



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y  
MATEMÁTICAS

MAESTRÍA DE CONTROL DE OPERACIONES Y  
GESTIÓN LOGÍSTICA

**TESIS DE GRADUACIÓN**

LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE DISTRIBUCIÓN SECUNDARIOS EN  
LA CIUDAD DE QUITO PARA OPTIMIZAR EL COSTO DE  
DISTRIBUCIÓN DE BEBIDAS DURANTE PERIODOS DE ALTA  
DEMANDA

DIRECTOR:  
DR. KLEBER BARCIA VILLACRESES, PH.D.

ELABORADO POR:  
ING. CARLOS RONQUILLO FRANCO

ENERO – 2015



# ÍNDICE GENERAL

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
JUSTIFICACIÓN .....	9
OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	9
METODOLOGÍA USADA .....	9
ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	11
1. CAPÍTULO 1 .....	13
1.1. MARCO TEÓRICO: TEORÍA DE LA OPTIMIZACIÓN .....	13
1.1.1. MODELIZACIÓN .....	14
1.1.2. PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA .....	15
1.1.3. PROGRAMACIÓN LINEAL: .....	16
1.2. APLICACIONES DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL.....	18
1.2.1. RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE TRANSPORTE .....	18
1.2.2. RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE PLANIFICACIÓN DE PRODUCCIÓN.....	19
1.3. APLICACIONES DE LA PROGRAMACIÓN ENTERA.....	20
1.3.1. RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE ASIGNACIÓN .....	20
1.3.2. RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE RECUBRIMIENTO DE UN CONJUNTO .....	21
1.4. ALGUNOS PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE DISTRIBUCIÓN.....	22
2. CAPÍTULO 2 .....	24
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y LA EMPRESA.....	24
2.1.1. PERFIL DE LA EMPRESA .....	24
2.2. PRINCIPALES PROCESOS.....	24
2.3. DATOS DE ENTRADA DEL PROCESO .....	27
2.3.1. CONSIDERACIONES GENERALES.....	29
3. CAPÍTULO 3 .....	31
3.1. ESCENARIO ACTUAL .....	31

3.2.	INTERPRETACIÓN DEL ESCENARIO ACTUAL .....	34
3.2.1.	CONJUNTOS .....	34
3.2.2.	PARÁMETROS.....	35
3.2.3.	VARIABLES DE DECISIÓN .....	37
3.2.4.	RESTRICCIONES .....	39
3.2.5.	FUNCIÓN OBJETIVO.....	40
3.3.	VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN .....	43
3.4.	ROBUSTEZ DEL ESCENARIO ACTUAL .....	52
4.	CAPÍTULO 4 .....	54
4.1.	DESARROLLO DE ESCENARIO PROPUESTO.....	54
4.2.	LOCALIZACIÓN DE NUEVOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN .....	56
4.3.	INTERPRETACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LOCALIZACIÓN DE BODEGAS .....	58
4.3.1.	CONJUNTOS .....	58
4.3.2.	PARÁMETROS.....	58
4.3.3.	VARIABLES DE DECISIÓN .....	60
4.3.4.	RESTRICCIONES .....	60
4.3.5.	FUNCIÓN OBJETIVO.....	61
4.4.	INTERPRETACIÓN DEL ESCENARIO PROPUESTO.....	63
4.4.1.	CONJUNTOS .....	63
4.4.2.	PARÁMETROS.....	63
4.5.	RESULTADOS OBTENIDOS .....	66
4.6.	ANÁLISIS ECONÓMICO .....	72
4.6.1.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MODELOS .....	72
4.6.2.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CONTRA PRESUPUESTO ....	73
5.	CAPÍTULO 5 .....	75
5.1.	CONCLUSIONES.....	75
5.2.	RECOMENDACIONES.....	76
	ANEXOS .....	78
	ANEXO A. FORMULACIÓN DEL MODELO EN GAMS PARA PLAN DE TRANSPORTE .....	78

ANEXO B. FORMULACIÓN DEL MODELO EN GAMS PARA LOCALIZACIÓN DE BODEGAS.....	80
ANEXO C. RESOLUCIÓN DEL MODELO EN GAMS PARA LOCALIZACIÓN DE BODEGAS.....	82
ANEXO D. RESOLUCIÓN DEL MODELO EN GAMS PARA ESCENARIO PROPUESTO.....	85
ANEXO E. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA COMPROBAR LA DIFERENCIA DE MEDIAS.....	94
BIBLIOGRAFÍA .....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de resolución del proyecto .....	11
Figura 2. Representación del Transporte Logístico .....	26
Figura 3. Flujo de Producto entre los Nodos .....	26
Figura 4. Representación del Reparto desde Centros de Distribución .....	27
Figura 5. Capacidad de Almacenaje de Centros de Distribución.....	29
Figura 6. Volumen Promedio Transportado por Viaje.....	48
Figura 7. Horas Promedio de Viaje.....	48
Figura 8. Horas Promedio de Viaje.....	49
Figura 9. Crecimiento Porcentual de Ventas .....	53
Figura 10. Localización de sectores de ventas en Quito .....	57
Figura 11. Volumen Promedio Transportado por Viaje.....	69
Figura 12. Duración Promedio de Viaje por Semana .....	70
Figura 13. Horas Promedio de Uso Semanal por Trailer .....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad de Almacenaje de los Centros de Distribución .....	28
Tabla 2. Producción Semanal por Planta .....	43
Tabla 3. Detalle de Traslados y Stock del CD Guayaquil .....	44
Tabla 4. Detalle de Traslados y Stock del CD Quito.....	44
Tabla 5. Detalle de Traslados a los CD2s .....	46
Tabla 6. Resumen de Traslados desde CD2s a Distribuidores .....	46
Tabla 7. Detalle de Utilización de Operadores .....	47
Tabla 8. Detalle de Utilización de Operadores .....	50
Tabla 9. Detalle Parcial de Satisfacción de la Demanda .....	51
Tabla 10. Producción Semanal por Planta .....	67
Tabla 11. Detalles de Traslados y Stock por CD1 .....	67
Tabla 12. Detalles de Traslados y Stock por CD2 .....	68
Tabla 13. Detalle de Utilización de Operadores .....	69
Tabla 14. Detalle Parcial de Satisfacción de la Demanda .....	71
Tabla 15. Costo y Hectolitros de Acuerdo a Cumplimiento .....	72
Tabla 16. Datos de TL y T3 para Presupuesto y Escenario Propuesto .....	73
Tabla 17. Ratios \$/HL de TL y T3 para Presupuesto y Escenario Propuesto .....	74

## **INTRODUCCIÓN**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El costo de logística no es considerado actualmente por el cliente detallista o por el consumidor final como un valor agregado del producto. Esto conlleva que las empresas se enfoquen en ser efectivas en la generación de pedidos y/u órdenes de compra que incrementen su volumen de venta. Además, la logística debe ser eficiente, de forma que los costos de transporte, almacenamiento, preparación de la carga y distribución no contribuyan negativamente en el costo del producto.

Para una industria de consumo masivo, cuya curva de demanda presenta su época más alta para fin de año; es importante contar con un plan de producción adecuado. El propósito de este plan de producción es garantizar la satisfacción de la demanda. La capacidad de producción de las fábricas es menor a la venta en los periodos de alta demanda, por lo cual la empresa debe producir para almacenar stock. En el caso presentado, no solo es necesario poder tener capacidad de producción, sino también transportar, almacenar y distribuir a los clientes detallistas.

Para optimizar un proceso logístico se debe contar con un número adecuado de instalaciones, para lograr estar ubicados correctamente, cerca de los clientes y consumidores; cumpliendo con las regulaciones municipales de circulación de vehículos pesados en el casco urbano de una ciudad.

Adicionalmente a la restricción de espacio de almacenamiento, se debe también considerar restricciones en la capacidad de la flota para la movilización de producto a nivel nacional. Con lo cual es necesario determinar el plan de transporte para cubrir la demanda durante el periodo de mayor venta del año.



## **JUSTIFICACIÓN**

La tesis se centra en resolver el problema de localización de 2 nuevos centros de distribución en el Sur y Norte de Quito. Se debe considerar las nuevas restricciones de circulación vehicular en el casco urbano de la ciudad. Después de seleccionar los nuevos centros de distribución, se elaborará un plan nacional de transporte hacia el resto de centros de distribución de la red.

Con esto se logra dos temas: localizar centros de distribución de forma que no sean afectados los clientes detallistas; y, abastecer de producto a todas las localidades considerando las restricciones de capacidad de almacenaje y transporte a nivel nacional.

## **OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El objetivo general de este proyecto, es optimizar el costo de distribución de bebidas durante periodos de alta demanda; específicamente durante el mes de diciembre. De forma que la empresa de producción de bebidas, la cual será nombrada para este proyecto “Empresa de Bebidas ABC”; pueda recortar costos asegurando el abastecimiento a sus clientes detallistas.

Los objetivos específicos de este proyecto, son:

- Definir la cantidad de nuevos centros de distribución para la ciudad de Quito y su ubicación, de forma que se cumplan con las restricciones de circulación vehicular para el casco urbano.
- Desarrollar un plan de transporte desde las fábricas a los centros de distribución, que considere variables como kilómetros recorridos, costos de almacenaje, de forma que se logre abastecer a los centros de distribución garantizando la satisfacción de la demanda.

## **METODOLOGÍA USADA**

En este estudio se usan modelos de localización y modelos de transporte, los cuales son implementados mediante programación matemática. Una vez

seleccionados los centros de distribución secundarios y el plan de transporte se realiza un análisis costo – beneficio para justificar la selección.

Los datos requeridos, tanto para situación actual como propuesta son:

- Volumen de venta por zona geográfica
- Tarifas de almacenamiento por tipo de centro de distribución
- Costo de transporte entre centros de distribución a nivel nacional
- Costo de distribución a clientes y consumidores a nivel nacional

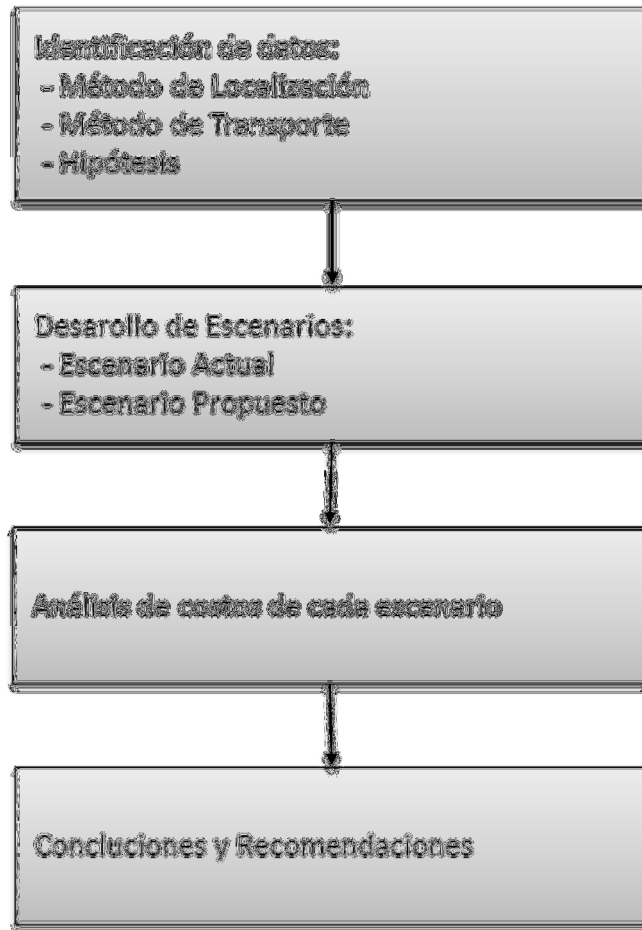
Se formula la hipótesis que el costo de distribución después de localizar los centros de distribución en Quito será menor que el costo de distribución actual.

