2	500
TRACTORES DISPONIBLES	2	2	2	3	240
VAGONES ASIGNADOS	10	14	16	11	
VAGONES LLENOS EN ZONA CARGUE	5	5	5	5	
VAGONES VACIOS EN ZONA CARGUE	5	5	6	5	
TASA DE CORTE (TONS/HR)	100	225	225	150	
TASA DE RECOLECCIÓN (TONS/HR) INCLUYE TIEMPOS DE TRASLADOS	50	70	70	60	
TIEMPO ESTIMADO DE DESPLAZAMIENTO ENTRE SUERTE E INGENIO (MIN)	20	45	30	20	
TIPO CLIMA (1= SECO, 2= LLUVIA 3= PANTANOSO)	1	1	1	1	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 1 AL INGENIO (MIN)	10	8	24	15	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 2 AL INGENIO (MIN)	0	18	0	0	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 3 AL INGENIO (MIN)	0	0	0	0	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 1 AL FRENTE (MIN)	0	8	0	10	240
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 2 AL FRENTE (MIN)	0	0	0	0	4
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 3 AL FRENTE (MIN)	0	0	0	0	5
NUMERO DE TRACTOMULAS EN ZONA CARGUE	0	0	0	1	
NUMERO DE TRACTOMULAS EN ZONA DE ESPERA DESCARGUE	1	0	2	0	
VAGONES CARGADOS POR VEHICULO	7	5	5	5	3
TAMAÑO LOTE DE RECOLECCIÓN	8	16	16	16	3
TIEMPO ESTIMADO DE CARGUE EN EL FRENTE (MIN)	10	12	8	15	
TIEMPO DESPLAZAMIENTO AL FRENTE 1+4 (MIN)	40	50	60	30	

Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

### Escenario 3 Problema con la condiciones de terreno por efectos del clima

En este escenario los frentes 2 y 4 presentan problemas humedad en el terreno, por lo tanto la eficiencia en las tasas de recolección se disminuyen en un 40%. Los demás frentes (1 y 3), las condiciones del patio y la molienda, la cantidad de tractomulas se mantienen iguales al escenario 2. En la tabla no 4 se detalla la información

Tabla 4 Datos escenario 3

SIGNIFICADO RENGLÓN	FRENTE 1	FRENTE 2	FRENTE 3	FRENTE 4	INGENIO
CAPACIDAD: TONS AÚN POR CORTAR (resta x cosechar hasta las 4 pm)	800	1800	1800	1200	20
TONS DE CAÑA YA CORTADAS LISTAS PARA SER RECOLECTADAS		350		350	0
ALZADORAS DISPONIBLES	2	1	2	2	500
TRACTORES DISPONIBLES	2	2	2	3	240
VAGONES ASIGNADOS	10	14	16	11	
VAGONES LLENOS EN ZONA CARGUE	5	5	5	5	
VAGONES VACIOS EN ZONA CARGUE	5	5	6	5	
TASA DE CORTE (TONS/HR)	100	225	225	150	
TASA DE RECOLECCIÓN (TONS/HR) INCLUYE TIEMPOS DE TRASLADOS	50	42	70	36	
TIEMPO ESTIMADO DE DESPLAZAMIENTO ENTRE SUERTE E INGENIO (MIN)	20	45	30	20	
TIPO CLIMA (1= SECO, 2= LLUVIA 3= PANTANOSO)	1	3	1	3	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 1 AL INGENIO (MIN)	10	8	24	15	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 2 AL INGENIO (MIN)	0	18	0	0	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 3 AL INGENIO (MIN)	0	0	0	0	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 1 AL FRENTE (MIN)		8	0	10	240
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 2 AL FRENTE (MIN)	0	0	0	0	4
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 3 AL FRENTE (MIN)	0	0	0	0	5
NUMERO DE TRACTOMULAS EN ZONA CARGUE	0	0	0	1	
NUMERO DE TRACTOMULAS EN ZONA DE ESPERA DESCARGUE	1	0	1	0	
VAGONES CARGADOS POR VEHICULO	7	5	5	5	3
TAMAÑO LOTE DE RECOLECCIÓN	8	16	16	16	3
TIEMPO ESTIMADO DE CARGUE EN EL FRENTE (MIN)	10	12	8	15	
TIEMPO DESPLAZAMIENTO AL FRENTE 1+4 (MIN)	40	50	60	30	

Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

### Escenario 4 Problemas de maquinaria

En este escenario se simula los daños en la maquinaria. Se varan 5 tractomulas, por lo tanto la flota pasa de 20 a 15 equipos. El frente 2 y 4 presentan problemas en una de las alzadoras y un tractor. Estos daños son graves por lo tanto durante el día, estará en el taller. Las condiciones de operación y los inventarios (campo y patios) son similares al escenario 1. En la tabla no 5 se detalla la información

Tabla 5 Datos escenario 4

SIGNIFICADO RENGLÓN	FRENTE 1	FRENTE 2	FRENTE 3	FRENTE 4	INGENIO
CAPACIDAD: TONS AÚN POR CORTAR (resta x cosechar hasta las 4 pm)	800	1800	1800	1200	15
TONS DE CAÑA YA CORTADAS LISTAS PARA SER RECOLECTADAS	250	350	350	350	0
ALZADORAS DISPONIBLES	2	1	2	2	500
TRACTORES DISPONIBLES	2	2	2	3	240
VAGONES ASIGNADOS	10	14	16	11	
VAGONES LLENOS EN ZONA CARGUE	5	5	5	5	
VAGONES VACIOS EN ZONA CARGUE	5	5	6	5	
TASA DE CORTE (TONS/HR)	100	225	225	150	
TASA DE RECOLECCIÓN (TONS/HR) INCLUYE TIEMPOS DE TRASLADOS	50	40	70	60	
TIEMPO ESTIMADO DE DESPLAZAMIENTO ENTRE SUERTE E INGENIO (MIN)	20	45	30	20	
TIPO CLIMA (1= SECO, 2= LLUVIA 3= PANTANOSO)	1	1	1	1	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 1 AL INGENIO (MIN)	10	8	24	15	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 2 AL INGENIO (MIN)	0	0	0	0	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 3 AL INGENIO (MIN)	0	0	0	0	
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 1 AL FRENTE (MIN)	0	0	0	0	240
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 2 AL FRENTE (MIN)	0	0	0	0	4
TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO TRACTOMULA 3 AL FRENTE (MIN)	0	0	0	0	5
NUMERO DE TRACTOMULAS EN ZONA CARGUE	0	0	0	1	
NUMERO DE TRACTOMULAS EN ZONA DE ESPERA DESCARGUE	0	0	1	0	
VAGONES CARGADOS POR VEHICULO	7	5	5	5	3
TAMAÑO LOTE DE RECOLECCIÓN	8	16	16	16	3
TIEMPO ESTIMADO DE CARGUE EN EL FRENTE (MIN)	10	12	8	15	
TIEMPO DESPLAZAMIENTO AL FRENTE I+4 (MIN)	40	50	60	30	

Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

### 10.3.2 Formulación de preguntas

Los resultados de la simulación responderán las siguientes preguntas

- Cuál es la cantidad de caña entregada?
- Cuantos paros de molienda se presentaron durante la ejecución de la simulación?
- Cuál es el inventario final, promedio y máximo en patio y campo?
- Cuantos equipos de transporte permanecieron en zona de espera?
- Cuál es el tiempo promedio de espera en patios?

### 10.3.3 Verificación

Se realizaron corridas pilotos para determinar si el modelo funciona adecuadamente y si representa el sistema actual. El modelo corrió sin problemas y entrego

información estadística útil para evaluar la cadena de abastecimiento. Las alertas de desabastecimiento también se probaron y funcionan.

#### **10.3.4 Validación**

Junto con los responsables del proceso se validó el modelo. Se comprobó que este imita el sistema actual. Por lo tanto el análisis de los resultados nos permitirá tomar decisiones.

El modelo presenta continuamente información de los niveles de inventario en patio y frentes de cosecha, al igual que imitaba de forma precisa la secuencia de despacho, cargue y esperas tanto de la caña como los vehículos en sus flujos respectivos, reflejando una realidad futura de un programa. Por lo tanto, se pudo validar todo el modelo con unos datos reales de operación en un horizonte de tiempo de 24 horas, obteniendo resultados cercanos a la realidad.