Se desarrollan 2 escenarios

- Situación actual
- Situación propuesta

Cada escenario entrega una solución óptima del costo de distribución.

Los escenarios a desarrollar usan programación lineal minimizando la función objetivo. El algoritmo de solución es CPLEX. Se usa la tolerancia predefinida de GAMS.



**Figura 1. Representación esquemática de resolución del proyecto**

Para probar la hipótesis, se utiliza una prueba t, para determinar si el costo de distribución del escenario para la situación propuesta es menor. En la figura 1 se observa la representación esquemática de la resolución del proyecto.

## **ESTRUCTURA DEL PROYECTO**

Esta tesis se compone de 5 capítulos, con los cuales se resuelve el objetivo de la tesis, referente a la localización de instalaciones en la ciudad de Quito y obtener un plan de traslados para época de alta demanda.

En primera instancia se describe cuáles son los objetivos de la tesis y se describe el marco teórico de las técnicas de optimización a usar y como estas técnicas han sido usadas en estudios similares.

En el capítulo 2 de esta tesis se realiza una descripción general de la empresa, así como sus principales procesos y los datos a considerar en los modelos de optimización y de transporte. En adición, se describirá las características tanto de la red de distribución como de los camiones en los cuales se realiza el transporte entre centros de distribución y distribución a clientes detallistas.

En el capítulo 3 se expone el escenario actual, las variables que participan y como el mismo se administra en la actualidad. Es necesario exponer cada nodo de la red y sus consideraciones. Además en este capítulo, se verifican y validan los resultados del escenario, y, se prueba la robustez del escenario ante el incremento de volumen.

En el capítulo 4 se exponen los cálculos específicos de los escenarios generados para el escenario propuesto. En base a los resultados obtenidos se determina estadísticamente si existe diferencia entre los costos de distribución obtenidos y se determina económicamente cuál de los escenarios es el más adecuado.

En el capítulo 5 se enumeran las principales conclusiones y recomendaciones que se han obtenido en el desarrollo de esta tesis.

## 1. CAPÍTULO 1

### 1.1. MARCO TEÓRICO: TEORÍA DE LA OPTIMIZACIÓN

La teoría de la optimización (denominada programación matemática) intenta dar respuesta a un tipo general de problemas de la forma [Ref. 1]:

$$\text{Max (Min) } f(x)$$

$$x \in \Omega \subseteq \mathfrak{R}^n$$

$x = (x_1, \dots, x_n)$  es un vector que representa a las variables de decisión,  $f(x)$  es llamada función objetivo y mide la calidad de las decisiones y,  $\Omega$  es el conjunto de decisiones factibles o restricciones del problema. Muchas veces se puede expresar  $\Omega$  como un sistema de igualdades y/o desigualdades.

$\mathfrak{R}^n$  es el conjunto de soluciones, factibles o infactibles.

Un problema de optimización trata entonces de tomar una decisión óptima para maximizar (ganancias, velocidad, eficiencia, etc.) o minimizar (costos, tiempo, riesgo, error, etc.) un criterio determinado. Las restricciones significan que no cualquier decisión es posible.

Así, la programación matemática es una potente técnica de modelado usada para la toma de decisiones. Generalmente se deben cubrir las siguientes etapas [Ref. 1]:

1. La primera etapa consiste en identificar las posibles decisiones que pueden tomarse; esto lleva a identificar las **variables de decisión**. Normalmente estas variables son de carácter cuantitativo.
2. La segunda etapa supone determinar qué decisiones resultan factibles; esto conduce a un conjunto de **restricciones** que se determinan teniendo presente la naturaleza del problema en cuestión.
3. En la tercera etapa, se calcula el coste/beneficio asociado a cada decisión factible; esto supone determinar una **función objetivo** que asigna, a cada conjunto de variables de decisión, un valor de coste/beneficio total.

El conjunto de todos estos elementos define el ***problema de optimización***.

Las aplicaciones más comunes de la programación matemática son:

- Planificación de la producción
- Planificación del transporte
- Planificación de la cadena de abastecimiento (Supply Chain Planning)
- Control de inventarios
- Asignación de personal, de maquinaria
- Modelos financieros
- Flujo en redes
- Agricultura, uso de suelos
- Dietas
- Explotación y refinación de petróleo

### **1.1.1. MODELIZACIÓN**

Un modelo es una representación simplificada de la realidad, se puede decir que un objeto M es un modelo de una realidad R para un observador, si el observador puede obtener estudiando M las respuestas a las preguntas que se hace sobre R.

Así, una misma realidad puede ser representada por diferentes modelos, en función de las preguntas se realizan acerca de ésta. En general, un modelo es la simplificación de la realidad, considerando abstracciones matemáticas

Los pasos a seguir para resolver un problema mediante modelos son [Ref. 2]:

1. Modelización: Construcción y elaboración del modelo: proceso difícilmente sistematizable
2. Resolución: Se dirá que se ha resuelto el modelo cuando se haya podido responder a las preguntas por las cuales se formuló el modelo.
3. Explotación: Una vez obtenidos los resultados, estos deben ser interpretados y deben analizarse las implicaciones para la gestión del sistema afectado.

### 1.1.2. PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

Un problema de programación matemática general puede expresarse como:

$$\min(\max): f(X)$$

$$s.a. h(X) = 0$$

$$g(X) \leq 0$$

$$X \subseteq \mathfrak{R}^n$$

$x = (x_1, \dots, x_n)$  es un vector que representa a las variables de decisión,

$h(x)$  y  $g(x)$  son las restricciones del problema y,

$\mathfrak{R}^n$  es el conjunto de soluciones, factibles o no factibles.

Donde el problema de programación matemática cuenta con

- Función objetivo
- Restricciones del problema
- Variables continuas, discretas, binarias

La forma de resolver los problemas de programación matemática depende de la estructura de estos problemas. Se pueden clasificar en [Ref. 3]:

- Problemas de programación lineal (LP)

$$\min(\max): Z = c^T x$$

$$s.t. Ax \leq b$$

$$x \in \mathfrak{R}^n$$

Donde

$x = (x_1, \dots, x_n)$  es un vector que representa a las variables de decisión,

$c^T = (c_1, \dots, c_n)$  es el vector de costos asociados,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \text{ es la matriz de coeficientes adjuntos a las restricciones}$$

$b = (b_1, \dots, b_m)$  es el vector de límites asociados a las restricciones.

- Problemas de programación entera mixta (MIP)

$$\min Z = c^T x + a^T y$$

$$s.a. Ax + By - b \leq 0$$

$$x \geq 0, x \in IR, y \in \{0,1\}$$

$$x \in Z$$

$y = (y_1, \dots, y_n)$  es el vector de variables de decisión binarias

$a^T = (a_1, \dots, a_n)$  es el vector de costos asociados a las variables binarias,

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1m} \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ b_{m1} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix} \text{ es la matriz de coeficientes adjuntos a las restricciones}$$

$b = (b_1, \dots, b_m)$  es el vector de límites asociados a las restricciones,

- Problemas no lineales (Otros)

### 1.1.3. PROGRAMACIÓN LINEAL:

La programación lineal (LP), que trata exclusivamente con funciones objetivo y restricciones lineales, es una parte de la programación matemática, y una de las áreas más importantes de la matemática aplicada.



Se debe recalcar que todo problema de programación lineal requiere lo siguientes componentes [Ref. 1]:

- El conjunto de datos.
- El conjunto de variables involucradas en el problema, junto con sus dominios respectivos de definición.
- El conjunto de restricciones lineales del problema que definen el conjunto de soluciones factibles (admisibles).
- La función lineal que debe ser optimizada (minimizada o maximizada).

En forma general un problema de programación lineal puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \min(\max) Z &= c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\ \text{s.t. } a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ \dots a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \\ d_{11}x_1 + d_{12}x_2 + \dots + d_{1n}x_n &\geq b_{m+1} \\ d_{21}x_1 + d_{22}x_2 + \dots + d_{2n}x_n &\geq b_{m+2} \\ \dots d_{p1}x_1 + d_{p2}x_2 + \dots + d_{pn}x_n &\geq b_{m+p} \\ x_1, x_2, \dots, x_n &\in IR \end{aligned}$$

Donde

$x_i$  representa a las variables de decisión,

$c_i$  representa los costos asociados,

$a_{ij}$  y  $d_{ij}$  representa los coeficientes asociados a las restricciones del problema

$b_i$  representan los límites de las restricciones,

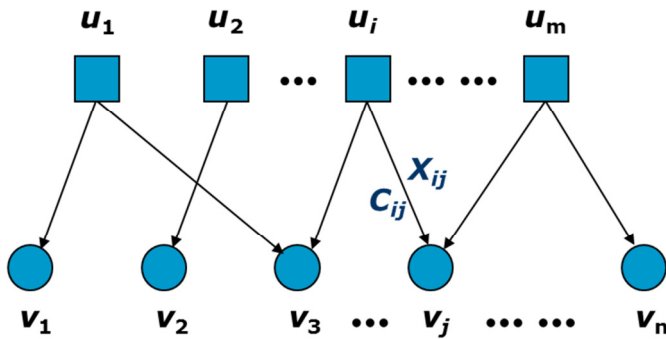
O, usando notación matricial el problema de programación lineal se plantea como:

$$\begin{aligned} \min(\max) : Z &= c^T x \\ \text{s.t. } Ax &\leq b \\ x &\in \mathfrak{R}^n \end{aligned}$$

## 1.2. APLICACIONES DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL

### 1.2.1. RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE TRANSPORTE

Considere el siguiente caso: Un cierto producto está disponible en determinadas cantidades  $u_1, \dots, u_m$ , en cada uno de  $m$  orígenes o depósitos, y debe recibirse en cantidades  $v_1, \dots, v_n$ , en cada uno de  $n$  destinos o puntos de demanda. El coste de envío de una unidad de producto desde el origen  $i$  al destino  $j$  representado con  $c_{ij}$  es conocido. El problema consiste en determinar las cantidades  $x_{ij}$ , que deben enviarse desde el origen  $i$  al destino  $j$ , para satisfacer la demanda y minimizando el coste total del envío [Ref. 3].



Se puede observar que el problema es factible si:

$$\sum_{i=1}^m u_i \geq \sum_{j=1}^n v_j$$

Así, el modelo LP del problema equilibrado es:

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq u_i; \quad i = 1, \dots, m \\ &\sum_{i=1}^m x_{ij} = v_j; \quad j = 1, \dots, n \\ &x_{ij} \geq 0 \end{aligned}$$

Donde

$x_{ij}$  representa a las variables de decisión,

$c_i$  representa los costos asociados,

$u_i$  y  $v_j$  representan los orígenes y destinos de productos,

$b_i$  representan los límites de las restricciones.

### 1.2.2. RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE PLANIFICACIÓN DE PRODUCCIÓN

Un productor fabrica una pieza, cuya demanda varía en el tiempo. El productor debe siempre atender la demanda mensual. Se dispone de los siguientes datos

[Ref. 3]:

$n$ : el número de meses a considerar

$s_0$ : la cantidad almacenada disponible al principio del periodo considerado

$x_t$ : la cantidad de piezas producidas en el mes  $t$

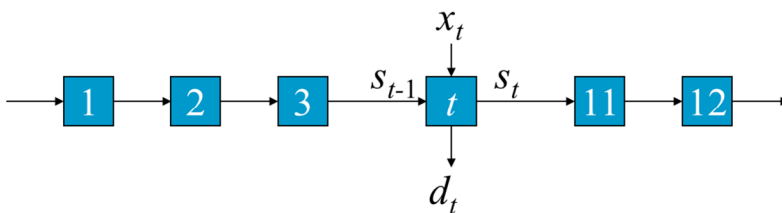
$d_t$ : el número de unidades (demanda) que se solicita en el mes  $t$

$s^{\max}$ : la capacidad de máxima de almacenamiento

$a_t$ : el precio de venta en el mes  $t$

$b_t$ : el costo de producción en el mes  $t$

$c_t$ : el costo de almacenar en el almacén  $s_t$



Luego el modelo (LP) para resolver este problema es:

$$\max Z = \sum_{t=1}^n (a_t d_t - b_t x_t - c_t s_t)$$

$$s.t. \quad s_{t-1} + x_t - d_t = s_t; \quad t = 1, \dots, n$$

$$s_t \leq s^{\max}; \quad t = 1, \dots, n$$

$$s_t, x_t \geq 0$$

## Programación Entera

Estos problemas también son llamados problemas de programación lineal en números enteros (IP), en los cuales la función objetivo y las restricciones son lineales, y las variables de decisión toman solo valores enteros.

$$\min(\max): Z = c^T x$$

$$s.a. \quad Ax - b \leq 0$$

$$x \geq 0 \quad x \in Z^n$$

En particular si algunas variables deben tomar valores enteros, binarios y otros valores reales se dice Programa lineal mixto (MIP)

$$\min Z = c^T x + a^T y$$

$$s.a. \quad Ax + By - b \leq 0$$

$$x \geq 0, x \in \mathbb{R}^n, y \in Z^n$$

### 1.3. APLICACIONES DE LA PROGRAMACIÓN ENTERA

#### 1.3.1. RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE ASIGNACIÓN

Se tienen  $n$  tareas a ejecutar por  $n$  operadores, cada operador debe ejecutar una tarea y solo una. Se conoce el costo de ejecución  $c_{ij}$  de la tarea  $i$  por el operador  $j$ , el objetivo es determinar la asignación óptima de tareas (que minimice el costo total de la asignación) [Ref. 3].

Datos:

$n$ : Número de tareas

$c_{ij}$ : costo de asignar la tarea  $i$  al operador  $j$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la tarea } i \text{ es ejecutada por el operador } j \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

El modelo formulado tendría la siguiente estructura:

$$\begin{aligned}
\text{Min } z &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\
\text{s.t. } \sum_{i=1}^n x_{ij} &= 1; \quad j = 1, 2, \dots, n \\
\sum_{j=1}^n x_{ij} &= 1; \quad i = 1, 2, \dots, n \\
x_{ij} &\in \{0, 1\}
\end{aligned}$$

### 1.3.2. RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE RECUBRIMIENTO DE UN CONJUNTO

Se debe decidir la instalación de centros de seguridad de entre  $n$  posibles de tal suerte que se cubran  $m$  regiones. Para cada centro de seguridad  $j$  se conocen los costos de instalación  $c_j$  y el subconjunto de regiones que el centro puede cubrir. El objetivo es la elección de un subconjunto de centros de seguridad que cubran todas las regiones y minimicen los costos de instalación [Ref. 3].

Datos:

$n$ : Número de posibles centros de seguridad

$m$ : Número de regiones a cubrirse

$c_j$ : costo de instalar el centro  $j$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la región } i \text{ es cubierta por el centro } j \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{si se construye el centro } j \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

El modelo formulado tendría la siguiente estructura:

$$\begin{aligned}
\text{Min } z &= \sum_{j=1}^n c_j x_j \\
\text{s.t. } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\geq 1; \quad i = 1, 2, \dots, m \\
x_j &\in \{0, 1\}
\end{aligned}$$

#### **1.4. ALGUNOS PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE DISTRIBUCIÓN**

Referente a localización de centros de distribución, se han desarrollado diversos estudios, se adjuntan resúmenes de algunos estudios a continuación

##### **Modelación Multicriterio para la localización de dos centros de distribución para la empresa Mis-ver [Ref. 4].**

Este trabajo hace énfasis en que no solamente se deben considerar los costos logísticos para efectuar la localización de los centros de distribución. También es necesario contemplar otras variables. En el caso de la empresa Mis-ver, se ha considerado las variables de Riesgo Social y Delincuencia. Considerando los costos de transportes, de almacenamiento y los índices de delincuencia de las ciudades consideradas como posibles candidatas para ubicar los dos centros de distribución; se construyó un modelo de programación matemática, para optimizar la red logística de la empresa antes mencionada. Los resultados de la programación determinaron la localización de los centros de distribución en las ciudades con menores índices de delincuencia.

##### **Optimización de una red de transporte combinado para la exportación del carbón del interior de Colombia [Ref. 5]**

En este trabajo, se estudió una red de transporte multimodal, para poder establecer rutas de extracción del carbón desde las minas localizadas en el interior del país hasta los puertos costeros. Se determinó un grafo con todos los nodos y arcos de la red, considerando las redes a construir con horizonte del año 2019. Se buscó las rutas óptimas por medio de un modelo de programación matemática, resolviendo un problema de flujo a mínimo costo, considerando la red de transporte por carretera, fluvial y ferroviaria; además las terminales multimodales que integran el sistema ferroviario – fluvial y carretera – fluvial.

### **Modelo continuo de localización y diseño para un centro de distribución en ambiente competitivo [Ref. 6]**

Los autores han desarrollado un modelo de localización continuo de un centro de distribución bajo demanda incierta, proponiendo un modelo no lineal con restricciones. Como resultado del modelo, se puede determinar además de la localización los precios y nivel de servicio para un nuevo proveedor. Los modelos fueron usados a escala industrial.

### **Localización de facilidades y manejo de la cadena de suministro, una reseña [Ref. 7]**

En el trabajo adjunto, los autores describen la importancia de la localización de instalaciones, como un factor crítico de éxito en el diseño estratégico de las cadenas de cadena logísticas. Se identifican características que los modelos deben capturar para dar soporte al proceso de decisión. En esto proceso debe considerar la logística inversa. Además se presentan muchas aplicaciones de estos modelos a varios tipos de industrias.

### **Localización óptima de centros de cross docking para una red de distribución en Argentina [Ref. 8]**

Esta tesis tiene por objetivo definir una óptima red de distribución en Argentina usando cross-docking. Los productos salen desde una bodega central, localizada en Buenos Aires y deben ser distribuidos a cientos de locaciones al interior del país. Para lograr eficiencias, se propone el uso de centros de cross-docking y operadores logísticos. Además se desarrolló un modelo de programación matemática que considera las demandas de cada localidad. El modelo logró ahorros del 5% comparado con la situación inicial.

## **2. CAPÍTULO 2**

### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y LA EMPRESA**

#### **2.1.1. PERFIL DE LA EMPRESA**

El proyecto se enfoca en una empresa de bebidas (alcohólicas y no alcohólicas), que produce entre sus productos más destacados cerveza rubia tipo Pilsen, con un grado alcohólico de 4.2° grados de licor por volumen (G.L.). La permanencia en el mercado de esta bebida supera los 95 años teniendo la mayor participación en el mercado nacional. Las fábricas de la empresa se localizan en las dos principales ciudades del país (Guayaquil y Quito), desde donde se distribuye cerveza a 130.000 puntos de venta a nivel nacional.

Las unidades mínimas de almacenamiento se obtienen de combinar la marca de la cerveza, el contenido en centímetros cúbicos, cantidad de unidades y condición de uso de la botella (descartable o no). A las unidades mínimas de almacenamiento se las conoce como presentación, o, SKU (stock keeping unit). El SKU de mayor venta es la caja de 12 unidades de 600 c.c. La participación del mercado de este tipo de unidad de venta ha variado de tener una participación casi absoluta (cercano al 90%) a proyectar un descenso hasta el 55% de participación. La empresa, además de este tipo de bebida cuenta con la producción de agua y malta. Aunque estas categorías siguen un proceso productivo similar, todas pueden ser envasadas en las cinco líneas de producción que posee la empresa en sus dos fábricas.

#### **2.2. PRINCIPALES PROCESOS**

El proceso productivo contempla los siguientes pasos:

- Molienda;
- Maceración, filtración, cocción, sedimentación y enfriamiento (en la sala de cocimiento);
- Fermentación, maduración y filtración(en la bodega de frío), embotellado; y,



- Almacenaje.

Las fábricas no tienen la capacidad de producción semanal necesaria para abastecer la demanda de la última quincena del año; por lo que es necesario adelantar la producción durante los meses de octubre y noviembre, para generar stocks, y así suplir la demanda en el mes de más alta demanda.

La productividad de esta empresa, que tiene 7 marcas: 5 de cerveza, 1 de malta y una de agua, se ve afectada en la planta de Quito (que produce dos de las marcas 1 de cerveza y agua) por los cambios de setups. En el caso de la otra planta ubicada en Guayaquil la productividad se mantiene óptima debido a que cuenta con tres líneas de producción.

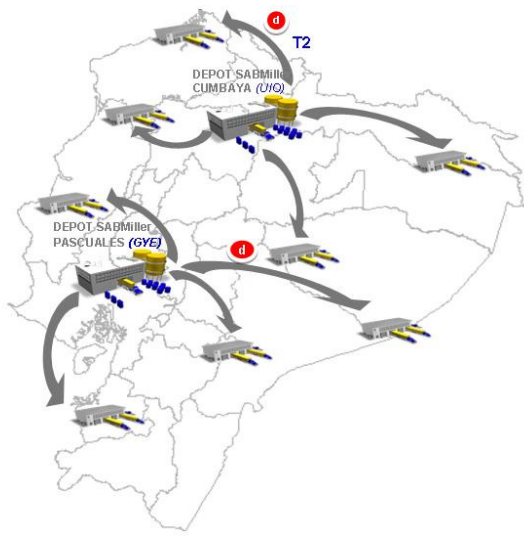
Conociendo el pronóstico de la demanda y el plan de producción, se establece un plan de traslados de producto desde las dos instalaciones de la empresa, hasta el consumidor final, garantizando la total satisfacción de la demanda.

Los centros de distribución adjuntos a las dos fábricas de la empresa durante este periodo también realizan actividades de preparación para atender las futuras necesidades productivas en época de alta demanda, tales como: la recepción de materias primas indirectas: bultos de botellas, cartones, material de empaque; limitando el espacio para el almacenamiento de producto. Por esta razón se debe trasladar producto terminado desde las fábricas hasta los centros de distribución secundarios previamente.

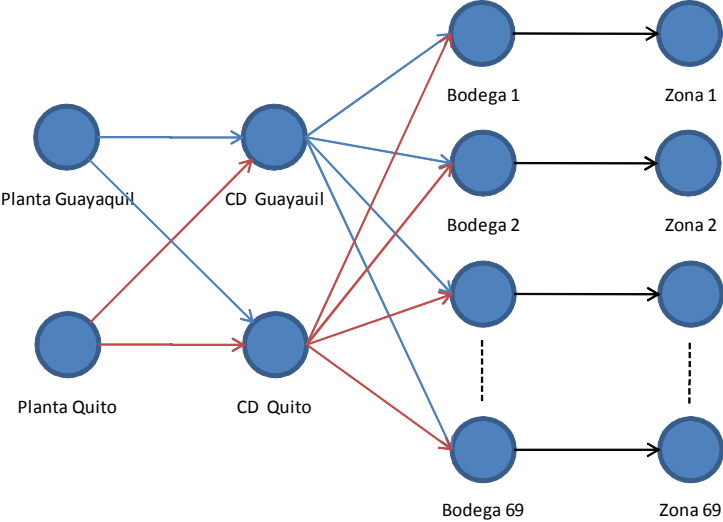
El transporte del producto desde las fábricas hasta los centros de distribución, gestionado por un operador logístico, tiene como restricción una flota de 85 tráileres, pudiendo subcontratarse más tráileres con otro operador.