También se validó, los tiempos de abastecimiento, en cuanto al corte y recolección, los cuales tuvieron un comportamiento normal. Algunos frentes (2 y 3) quedaron con caña amanecida. Los otros dos (1 y 4) presentaron problemas de inventario al inicio de la jornada y una baja tasa de recolección por efecto de la humedad en el terreno.

El usuario del simulador debe tener especial cuidado con la información registrada en la tabla no 4, los datos claves son: los bloques de color rojo (tasas), verde (cantidades de caña) y azul. Estos determinan la dinámica del sistema. Los otros dan un nivel de detalle que permite imitar con mayor precisión la realidad del transporte.

#### **10.3.5 Corridas del modelo**

Se realizaron las corridas de los cuatro escenarios, con unos datos facilitados por el Ingenio del programa del día 10 de noviembre del 2013 con tiempo de inicio 6:00 a.m. El tiempo de simulación abarca una jornada de 24 horas de molienda. La razón,

es que permite a los administradores de la logística pueden tomar acciones a corto plazo como sucede en la realidad.

### **10.3.6 Resultados**

Según los datos contenidos en la tabla no 6, el escenario 1, presenta la mayor cantidad de caña entrada durante las 24 horas con 6404 toneladas, cumpliendo el programa de molienda, sin presentarse paros por desabastecimiento. El inventario final fue de 643 toneladas, lo que indica que no hay riesgo de problemas de continuidad en la molienda al siguiente día. Sin embargo el frente 1 amaneció sin caña para recolectar. Lo que ocasiona un desbalance de inventarios en campo en los demás frentes, puesto que deberán subsidiar la entrada de caña.

En el segundo escenario se simulo problemas de inventarios en los frentes 1 y 3, donde al inicio de la simulación, no tenía caña para cargar los vagones. La maquinaria en este caso, debe esperar hasta que haya caña disponible para iniciar el cargue. Sin embargo se cumplió el programa de molienda con una entrada total de 6202, sin paros por desabastecimiento. Esto gracias al inventario inicial en patio (500 toneladas), por la cantidad de caña en tránsito (5 tractomulas) y la cantidad de tractomulas cargadas en espera de descargue (4 equipos). Esto permite un tiempo de espera para que en los frentes 1 y 3 tengan caña disponible. Además con la distancia tan corta entre el frente 1 y el ingenio (20 minutos) garantiza un abastecimiento en el menor tiempo posible, dando continuidad a la molienda.

En el tercer escenario, las condiciones se complican, puesto que se toma situaciones del escenario 2 (falta de caña al inicio de la simulación en los frente 1 y 3) y se suma el efecto del clima, convirtiendo el terreno en pantanoso en el frente 2 y 4. Esto hace que la eficiencia disminuya hasta en un 40% y la cantidad de caña a entregar por hora se reduzca. El ingreso total de caña es de 5012 con 11 paros de molienda. No se cumplió el programa de abastecimiento a la fábrica, por lo tanto hay pérdidas económicas en producción y generación de energía.

Los inventarios finales en los frente 2 y 3 son altos, debido a que no se alcanzó a recolectar toda la caña programada. En cambio los frente 1 y 4 vuelven a quedar sin inventario. Esto debido a que una vez se tenga caña disponible, se envía un mayor número de equipos, porque presenta mejores condiciones de operación.

En el cuarto escenario, las condiciones son idénticas al escenario 1, el cambio se presenta cuando se varan 5 tractomulas, una alzadora y un tractor. La caña total entrada fue 5660 toneladas con 7 paros de molienda. El inventario final en patio fue 83 toneladas. Por lo tanto al siguiente día, se corre riesgo de desabastecimiento. El inventario final en campo es alto. Especialmente en el frente 2 y 3 lo que afecta la calidad de la materia prima por el tiempo de permanencia.