Como se indicó anteriormente la empresa cuenta con dos fábricas, cada una de las cuales tiene anexa un centro de distribución, por tal motivo el costo de traslado

entre las plantas y sus respectivos centros de distribución es cero. Como no todas las presentaciones se producen en cada una de las fábricas, se debe trasladar producto entre los centros de distribución (Figura 2). El flujo de producto entre los nodos de la red está representado en la figura 3.



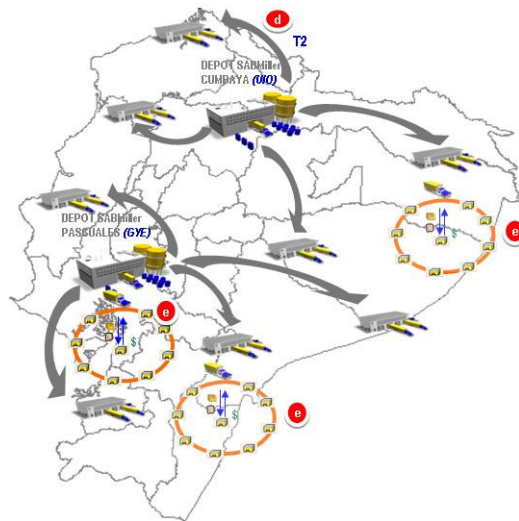
**Figura 2. Representación del Transporte Logístico**



**Figura 3. Flujo de Producto entre los Nodos**

En los centros de distribución, operan dos tipos de flotas:

- La flota de los operadores de transporte logístico (operador logístico A, que tiene relación a largo plazo con la empresa, y, el operador logístico C, que son subcontractados por temporada), que lleva producto desde las fábricas hasta los centros de distribución a nivel de provincial; y,
- La flota de reparto de las ciudades, que sale también desde los centros de distribución hasta el mercado local (Figura 4).



**Figura 4. Representación del Reparto desde Centros de Distribución**

Como condición de la compañía, los distribuidores no pueden invadir las zonas de los demás distribuidores.

### **2.3. DATOS DE ENTRADA DEL PROCESO**

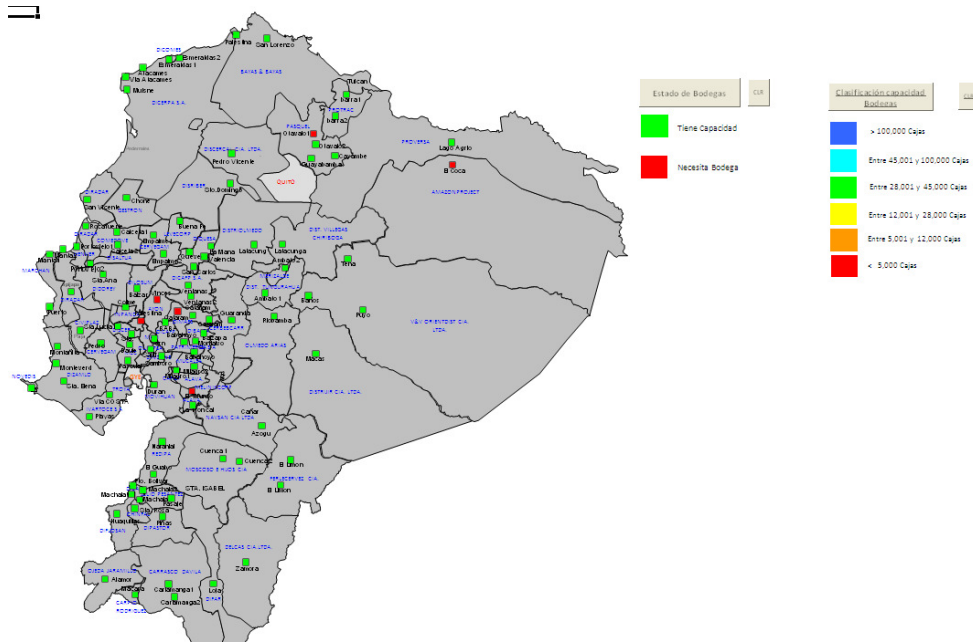
El proceso contempla 4 grupos de datos: Producción, Transporte, Almacenaje y Demanda. Los datos pueden ser de dos tipos: cantidad de activos/recursos; y, capacidades en hectolitros.

- Producción: dos Fábricas, la fábrica de Guayaquil puede producir 64,800 HI, mientras que la fábrica de Quito puede producir 28,800 HI.
- Transporte: el operador logístico A tiene 85 tráileres, siendo la capacidad máxima de carga 125 HI por tráiler.

- Almacenaje: se consideran 69 centros de distribución, cada uno localizado en la zona de ventas. En la tabla 1 se muestra las capacidades de los centros de distribución. Mientras que en la figura 5 se puede apreciar la localización geográfica y capacidad de almacenaje de los centros de distribución a nivel nacional.
- Demanda: se considera la demanda estimada de cada una de las zonas de ventas. En este proyecto se considera que la demanda estimada va a ser atendida.

Bodega	Capacidad (HI)	Bodega	Capacidad (HI)	Bodega	Capacidad (HI)
1	4585	24	5210	60	1670
2	12972	25	1100	78	16342
3	3982	26	3751	79	3334
4	6252	27	1008	80	1845
5	4168	28	16787	81	6252
6	6252	29	807	82	6043
7	2501	30	1008	83	1175
8	1603	31	375	84	834
9	7113	32	2501	85	875
10	2205	33	5024	86	2501
11	5001	34	18756	87	10629
12	21704	35	4501	88	7919
13	7768	36	20840	89	2987
14	7052	37	1719	90	6252
15	5210	38	4668	91	5418
16	9543	39	3334	92	6252
17	2740	40	4255	93	1580
18	772	41	1008	94	375
19	360	42	1008	95	4585
20	432	43	1635	96	2160
21	1008	44	11253	97	2880
22	23215	47	360		
23	1801	54	3638		

**Tabla 1. Capacidad de Almacenaje de los Centros de Distribución**



**Figura 5. Capacidad de Almacenaje de Centros de Distribución**

### 2.3.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Las condiciones a considerar para plantear la resolución al problema determinado son las siguientes:

- La unidad de análisis de la compañía son hectolitros.
- Planeación de la demanda:
  - Los planes de producción deben considerar que los procesos de embotellado, fermentación, filtración y cocimiento de la cebada, dependiendo de la marca de la bebida puede durar entre 15 a 35 días. Por lo tanto es necesario conocer con suficiente antelación la demanda estimada por presentación.
  - El horizonte mínimo para estimar la demanda es de tres meses, el cual es el tiempo que toma al proveedor de materia prima poner su mercadería en las fábricas. Se toma como datos las ventas mensuales de las líneas de productos de forma agregada.

- El pronóstico de demanda se pondera para llevarlo a una estimación por semanas, para un periodo de 24 semanas (iniciando el 1 de agosto, hasta el término de la temporada pico de ventas 1 enero).
- Para efectos de mejor análisis, el pronóstico de demanda es calculado de forma agregada a nivel nacional, y luego se pondera por distribuidor y por SKU.
- Operadores Logísticos y Distribuidores
  - La disponibilidad de transportistas comprende la flota propia de 85 tráileres (operador logístico A) y la subcontratación de 40 tráileres en reserva (operador logístico C).
  - Se consideran 67 distribuidores de provincias, y, 30 distribuidores de ciudades principales. Como los distribuidores de ciudades son atendidos desde las fábricas, no administran centros de distribución, y no requieren el uso de tráileres para su abastecimiento.
- Clientes Detallistas
  - La compañía atiende a través de sus distribuidores a 130.000 detallistas a nivel nacional. Los detallistas están agrupados por sectores de venta y cada sector está caracterizado por tamaños promedios de entrega, densidad de clientes detallistas, capacidad de almacenaje, y, volumen promedio mensual entregado. Estos cuatro parámetros inciden en la tarifa de reparto por sector y en la configuración de la flota del distribuidor.

### 3. CAPÍTULO 3

#### 3.1. ESCENARIO ACTUAL

Para el escenario actual, se consideran los datos de entrada del proyecto, los cuales son: Capacidad de Producción, Capacidad de Transporte, Capacidad de Almacenaje y Demanda. Estos datos son expresados en la unidad de medida hectolitros (Hl).

Se muestran en notación matricial los datos de entrada:

- Capacidad de producción de las plantas

$$Cap\_Prod = \begin{bmatrix} 64,800 \\ 28,800 \end{bmatrix}$$

- Capacidad de almacenaje de los centros de distribución primarios (CD1)

$$Cap\_Alm = \begin{bmatrix} 50,000 \\ 22,300 \end{bmatrix}$$

- Capacidad de almacenaje de los centros de distribución de provincias (CD2)

$$Cap\_Dist = \begin{bmatrix} 4,585 \\ 12,972 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 2,880 \end{bmatrix}$$

- Capacidad de transporte en los camiones de los operadores: 125 Hl.
- Demanda estimada del territorio por semana

$$Demanda = \begin{bmatrix} 187 & 682 & \dots & 762 \\ 690 & 2,386 & \dots & 2,855 \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ 390 & 1,364 & \dots & 1,656 \end{bmatrix}$$

Adicionalmente, la empresa mantiene un sistema de costeo por actividad, diferenciando entre costos fijos y variables. En el caso de las actividades de

Abastecimiento y Distribución, la mayoría de los costos son variables. Las actividades que se controlan son:

- Costos Fijos
  - Gestión de Administración y Talleres del Operador A  
\$10.000 / Semana (si se usa alguno de los 85 camiones del operador)
  - Alquiler Semanal de Camiones del Operador C  
\$150 / Camión / Semana (valor pagado a cada dueño de camión semanalmente)
- Costos Variables
  - Abastecimiento a centros de distribución primarios (adjuntos a las fábricas) desde plantas, expresado en dólares por hectolitros transportados (\$/Hl).

$$\begin{array}{c}
 \text{CD} \\
 \begin{array}{cc}
 1 & 2 \\
 \text{Plantas} \begin{array}{l} 1 \\ 2 \end{array} \begin{bmatrix} 0.00 & 4.96 \\ 4.41 & 0.00 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \end{array}$$

- Abastecimiento a centros de distribución de provincias (CD2) desde los centros de distribución primarios (CD1), expresado en dólares por hectolitros transportados (\$/Hl). Cabe recalcar, cuando una ruta no es factible su costo representado por valores extremadamente elevados.

$$\begin{array}{c}
 \text{CD2} \\
 \begin{array}{cc}
 1 & 2 \\
 \text{CD1} \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 69 \end{array} \begin{bmatrix} 1.44 & 10,000 \\ 3.30 & 10,000 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 10,000 & 3,30 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \end{array}$$



- Reparto a consumidores, expresado en dólares por hectolitros repartidos. Como se explicó anteriormente, el costo de reparto varía según la configuración del sector de reparto.

$$\begin{array}{c}
 \text{CD2} \\
 \begin{array}{c}
 1 \\
 2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 69
 \end{array}
 \left[ \begin{array}{cccc}
 & \text{1} & \text{2} & \dots & \text{69} \\
 & 8 & 10,000 & \dots & 10,000 \\
 10,000 & & 5 & \dots & 10,000 \\
 \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\
 10,000 & 10,000 & \dots & & 8
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

- Costo de Almacenaje de los Centros de Distribución Primarios, expresado en dólares por hectolitros almacenados, siendo estos los costos generados por los almacenes por concepto de gas para montacargas, materiales de embalaje, roturas imputadas a los montacarguistas.

$$\begin{array}{c}
 \text{Guayaquil} \\
 \text{Quito}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 1 \\
 2
 \end{array}
 \left[ \begin{array}{c}
 1.00 \\
 0.92
 \end{array} \right]$$

- Costo de Almacenaje de los Centros de Distribución de Provincias, expresado en dólares por hectolitros almacenados (\$/HI). Estos costos han sido calculados considerando la capacidad de almacenaje, la cantidad de montacargas operando, el volumen promedio mensual recibido en el centro de distribución.

$$\text{CD2} \begin{array}{c}
 1 \\
 2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 69
 \end{array}
 \left[ \begin{array}{c}
 2.08 \\
 1.31 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 1.56
 \end{array} \right]$$

En el abastecimiento desde los centros de distribución primarios (CD1) a los centros de distribución de provincias (CD2) se observan dos escenarios:

- Abastecimiento con el operador logístico A. Con este operador se tiene:
  - Un contrato a largo plazo.
  - Tarifas reducidas 15% con respecto al precio modal del mercado
  - Pago de gastos fijos al operador por cada semana donde se use alguno de los camiones
  
- Abastecimiento con el operador logístico C. Este operador reúne un grupo de transportistas independientes, cuya actividad económica actual es proveer transporte a varias compañías. Con este operador se han negociado las siguientes condiciones:
  - Contratos semanales por camión alquilado
  - Tarifas de acuerdo al precio modal del mercado

### **3.2. INTERPRETACIÓN DEL ESCENARIO ACTUAL**

El escenario actual propone programación lineal entera para generar el plan de transporte. El modelo matemático está conformado de la siguiente manera:

#### **3.2.1. CONJUNTOS**

***i***: representación de las fábricas productoras, se nombra 1 a Guayaquil, y 2 a Quito.

***j***: representación de los centros de distribución primarios (CD1), se nombra 1 a Guayaquil, y 2 a Quito.

***k***: representación de los centros de distribución de provincias (CD2), se numeran desde el 1 al 69.

***p***: representación de los sectores de ventas, se numeran desde el 1 al 69.

*l*: representación de la semana del plan, se numeran desde el 1 al 25.

*m*: representación de los tráileres del operador logístico A, se numeran desde el 1 al 85.

*n*: representación de los tráileres del operador logístico C, se numeran desde el 1 al 40.

### 3.2.2. PARÁMETROS

- Capacidad de producción de las plantas ( $Cap\_Prod_i$ )

$$Cap\_Prod = \begin{bmatrix} 64,800 \\ 28,800 \end{bmatrix}$$

- Capacidad de almacenaje de los centros de distribución ( $Cap\_Alm_j$ )

$$Cap\_Alm = \begin{bmatrix} 50,000 \\ 22,300 \end{bmatrix}$$

- Capacidad de almacenaje de los distribuidores ( $Cap\_Dist_k$ )

$$Cap\_Dist = \begin{bmatrix} 4,585 \\ 12,972 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 2,880 \end{bmatrix}$$

- Capacidad de transporte en los camiones de los operadores: 125 HI.
- Costo Fijo de utilizar el operador logístico A en la semana *l*: \$10.000
- Costo fijo de utilizar el camión *n* del operador logístico C en la semana *l*: \$150
- Costo variable de almacenaje de los centros de distribución primarios ( $Cost\_Alm_j$ ).

$$Cost\_Alm = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.92 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de almacenaje de los centros de distribución secundarios ( $Cost\_Dist_k$ )

$$Cost\_Dist = \begin{bmatrix} 2.08 \\ 1.31 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1.56 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de transporte primario entre CD1 ( $Transp_{i,j}$ )

$$Transp_{2,2} = \begin{bmatrix} 0.00 & 4.96 \\ 4.41 & 0.00 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de reparto por distribuidor en cada sector de venta ( $Reparto_{k,p}$ )

$$Reparto_{69,69} = \begin{bmatrix} 8 & 10,000 & \dots & 10,000 \\ 10,000 & 5 & \dots & 10,000 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 10,000 & 10,000 & \dots & 8 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de transporte logístico realizado por el operador A ( $Transl_{j,k}$ )

$$Transl_{69,2} = \begin{bmatrix} 1.44 & 10,000 \\ 3.30 & 10,000 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 10,000 & 3,30 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de transporte logístico realizado por el operador C ( $Translc_{j,k}$ )

$$Translc_{69,2} = \begin{bmatrix} 1.66 & 10,000 \\ 3.80 & 10,000 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 10,000 & 3,80 \end{bmatrix}$$

- Demanda estimada del territorio por semana ( $Demanda_{p,i}$ )

$$Demanda_{69,25} = \begin{bmatrix} 187 & 682 & \dots & 762 \\ 690 & 2,386 & \dots & 2,855 \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ 390 & 1,364 & \dots & 1,656 \end{bmatrix}$$

- Duración de viajes desde los centros de distribución a las bodegas de los distribuidores ( $Duracion_{k,j}$ )

$$Duracion_{69,2} = \begin{bmatrix} 5.72 & 10,000 \\ 15.31 & 10,000 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 10,000 & 12.57 \end{bmatrix}$$

Los parámetros de capacidad están expresados en hectolitros, los costos fijos están expresados en unidades monetarias, los costos variables están expresados en unidades monetarias por hectolitro movilizado, la duración de los viajes están expresados en horas semanales, y, la demanda semanal en hectolitros.

### 3.2.3. VARIABLES DE DECISIÓN

Estas contemplan el volumen movilizado, de plantas hasta centros de distribución, de centros de distribución a bodegas, de bodegas a sectores de distribuidores;

además se contempla el stock resultante al final de la semana, tanto en los centros de distribución como en las bodegas de los distribuidores. Otras variables de decisión importantes es el producto trasladado por camión de cada operador por semana, los viajes realizados por camión.

**$S1_{j,l}$** : stock del CD1  $j$  en la semana  $l$

**$S2_{k,l}$** : stock del CD2  $k$  en la semana  $l$

**$X1_{i,j,l}$** : producto enviado desde la fábrica  $i$  al CD1  $j$  en la semana  $l$

**$X2_{j,k,l}$** : producto enviado desde el CD1  $j$  al CD2  $k$  en la semana  $l$

**$X3_{k,p,l}$** : producto enviado desde el CD2  $k$  a la zona  $p$  en la semana  $l$

**$TL_{l,j,k,m}$** : producto enviado en la semana  $l$  desde el CD1  $j$  al CD2  $k$  en el tráiler  $m$  del proveedor A

**$Vj1_{l,j,k,m}$** : viaje realizado en la semana  $l$  desde el CD1  $j$  al CD2  $k$  en el tráiler  $m$  del proveedor A

**$B1_{l,j,k,n}$** : producto realizado en la semana  $l$  desde el CD1  $j$  al CD2  $k$  en la plataforma  $m$  del proveedor B

**$B2_{l,j,k,n}$** : producto realizado en la semana  $l$  desde el CD1  $j$  al CD2  $k$  en el tráiler  $n$  del proveedor C

**$Vj2_{l,j,k,n}$** : viaje realizado en la semana  $l$  desde el CD1  $j$  al CD2  $k$  en el tráiler  $m$  del proveedor C

**$Adm_l$** : Verificación de uso de los  $m$  tráileres en la semana  $l$

**$Flt_{l,n}$** : verificación de uso de los tráileres  $n$  en la semana  $l$

**$Gasto$** : costo de transporte total desde planta al mercado

Las variables  $S1_{j,l}$ ,  $S2_{k,l}$ ,  $X1_{i,j,l}$ ,  $X2_{j,k,l}$ ,  $X3_{k,p,l}$ ,  $TL_{l,j,k,m}$ ,  $B1_{l,j,k,n}$ ,  $B2_{l,j,k,n}$  son variables positivas; mientras las variables  $Vj1_{l,j,k,m}$ ,  $Vj2_{l,j,k,n}$ ,  $Adm_l$ ,  $Flt_l$  son variables binarias.

### 3.2.4. RESTRICCIONES

Las restricciones consideran los siguientes escenarios: balance de inventario tanto en los centros de distribución primarios como en los centros de distribución de provincias; capacidades de fábrica, de almacenaje de los centros de distribución, de almacenaje de las bodegas de los distribuidores, de carga de camiones; duración de viaje de camiones; horas disponibles por camión a la semana; y, satisfacción de la demanda por semana.

Las restricciones se detallan a continuación:

- *Restricciones de Balance de Flujo*

$$Bal\_Almacen_{j,l} \rightarrow S1_{j,l-1} + \sum_{i=1}^2 X1_{i,j,l-1} - \sum_{k=1}^{69} X2_{j,k,l} = S1_{j,l}$$

$$Bal\_Distrib_{k,l} \rightarrow S2_{k,l-1} + \sum_{j=1}^2 X2_{j,k,l-1} - \sum_{p=1}^{69} X3_{k,p,l} = S2_{k,l}$$

- *Restricción de balance de carga*

$$PlanTL_{l,j,k,n} \rightarrow \sum_{i=1}^{85} TL_{l,j,k,m} + \sum_{i=1}^{40} B1_{l,j,k,n} + \sum_{i=1}^{40} B2_{l,j,k,n} \leq X2_{j,k,l}$$

- *Restricción de Satisfacción de la Demanda*

$$Satisf\_Demanda_{k,l} \rightarrow \sum_{p=1}^{69} X3_{k,p,l} = Demanda_{k,l}$$

- *Restricciones de Capacidades*

$$Cap\_Fabrica_{i,l} \rightarrow \sum_{j=1}^2 X1_{i,j,l} \leq Cap\_Prod_i$$

$$Cap\_Centros_{j,l} \rightarrow S1_{j,l} \leq Cap\_Alm_j$$

$$Cap\_Distribuidores_{k,l} \rightarrow S2_{k,l} \leq Cap\_Dist_k$$

$$Cap\_Trailers_{l,j,k,m} \rightarrow TL_{l,j,k,m} \leq 125$$

$$Cap\_Plat_{l,j,k,n} \rightarrow B2_{l,j,k,n} \leq 125$$

- *Restricción de duración de viajes*

$$Horas1_{m,l} \rightarrow \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} (Vj1_{l,j,k,m} * Duracion_{k,j}) \leq 168$$

$$Horas2_{n,l} \rightarrow \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} (Vj2_{l,j,k,n} * Duracion_{k,j}) \leq 168$$

- *Restricciones para contratación de flota*

$$Viajes1_{l,j,k,m} \rightarrow TL_{l,j,k,m} \leq 10,000 * Vj1_{l,j,k,m}$$

$$Viajes2_{l,j,k,n} \rightarrow B2_{l,j,k,n} \leq 10,000 * Vj2_{l,j,k,n}$$

$$Contrato_l \rightarrow \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} \sum_{m=1}^{85} Vj1_{l,j,k,m} \leq 10,000 * Adm_l$$

$$Flete_l \rightarrow \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} Vj2_{l,j,k,n} \leq 10,000 * Flt_{l,n}$$

### 3.2.5. FUNCIÓN OBJETIVO

El objetivo de este modelo es satisfacer la demanda semanal en cada una de las 69 zonas de distribución, minimizando el costo de transporte logístico (escogiendo la flota óptima semanal entre el operador A y C), y, el costo de almacenaje (decidiendo entre realizar el almacenaje del producto sea en los centros de distribución primarios o en los centros de distribución de provincias).