Tabla 6 Comparación de resultados de los escenarios simulados

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Caña entrada	6404	6292	5012	5660
No Paros	0	0	11	7
No tractomulas en zona de despacho	2	3	2	0
Tiempo promedio espera en patio	0,2	0,3	0,4	0,0
<b>Inventario Final</b>				
Patio	643	531	0	83
Frente 1	0	0	0	0
Frente 2	454	454	1126	1174
Frente 3	454	120	120	486
Frente 4	94	94	686	94
<b>Inventario promedio</b>				
Patio	608	692	196	173
Frente 1	322	133	133	334
Frente 2	1001	1001	1337	1361
Frente 3	1001	656	662	1021
Frente 4	622	622	910	622
<b>Inventario maximo</b>				
Patio	785	876	703	626
Frente 1	649	400	400	659
Frente 2	1587	1587	1811	1827
Frente 3	1587	1240	1240	1606
Frente 4	1069	1069	1262	1069

Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

Simular los problemas en la ejecución de la programación permite anticiparse a los riesgos en la continuidad de la molienda en las próximas horas o incluso al día siguiente. El administrador de la logística puede tomar decisiones, plantear estrategias y evaluar en el simulador el impacto en el proceso.

## 10.4 ESTRATEGIA DE REPROGRAMACIÓN

El escenario 3 es el más crítico, presento 11 paros de cosecha y una baja entrada de caña a la fábrica. El administrador podrá realizar cambios en el proceso utilizando el simulador para evaluar el impacto. Los cambios propuestos son:

- Disminuir la cantidad de caña por vagón pasando de 16 a 12 toneladas en los frentes que presenta problemas de humedad (2 y 4). Esto permite un mejor tránsito de los vagones dentro de la suerte.
- Disminuir la cantidad de vagones por tren en las tractomulas que van hacia los frentes con problema de humedad (2 y 4). Pasando de 5 a 4. Esto permite disminuir los tiempos de ciclos y aumentar el flujo de entrega de caña al ingenio
- Aumentar la tasa de entrega por hora en el frente 3, el cual presenta mejores condiciones de terreno y tiene caña disponible. Para esto se debe enviar una alzadora adicional, para aumentar la tasa de despacho hacia el ingenio. Con esto se puede obtener una tasa de entrega de 80 ton/hora
- Adicionar un tren de avance al frente 3. Esto permite reducir los tiempos de espera de las tractomulas en frente y aumentar la entrega de caña por hora.
- Solicitar a fábrica disminuir la tasa de molienda de 240 a 200 ton/hora, justificando problemas de clima y falta de caña en los frentes.

Esta información debe ingresarse al modelo para correr la simulación. En la tabla No 7 se detallan los resultados.

La caña ingresada en este escenario fue de 5288, un 6% de caña adicional comparado con el escenario 3. No se presentaron paros de molienda, lo cual es un ahorro importante en la generación de energía. El inventario final en el patio es de 487 toneladas, lo cual, permite garantizar al inicio de la jornada del día siguiente 2 horas de molienda.

El modelo de simulación permite evaluar múltiples estrategias, y al obtener una de mejor resultado, puede aplicarse como plan de acción.

Tabla 7 Datos de resultado reprogramación

	Escenario 1
Caña entrada	5288
No Paros	0
No tractomulas en zona de despacho	4
Tiempo promedio espera en patio	0,3
<b>Inventario Final</b>	
Patio	487
Frente 1	0
Frente 2	1142
Frente 3	0
Frente 4	674
<b>Inventario promedio</b>	
Patio	608
Frente 1	133
Frente 2	1339
Frente 3	541
Frente 4	912
<b>Inventario maximo</b>	
Patio	772
Frente 1	400
Frente 2	1811
Frente 3	1157
Frente 4	1261

Fuente: Creación propia del autor de este trabajo.

## 10.5 GUIA PARA EL USO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

A continuación se detalla el procedimiento para el uso de la herramienta

- i. En el software de SIAGRI, en el módulo eventos de Copfrot, consultar el informe No 100 “simulación eventos” y generar estadística.
- ii. Digitar esta información en el archivo de Excel “modelo II”. Siguiendo a continuación esta secuencia:
  - a) Programa diario: (Fila 4 y 5)
  - b) Tasas de eficiencia (Filas 11, 12,13)
  - c) Datos de transporte (Fila 15 hasta la 22)
  - d) Datos de capacidad de transporte (Fila 23 y 24)
  - e) Datos de molienda (Fila 6 y 18)
- iii. Una vez digitada la información, guardar.
- iv. Correr el modelo en Promodel pulsando el logo Play.
- v. Generar la estadística que contiene Promodel. Una vez finalizada la simulación, Promodel genera un cuadro de dialogo, preguntando si genera los resultados. Debe dar si a la respuesta.
- vi. La información obtenida es pegada a la hoja de Excel Resultados de simulación.