$$\begin{aligned}
Gasto = & \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{25} (S1_{j,l} * Cst\_Alm_j) + \sum_{k=1}^{69} \sum_{l=1}^{25} (S2_{k,l} * Cost\_Dist_k) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{25} (X1_{i,j,l} * Transp_{i,j}) + \\
& + \sum_{l=1}^{25} \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} \sum_{m=1}^{85} (TL_{l,j,k,m} * Transl_{k,j}) + \sum_{l=1}^{25} \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} \sum_{n=1}^{40} (B1_{l,j,k,n} * Translb_{k,j} + B2_{l,j,k,n} * Translc_{k,j}) + \\
& + \sum_{k=1}^{69} \sum_{p=1}^{69} \sum_{l=1}^{25} (X3_{k,p,l} * Re\ parto_{k,p}) + \sum_{l=1}^{25} (10,000 * Adm_l) + \sum_{l=1}^{25} \sum_{n=1}^{40} (150 * Flt_{l,n})
\end{aligned}$$

$$X1_{i,j,l}, X2_{j,k,l}, X3_{k,p,l}, S1_{j,l}, S2_{k,l} \geq 0$$

$$Vj1_{l,j,k,m}, Vj2_{l,j,k,n}, Adm_l, Flt_{l,n} \in \{0,1\}$$

Definidos los conjuntos, parámetros, variables de decisión, restricciones y función objetivo; se expresa el problema de optimización como un modelo algebraico. Este modelo se resuelve en GAMS Base Module. En el anexo A se muestra el modelo en GAMS.

$$\begin{aligned}
Min\ Gasto &= \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{25} (S1_{j,l} * Cst\_Alm_j) + \sum_{k=1}^{69} \sum_{l=1}^{25} (S2_{k,l} * Cost\_Dist_k) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{25} (X1_{i,j,l} * Transp_{i,j}) + \\
&+ \sum_{l=1}^{25} \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} \sum_{m=1}^{85} (TL_{l,j,k,m} * Transl_{k,j}) + \sum_{l=1}^{25} \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} \sum_{n=1}^{40} (B1_{l,j,k,n} * Translb_{k,j} + B2_{l,j,k,n} * Translc_{k,j}) + \\
&+ \sum_{k=1}^{69} \sum_{p=1}^{69} \sum_{l=1}^{25} (X3_{k,p,l} * Re\ parta_{k,p}) + \sum_{l=1}^{25} (10,000 * Adm_l) + \sum_{l=1}^{25} \sum_{n=1}^{40} (150 * Flt_{l,n})
\end{aligned}$$

Sujeto a :

$$S1_{j,l-1} + \sum_{i=1}^2 X1_{i,j,l-1} - \sum_{k=1}^{69} X2_{j,k,l} = S1_{j,l}; j = 1,2; l = 1,2,\dots,25$$

$$S2_{k,l-1} + \sum_{j=1}^2 X2_{j,k,l-1} - \sum_{p=1}^{69} X3_{k,p,l} = S2_{k,l}; k = 1,2,\dots,69; l = 1,2,\dots,25$$

$$\sum_{j=1}^2 X1_{i,j,l} \leq Cap\_Prod_i; i = 1,2; l = 1,2,\dots,25$$

$$S1_{j,l} \leq Cap\_Alm_j; j = 1,2; l = 1,2,\dots,25$$

$$S2_{k,l} \leq Cap\_Dist_k; k = 1,2,\dots,69; l = 1,2,\dots,25$$

$$\sum_{p=1}^{69} X3_{k,p,l} = Demanda_{k,l}; k = 1,2,\dots,69; p = 1,2,\dots,69; l = 1,2,\dots,25$$

$$TL_{l,j,k,m} \leq 125; i = 1,2; j = 1,2; k = 1,2,\dots,69; m = 1,2,\dots,85$$

$$B2_{l,j,k,n} \leq 125; i = 1,2; j = 1,2; k = 1,2,\dots,69; n = 1,2,\dots,40$$

$$\sum_{m=1}^{85} TL_{l,j,k,m} + \sum_{n=1}^{40} B1_{l,j,k,n} + \sum_{n=1}^{40} B2_{l,j,k,n} \leq X2_{j,k,l}; j = 1,2; k = 1,2,\dots,69; l = 1,2,\dots,25$$

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} (Vj1_{l,j,k,m} * Duracion_{k,j}) \leq 168; l = 1,2,\dots,25; m = 1,2,\dots,85$$

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} (Vj2_{l,j,k,n} * Duracion_{k,j}) \leq 168; l = 1,2,\dots,25; n = 1,2,\dots,40$$

$$TL_{l,j,k,m} \leq 10,000 * Vj1_{l,j,k,m}; i = 1,2; j = 1,2; k = 1,2,\dots,69; m = 1,2,\dots,85$$

$$B2_{l,j,k,n} \leq 10,000 * Vj2_{l,j,k,n}; i = 1,2; j = 1,2; k = 1,2,\dots,69; n = 1,2,\dots,40$$

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} \sum_{m=1}^{85} Vj1_{l,j,k,m} \leq 10,000 * Adm_l; l = 1,2,\dots,25$$

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{69} Vj2_{l,j,k,n} \leq 10,000 * Flt_{l,n}; l = 1,2,\dots,25; n = 1,2,\dots,40$$

El escenario actual cuenta con las siguientes asunciones y/o simplificaciones:

- En el escenario propuesto no se consideran las inversiones en ampliación de capacidad de producción ni costos de producción;

- Las líneas de producción pueden fabricar cualquier presentación de cualquier marca;
- El transporte de productos entre fábricas no considera el uso de tráileres en la programación matemática;
- La demanda es totalmente atendida semanalmente, no se considera atender backorders;
- La programación de tráileres en el escenario obliga a solamente trasladar producto usando un tráileres a un centro de distribución una sola vez por semana;
- El traslado de producto a centros de distribución se cumple de acuerdo a lo programado, no hay interrupciones en el servicio.

### 3.3. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

En base a la optimización de la función objetivo se muestran los resultados obtenidos:

- Producción de Fábricas

La producción de las plantas está dentro de su máxima capacidad desde la semana 1 del plan para la temporada alta. En su mayoría la producción de cada planta se usa para satisfacer la demanda de su respectivo centro de distribución. El detalle de producción semanal se detalla en la tabla 2.

Nivel de Producción	Semana											
Planta	1	2	3	4	19	20	21	22	23	24	Total general	
1	3,226	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	1,493,627
2	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	691,202
<b>Total general</b>	<b>32,026</b>	<b>93,600</b>	<b>93,600</b>	<b>93,600</b>	<b>93,600</b>	<b>93,600</b>	<b>93,600</b>	<b>93,600</b>	<b>93,600</b>	<b>93,600</b>	<b>93,600</b>	<b>2,184,829</b>

**Tabla 2. Producción Semanal por Planta**

- Transporte a Centros de Distribución Primarios

Los centros de distribución primarios han recibido casi en su totalidad la producción de cada planta. Lo que es importante notar, es la falta de stock al cierre de la semana 23 en adelante, lo cual indica que la producción es inmediatamente trasladada a los distribuidores. En la tabla 3 y en la tabla 4 se muestran los traslados y stock por centro de distribución primario a lo largo de las 24 semanas del plan

Planta Guayaquil	Semana															
	1	2	5	6	10	12	13	14	15	17	18	19	21	22	23	24
Producción	3,226	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800	64,800
Traslado $X_{1,1,l}$	3,226	64,800	64,539	64,625	64,601	63,578	60,907	62,765	61,994	62,382	64,061	64,485	61,392	64,800	63,947	64,800
Traslado $X_{1,2,l}$	0	0	261	175	199	1,222	3,893	2,035	2,806	2,418	739	315	3,408	0	853	0
Stock Final $S_{1,l}$	50,000	29,881	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	12,483	0	0

**Tabla 3. Detalle de Traslados y Stock del CD Guayaquil**

Planta Quito	Semana																
	1	2	5	6	10	12	13	14	15	17	18	19	21	22	23	24	
Producción	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	
Traslado $X_{2,2,l}$	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800	
Stock Final $S_{2,l}$	22,300	22,300	22,300	22,300	22,300	22,300	22,300	22,300	22,300	22,300	22,300	22,300	22,300	22,300	15,923	5,100	0

**Tabla 4. Detalle de Traslados y Stock del CD Quito**

- Transporte a Centros de Distribución Provincias

Dada la condición inicial del problema, donde los centros de distribución de provincias partían con inventarios iguales a la máxima capacidad de sus bodegas, solo se realizó traslados de productos hasta las bodegas durante 18 semanas de las 25 consideradas en el plan. Se observa con atención los movimientos realizados hacia las bodegas 66, 68 y 69 que recibieron producto en 23 de las 25 semanas consideradas en el plan.

- La bodega 66 representa uno de los extensos recorrido (23 horas de viaje ida-vuelta). Esta bodega mantuvo stock extra solo durante la

primera semana. Por lo que, resultaba más conveniente transportar todas las semanas producto que mantener stocks.

- En los casos de las bodegas 68 y 69 se realizan traslados todas las semanas, y se mantienen las bodegas a su máxima capacidad durante casi toda la temporada alta. Para este caso, es más conveniente almacenar producto que trasladarlo (ver tablas 5 y 6).
- A nivel agregado, en Guayaquil se puede observar que progresivamente se va incrementando los CD2 atendidos y los volúmenes transportados. El volumen almacenado en los CD2 atendidos desde este CD1 lleva a su punto máximo en la semana 11. De aquí en más el volumen almacenado desciende.
- Desde el centro de distribución Quito, se atienden en promedio 10 CD2 semanales, se traslada una cantidad promedio de 15.000 HI hasta la semana 21, el stock almacenado alcanza su nivel máximo en la semana 4 para disminuir paulatinamente hasta la semana 23.