El tiempo de simulación es definida por el usuario. La ruta es

*Simulation-Options. Run time:* digita el tiempo requerido

## 11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del proyecto se identificaron y caracterizaron las situaciones críticas que alteran el programa diario, estas fueron simuladas en varios escenarios en un horizonte de corto plazo, el prototipo presenta un diagnóstico del proceso en tiempo real y proyecta lo que sucederá, permitiendo plantear múltiples reprogramaciones. Por lo tanto se cumple el objetivo de representar un modelo que genere alertas tempranas.

El administrador podrá evaluar diferentes necesidades de eficiencia, desde el punto de vista de definición de reglas de despacho, número de equipo en circulación, prioridades de descargue, uso de los trenes de vagones de avance en el campo para evaluar la reducción de la flota de transporte; establecer metas de entrada de caña por hora por cada frente, medir el impacto de aumentar el número de vagones por viaje o aumentar la capacidad de carga por vagón. También establecer un nivel de inventario adecuado en el campo y patio, evaluando así, los tiempos de espera y la continuidad de la molienda. Estas estrategias son realizadas actualmente en Excel, pero con la limitante de no tener en cuenta el flujo real de la caña y las esperas del proceso. Esta es otra ventaja del simulador, que permite recrear varios escenarios, sin afectar la operación y los costos de manufactura.

Se definieron los requerimientos de entrada de información, los cuales son aplicables a cualquier Ingenio azucarero. A través del modelo se Integró las variables endógenas y exógenas del sistema frente a las estadísticas, estructura y operación de un simulador, por lo tanto, los administradores de la logística pueden imitar la dinámica del proceso en tiempo real ante cualquier contingencia que se le presente y evalué el impacto de esta en el proceso de abastecimiento. Esto le permitirá reducir los márgenes de error y los riesgos de paros de molienda.

El modelo de simulación entrega estadísticas importantes para la toma de decisiones en la logística de cosecha. Los datos claves son: tiempos de espera en

cada fase, niveles de inventario en patio y campo, cantidades de caña entregadas a fábrica por cada frente, número de paros de molienda y tiempo transcurrido

Se cumplió el objetivo de construir y validar el modelo computacional. Funciona como un prototipo que imita un proceso de abastecimiento de un ingenio en particular, con las limitaciones que genera utilizar variables determinísticas. Si se quiere una mayor precisión y caracterizar las necesidades un ingenio específico, es necesario utilizar datos aleatorios o estocásticos con sus probabilidades de ajuste.

El validar el modelo con datos reales de operación, plantear varios escenarios y confrontar los resultados, nos permitió evaluar todo el contexto de la logística del proceso, visualizando el cumplimiento en cuanto a cantidad y tiempos de entrega al cliente final. Además este tipo de modelos permiten simular estrategias de operación que busquen mejorar la eficiencia de los equipos de transporte, reducir las colas y tiempos de espera de todas las entidades (caña, vehículos, vagones).

La diferencia con el estudio de optimización y asignación de equipos de transporte y cosecha en el sistema de abastecimiento de caña desarrollado en Crystal Ball, es que este busca calcular y asignar los recursos de acuerdo a las necesidades de un programa de molienda diaria, mientras que el modelo de simulación desarrollado en Promodel busca evaluar la continuidad de la molienda de acuerdo a los inventarios en el proceso, las condiciones de operación y las diferentes contingencias que se presentan durante la ejecución del programa.

El modelo en Promodel no optimiza recursos, ni calcula la flota de equipos. La finalidad es imitar toda la cadena de abastecimiento y evaluar la continuidad de la molienda, además de establecer los inventarios finales en patio y campo.

Se puede decir que ambos simuladores son complementarios, puesto que uno define la cantidad de equipos a utilizar y el otro imita la cadena de abastecimiento en tiempo real y proyecta lo que va a suceder si las condiciones se mantienen.

El modelo de simulación fue presentado en el Ingenio la Cabaña, logrando aceptación en los usuarios. Este será utilizado, con corridas en cada turno. Durante su uso, se evaluará su funcionalidad en la toma de decisiones y necesidades futuras. De esta reunión surgió la necesidad de aplicar modelos de simulación en procesos de campo como: fertilización, adecuación y preparación de terrenos. Además de establecer con el simulador, un modelo de colas, para mejorar el servicio de mantenimiento a los clientes.