Suma de T2 Distribuidor	Semana																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
M2 x.L.L.			5526	2,631	2,456	2,734	2,631	2,940	2,684	2,167	2,165	2,164	2,473	2,492	2,933	3,263	3,346	2,291	3,214	918			100	2,855
S2 x.L.			9896	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972	12,972			3,064	
M2 x.L.M.I		646	833	889	839	866	752	905	791	670	797	875	700	836	855	919	837	783	888	1,120	1,075	1,133	1,095	864
S2 x.L.F		188										154												
M2 x.L.M.I			197	169	303	193	445	513	240	235	296	258	289	308	318	282	253	276	254	300	340	393	321	287
S2 x.L.F			89																					
M2 x.L.M.I	113		217	349	875		535	640	449	550	724	528	738	624	412	438	515	546	451	488	693	855	595	401
S2 x.L.F	1,008		606	262	161																			
M2 x.L.M.I	500	1,833	1,509	1,634	1,570	2,267	2,166	2,504	1,589	1,528	1,955	1,665	1,825	2,068	2,104	1,842	1,639	1,730	1,667	1,384	1,094	2,636	2,130	1,314
S2 x.L.F	1,175	1,197	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175			
M2 x.L.M.I			125	1,000	970			1,176	630	598	762	640	739	805	817	718	643	689	652	767	871	1,016	808	733
S2 x.L.F			1588	1,266	1,594																			
M2 x.L.M.I	707	2,473	1,927	2,094	2,000	2,188	2,094	2,094	2,091	1,961	2,563	2,173	2,521	2,721	2,774	2,130	2,163	2,335	2,199	2,602	2,995	1,414	2,815	2,523
S2 x.L.F	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,166	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160	2,160
M2 x.L.M.I	330	1,364	1,496	1,498	1,375	1,441	1,301	1,716	1,378	1,231	1,700	1,436	1,660	1,514	875	825	1,625	1,875	1,532	2,137	365	2,317	1,621	1,666
S2 x.L.F	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,847	2,880	2,873	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880	2,880

Tabla 5. Detalle de Traslados a los CD2s

Bodega	Semana																								Total General
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Desde CD.GYE	0	1,486	22,433	41,649	41,964	41,224	41,502	40,851	47,410	43,164	40,837	43,402	41,918	37,542	42,250	39,380	43,027	38,693	38,150	36,912	29,452	53,152	47,238	42,742	895,378
X21K.I	0	2,117	33,627	87,066	103,360	110,458	116,882	102,357	118,468	124,177	126,284	123,484	110,818	76,110	80,454	69,593	56,178	51,774	31,205	30,710	1,355	1,490	3,328	0	67,704
Bodegas Atendidas	0	4	16	29	35	36	40	38	43	46	47	47	46	43	45	45	45	44	44	44	37	45	47	43	50
Desde CD.UID	4,567	16,263	16,738	16,394	16,796	14,442	13,478	14,117	18,356	15,107	15,816	16,384	16,337	18,018	18,152	17,844	15,602	15,836	13,750	16,287	13,111	19,250	23,209	20,014	395,968
X22K.I	63,799	69,597	70,816	70,917	70,667	53,921	51,078	26,298	53,358	32,375	30,357	30,103	31,384	30,850	29,502	27,420	16,147	16,650	13,997	15,665	4,944	2,160	0	0	34,014
Bodegas Atendidas	7	10	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	17

Tabla 6. Resumen de Traslados desde CD2s a Distribuidores

- Transporte a Centros de Distribución Provincias con Operadores Logísticos

En esta sección se revisan tres aspectos: cantidad de camiones usados por operador logístico; viajes por semana por tráiler; y, programación semanal de camiones y destinos.

En el primer caso, se observa la conveniencia de trabajar con el operador logístico A, aunque durante la primera semana se usen 10 camiones del operador logístico C (ver tabla 7).

Viajes Por Operador	Semana											
	1	2	6	8	15	16	17	19	20	21	22	23
Operador A	27	71	82	81	83	79	83	82	83	74	83	84
Operador C	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mix del Operador A	73%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Utilización Operador A	32%	84%	96%	95%	98%	93%	98%	96%	98%	87%	98%	99%

**Tabla 7. Detalle de Utilización de Operadores**

Es interesante notar, que en las semanas 4, 5, 12 y 24 se usan los 85 tráileres del operador A; mientras que en las 3, 7, 9, 11, 13, 14, 18 y 23 se usan 84 de los 85 tráileres. La utilización promedio de los camiones del operador A es del 94%.

Los camiones del operador A, en promedio realizan seis viajes por semana, siendo la semana de más actividad la semana 22 (7.3 viajes por semana). También se deduce de la información mostrada en las tablas que el número de camiones promedio usados por semana es 80. El total de viajes semanales promedio es 450 viajes.

Otra información obtenida del análisis de resultados, se tiene que el volumen promedio transportado es 118 Hl por camión (ver figura 6), la duración promedio de los viajes es de 12 horas, es decir al menos el 50% de la demanda se traslada

a bodegas de distribuidores a 6 horas de distancia de los centros de distribución de Guayaquil y Quito (ver figura 7).

Respecto a las horas totales usadas por camión, es en la semana 23 donde se usa el 53% de las horas disponibles semanales. Con esto se puede indicar que la posibilidad de incrementar el volumen trasladado se incrementaría hasta en un 48%, sin tener que aumentar la flota del operador logístico (ver figura 8).

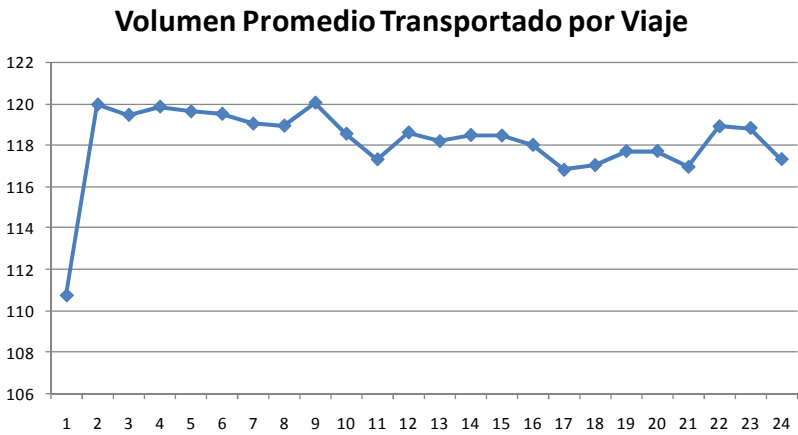


Figura 6. Volumen Promedio Transportado por Viaje

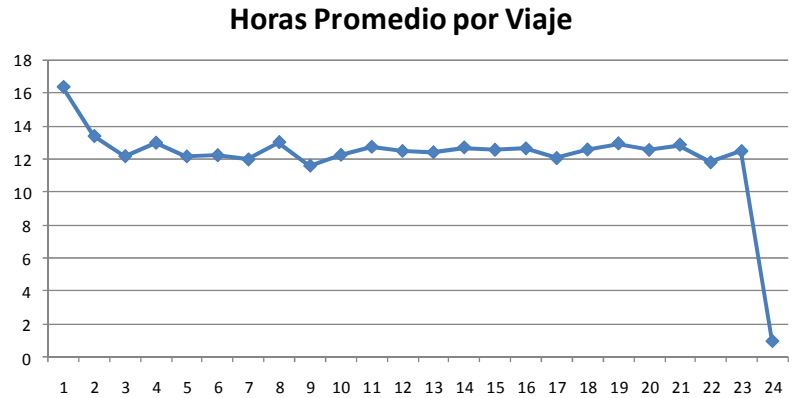
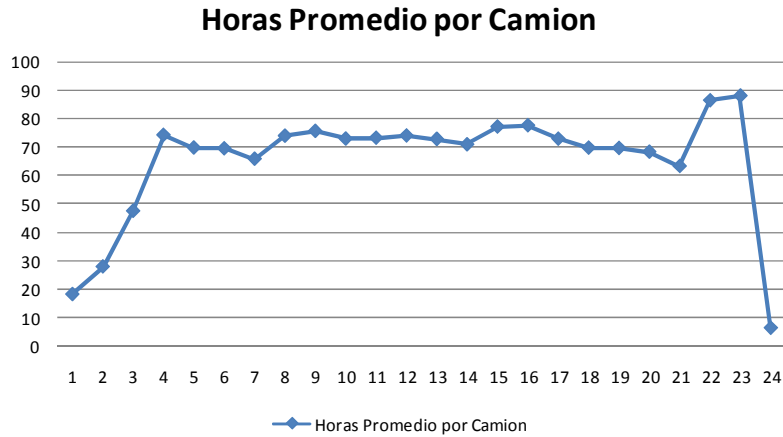


Figura 7. Horas Promedio de Viaje





**Figura 8. Horas Promedio de Viaje**

En la tabla 8, se detalla la información agregada los camiones, por semana

El escenario actual se podría generar tres clases de reportes:

- Programación de viajes, considerando los distribuidores que visitará cada camión por semana.
- Programación de viajes del camión considerando las 24 semanas del horizonte de tiempo y los 69 destinos disponibles.
- Duración de viajes, y la utilización total del camión respecto a las 168 horas disponibles semanalmente.

Ratios	Semanas																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Camiones Utilizados	27	71	84	85	82	84	81	84	84	84	84	85	84	84	83	79	83	84	82	83	74	83	84	85
Viajes Semanales	30	148	328	486	488	466	462	460	548	500	483	504	493	469	510	485	502	466	441	452	364	608	593	535
Volumen Transportado	3,323	17,749	39,171	58,233	58,360	55,676	54,980	54,698	65,766	59,261	56,653	59,766	58,255	55,590	60,402	57,224	58,629	54,529	51,900	53,199	42,563	72,277	70,447	62,756
Volumen Promedio Transportado por Viaje	111	120	119	120	119	119	119	119	120	119	117	119	118	118	118	118	117	117	118	118	117	119	119	117
% Capacidad usada	89%	96%	96%	96%	96%	96%	95%	95%	96%	95%	94%	95%	95%	95%	95%	94%	93%	94%	94%	94%	94%	95%	95%	94%
Duración de Viajes	480	1,976	3,883	6,295	5,918	5,686	5,517	5,976	6,340	6,112	6,138	6,278	6,103	5,943	6,390	6,118	6,037	5,846	5,696	5,658	4,672	7,157	7,380	535
Duración Viaje Promedio	16	13	12	13	12	12	12	13	12	12	13	12	12	13	13	13	12	13	13	13	13	12	12	1
Horas Promedio por Camión	18	28	47	74	70	69	66	74	75	73	73	74	73	71	77	77	73	70	69	68	63	86	88	6
% Horas Usadas	11%	17%	28%	44%	41%	41%	39%	44%	45%	43%	43%	44%	43%	42%	46%	46%	43%	41%	41%	41%	38%	51%	52%	4%

Tabla 8. Detalle de Utilización de Operadores

- Transporte desde CD2 a sectores de venta

La demanda de los sectores de ventas, por condición del problema, es atendida

$$Satisf\_Demanda_{k,l} \rightarrow \sum_{p=1}^{69} X_{3_{k,p,l}} = Demanda_{k,l}$$

cada semana. La restricción , garantiza

el flujo de adecuado de productos desde las bodegas de los distribuidores. En la tabla 9 se muestra un detalle parcial de la satisfacción de la demanda.