La conclusión general de los usuarios del modelo fue la posibilidad que tienen de tomar decisiones y prever con anticipación lo que puede suceder en el proceso de abastecimiento ante cualquier problema que ocurra. Es una herramienta de trabajo que permite operar preventivamente y se alinea con la visión que tiene la División de Campo de lograr un mejoramiento continuo.

En el modelo queda pendiente realizar una segunda etapa, donde se tenga en cuenta los traslados de los frentes de una hacienda a otra cuando esta ha terminado de cargar todo el inventario disponible. También en las estadísticas del proceso se requiere la información de inventarios de caña en tránsito y determinar el tiempo total de paro de molinos por falta de caña.

Para la utilización del modelo a nivel comercial o para uso empresarial se recomienda comprar la licencia de Promodel. Con las ventajas del simulador se justifica la inversión, puesto que permitiría evitar paradas de fábrica por falta de caña, o establecer estrategias de mejora en el proceso, que permita hacer más eficiente la entrega de la caña a los molinos.

## 12. BIBLIOGRAFIA

IANNONI, A,P. MORABITO, R.2004. A discrete simulation analysis of a logistics supply system. Transportation research Part E. (December) Sao Carlos, Brasil

FILAELFO, Samuel.; PEREZ, Gina. Desarrollo de una alternativa para mejorar el enrutamiento actual de la empresa transportadora de carga y mensajería Colvanes Ltda. Barranquilla, 2003, 80 p. Trabajo de grado (Ingeniería industrial) Corporación Universitaria de la Costa.

GOLDEN, B.L; Wasil, E.A. (1987) Computerized vehicle Routing in the soft Drink Industry. Operations Research, 35:6-17.

AMU, Luis G, COBO, Diego F, ISAACS, Camilo H, GOMEZ, Adolfo (2007) Simulación de la logística de abastecimiento de caña utilizando el software Crystal Ball. Cenicafé

COSS Bu, R., Simulación, Un enfoque práctico, Editorial Limusa, México, 1990.

RIBEIRO RV, Hahn MH. Heuristic Guided Simulator for the Operational Planning of the Transport of Sugar Cane.1999. The Journal of the Operational Research Society, Vol. 50, No. 5 (may, 1999), pp. 451-459

JOHANSSON, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hagan, and E. Yücesan A simulation modeling framework for supply chain system analysis. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference

BALLOU Ronald H. Logística. administración de la cadena de suministros. Quinta edición. Pearson educación, Mexico,2004

PALENCIA, Oliverio. La cultura de confiabilidad operacional En: Congreso internacional de mantenimiento, VI, Universidad pedagógica de Colombia. P 2.

LARRAHONDO, J.; CASTILLO, S.; ISAACS, C.; CASTILLO, M.; GALVIS, M.;Peralta,Y. Calidad de la caña y las pérdidas de sacarosa después del corte bajo los sistemas de cosecha manual y mecanizada. En: Congreso colombiano de la Asociación colombiana de técnicos de la Caña de Azúcar, VIII, Cali, Colombia, 16 al 18 de septiembre de 2009. Memorias, Cali, TECNICAÑA, 2009. P 484.

LARRAHONDO, Jesús. Perdidas de sacarosa por arrumes de caña postcosecha. En: carta trimestral 1 de 1998. p 3-4

GARCIA, E.; GARCIA, H.; CARDENAS, L.; Simulación y análisis de sistemas con ProModel . Primera edición. Pearson educación, México, 2006

CALVO, Juliana.; Motta, Carlos. Simulación de un evento discreto aplicada a una empresa multinacional xyz en el sector de alimentos. Santiago de Cali, 2011. Universidad Icesi. Pag 32-52

JIMENEZ, Jose. Aplicación de Promodel en problemas de producción y logística para su implementación en el laboratorio de simulación en la Universidad pontificia Bolivariana. Bucaramanga. 2009. Universidad pontificia Bolivariana. Pag 27-39

CONSTANTINO Gerardo.; HERNÁNDEZ, Carina. En: Aplicación de simulación en el área de producción de empaques de la empresa EHUICO S.A. de C.V. para el incremento de su productividad. 2010. Vol. 4, p 6-18.