Bodega (Todas)		Suma de Reparto Semana																									
Sector		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1		187	682	728	680	747	763	783	885	662	667	685	671	701	740	802	705	702	748	748	820	1128	1178	874	762		
2		690	2386	2450	2631	2456	2734	2631	2940	2664	2157	2165	2164	2473	2492	2933	3263	3346	2291	3214	3387	3411	4028	3164	2855		
3		574	2106	2103	1830	2090	2147	1992	2500	1857	2102	2377	1992	2103	2221	2278	2431	2509	2361	2114	2698	3720	3656	2321	1964		
4		380	1362	1394	1458	1350	1417	1174	1484	1143	1303	1424	1254	1280	1200	1460	1613	1221	999	1529	1443	1781	2190	1603	1098		
5		421	1585	1132	1324	1270	1410	1235	1376	1519	1031	1216	1190	1424	1418	1549	1385	1671	1790	1533	1620	1462	1865	1243	1269		
6		347	1242	1204	1364	1465	1278	1666	1427	1252	1193	1221	1088	1424	1346	1491	1327	1487	1523	1530	1552	2145	2246	1788	1213		
7		333	1166	1307	1311	1181	1212	1167	1183	1146	985	1065	1149	1226	1492	1309	1339	1168	1369	1315	1631	2003	2191	2417	1598		
8		277	1091	1011	1022	1001	989	1059	1614	862	1155	1161	773	1083	1167	1131	1296	1281	1176	1212	1597	1614	1781	1216	1230		
9		123	490	491	460	509	492	499	577	400	472	499	377	532	482	582	561	570	574	615	690	637	794	605	540		
10		308	1053	1280	878	846	1090	919	1036	764	930	1016	852	1023	1373	1076	984	1051	1200	965	1165	1560	1672	1690	1069		
11		217	716	920	800	649	796	799	939	824	657	893	628	1020	717	959	791	810	942	877	893	45	1227	1018	1163		
12		536	1875	1430	1234	1539	1612	1488	1492	1124	1584	1700	1230	1545	1918	1381	1092	940	1582	1404	1520	2046	2638	1930	1654		
13		282	959	939	1081	1148	909	752	857	719	892	721	727	812	935	771	1212	568	907	737	828	1130	1302	1047	644		
14		191	871	732	1023	922	745	775	805	771	855	821	727	806	908	867	908	635	824	883	953	871	1095	970	573		
15		255	1005	938	938	860	892	962	1115	820	987	1021	804	1052	1030	709	845	989	970	1056	1261	1270	1388	1343	821		
16		1037	3741	3249	3133	2843	2731	2266	2403	1814	2470	2368	2078	2220	2655	2219	2884	2379	2263	1984	1980	3307	4301	3135	2278		
17		233	817	791	871	783	818	709	740	640	873	836	566	903	820	892	796	792	777	825	746	784	1118	939	621		
18		194	709	769	776	771	686	724	845	750	843	753	669	921	730	864	826	774	855	928	836	919	766	1035	799		
19		60	208	156	241	242	158	181	225	244	156	242	162	265	230	253	162	263	202	231	208	191	360	264	162		
20		234	844	833	869	839	866	752	905	791	670	797	721	854	836	859	919	897	783	888	1120	1075	1133	1096	864		
21		146	597	255	351	353	402	346	391	424	360	392	322	571	95	529	565	188	506	627	254	842	262	580	645		
22		803	3312	3324	2987	3171	2704	2925	3392	2606	2813	2765	2472	3779	2713	2796	3290	3218	3450	3344	3920	3511	3782	3768	2945		
23		152	516	568	666	671	630	573	717	567	552	682	560	712	680	694	686	563	668	708	564	661	827	721	596		
24		220	814	726	848	796	600	555	568	574	408	566	421	599	576	540	554	550	611	569	655	750	783	724	572		
25		305	1114	801	1044	940	913	925	1138	916	864	984	870	1076	1161	1010	1114	1001	1022	993	1046	1262	1443	1366	838		
26		262	1028	948	967	938	1032	881	1223	729	861	1150	785	924	1002	1084	841	951	895	872	1210	1153	1619	1327	984		
27		119	461	422	484	418	501	493	584	471	512	510	468	616	565	525	522	574	598	528	730	762	930	732	536		
28		478	1646	1543	1677	1641	1449	1316	1765	1401	1370	1394	1346	1596	1655	2154	1435	1380	1906	1590	1941	1902	2045	1714	1398		
29		261	936	1005	897	831	1091	693	986	955	702	929	702	787	962	842	992	810	947	946	1094	1092	1622	1227	781		
30		119	402	561	450	479	557	535	640	449	590	724	528	738	624	412	436	515	546	451	488	693	855	596	401		
31		53	211	162	203	207	239	275	246	235	264	186	248	270	228	239	251	280	190	248	265	279	321	240	218		
32		151	589	611	632	573	502	406	586	503	428	481	367	426	499	555	344	415	423	320	475	374	467	515	325		
33		339	1240	1532	1185	1054	1115	970	1357	946	987	925	1238	1137	2110	1291	1048	935	1294	1368	1377	1727	1931	2021	1323		
34		193	815	854	688	752	683	726	893	686	642	863	785	913	875	857	927	700	1167	856	925	1194	1498	1099	779		
35		230	834	939	769	862	993	669	1251	829	1188	820	725	845	1020	925	969	784	1087	1151	1254	1184	1027	955	907		
36		677	2391	2130	2335	2323	1787	1731	1786	1498	1828	1693	1729	1961	1690	1805	1924	2005	2201	2177	2038	2370	2069	2216	1839		
37		156	566	597	663	596	593	549	646	528	541	599	572	665	689	700	673	763	581	615	677	884	887	947	398		
38		160	499	608	570	521	576	495	686	551	506	559	481	670	528	580	621	539	593	570	554	663	663	569	646		
39		200	855	786	786	717	717	706	839	605	758	745	641	664	1133	684	779	688	768	596	595	804	880	883	644		
40		343	1222	1246	1198	1283	1095	1137	1404	1040	980	1272	1232	1246	1240	1256	1296	1159	1358	1267	1670	2194	1720	1453	1344		
41		144	540	533	518	538	604	537	631	553	556	632	524	600	588	615	607	492	769	619	573	953	1110	696	376		
42		205	722	705	674	698	802	485	875	336	589	683	598	571	950	593	711	802	619	817	656	887	1152	1153	568		
43		231	1042	639	729	652	744	686	753	623	805	821	673	682	768	948	755	460	847	639	720	884	1529	647	598		
44		172	800	723	915	866	805	787	774	572	794	608	607	655	747	1185	640	582	802	713	913	922	1184	868	817		
45		38	150	122	116	164	172	99	193	124	140	274	79	150	182	291	284	196	146	176	149	299	225	134	108		
46		271	830	939	869	886	1034	1163	991	680	1073	987	960	1014	1072	1054	1102	1069	1330	1207	1033	1549	1941	1557	1073		
47		207	696	654	626	762	729	719	1005	499	1441	672	1079	829	918	680	701	598	550	505	553	821	1214	935	446		

Tabla 9. Detalle Parcial de Satisfacción de la Demanda

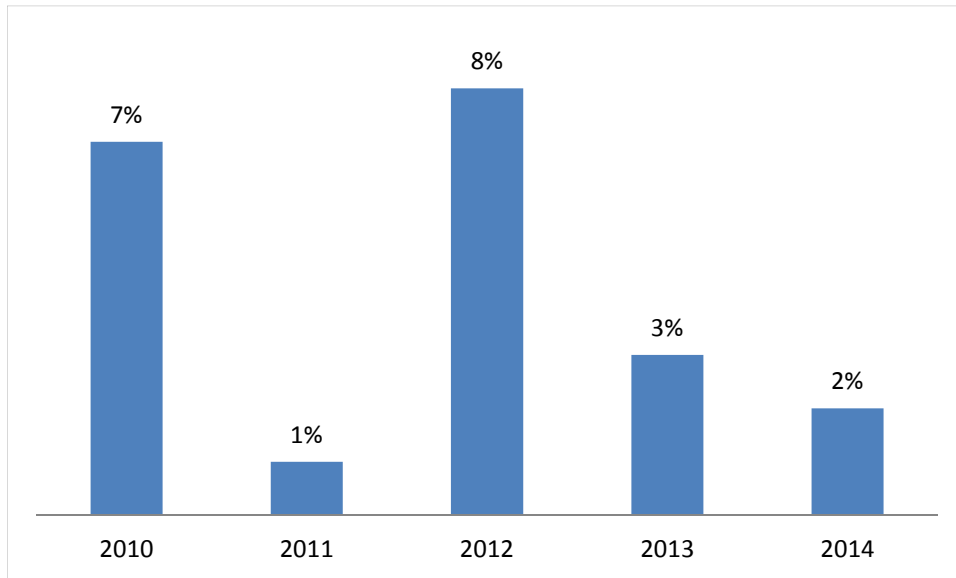
### **3.4. ROBUSTEZ DEL ESCENARIO ACTUAL**

El concepto de robustez que se aplica es diferente al uso dado desde la perspectiva estadística, y también difiere del análisis de sensibilidad. Es importante remarcar que la robustez es notablemente impactada por el predominio de la incertidumbre. Además llevar a cabo las decisiones tomadas derivados del plan, no necesariamente define el futuro. Se debe considerar las alternativas iniciales, las situaciones futuras y las modificaciones de los escenarios [Ref. 9].

Es aceptado que la medida de robustez sea un número que tome valores entre el intervalo real  $[0,1]$ . Una robustez cero indica que hay opciones cercanas aceptables, mientras que la robustez unitaria indica que todas las opciones son aceptables. Contar únicamente con la solución óptima indica que solo hay un escenario previsto, teniendo un índice de robustez cercano a cero [Ref. 9].

En el proyecto cuenta con una estimación de la demanda dada como dato de entrada, siendo el promedio histórico del indicador exactitud del pronóstico del 2%. Es decir, el cumplimiento de la demanda puede variar desde el 98% al 102%, de acuerdo a los resultados obtenidos por la empresa en los 12 meses.

Contar con un cumplimiento de la demanda mayor al 100% denota un crecimiento en ventas. En la figura 9, se muestra el crecimiento porcentual de ventas de la empresa de los últimos 5 periodos fiscales.



**Figura 9. Crecimiento Porcentual de Ventas**

Para validar la robustez del modelo, se generó un ciclo de corridas del escenario en GAMS usando una variable artificial para aumentar la demanda un punto porcentual. Al momento de correr el escenario con incrementos de demanda en uno, dos hasta ocho puntos porcentuales, solo se obtiene factibilidad en el primer caso. Con la capacidad actual no se puede satisfacer crecimientos mayores al 1%.

Se confirma la premisa anterior al momento que en periodos anteriores la demanda diaria o semanal aumenta ligeramente, provocando paras de producción, falta de inventario o aumento de horas en planta de los tráileres. Usando este criterio se debe modelar un nuevo escenario donde se aumente las capacidades para cumplir crecimientos mayores.

## 4. CAPÍTULO 4

### 4.1. DESARROLLO DE ESCENARIO PROPUESTO

Como se resaltó en el capítulo anterior, el escenario actual no soporta crecimientos de demanda mayores al uno por ciento anual. La empresa ha estimado la tasa de crecimiento anual compuesto del siguiente lustro, siendo la misma 3.5%. En consideración de este crecimiento, se plantearon algunas opciones para aumentar las capacidades de red logística.

- Trimestre 3, Año 1: Aumento de capacidad de la planta Guayaquil con la incorporación de una nueva línea de embotellado. La inversión de este proyecto es de \$19 millones. Las características de nueva línea son:
  - Producción de todas las presentaciones del portafolio de cervezas y maltas a grandes velocidades (330c.c. /45.000 botellas por hora y 600c.c. /34.000 botellas por hora).
  - Uso de un nuevo proceso de pasteurización, asegurando la calidad en el tiempo del producto.
  - Implementación de un sistema robotizado para paletizar cajas.
  - Aplicación de material termoencogible para presentaciones no retornables.
  - Aplicación del concepto de ergonomía para el funcionamiento de la línea.
  - Aumento de los niveles de seguridad ocupacional de los operarios.
  
- Trimestre 3, Año 2: Aumento de capacidad de la planta Quito con la incorporación de los siguientes elementos:
  - Planta potabilizadora de agua: se amplía la capacidad de la planta potabilizadora de agua de pozo con una renovación de tecnología para el tratamiento, a fin de obtener agua potable, agua para el proceso productivo y agua para servicios. La inversión es de \$1.4 millones, aumentando la capacidad en un 41%.

- Sala de cocimiento: cambios en la olla de cereales, cambios en la olla de cocción, nuevo sistema de recuperación de energía, nuevo enfriador de mosto. Estos cambios tienen una inversión de \$4 millones, aumentando la capacidad de la sala de cocimiento en el 30%.
- Tanques de fermentación/maduración: se incrementa la capacidad de los tanques en el 56%, con una inversión de \$11 millones. Con estos nuevos tanques se separa el proceso de fermentación y maduración.
- Línea de embotellado: se monta una nueva línea de embotellado para presentaciones retornables de 330, 550 y 600 centímetros cúbicos. La velocidad nominal de la línea es de 45.000 botellas por hora. Esto representa un aumento de capacidad del 100% con una inversión de \$23 millones.
- Trimestre 2, Año 4: Se plantean dos acciones para mejorar la red logística
  - Consolidación de centros de distribución de provincias. Se construyen facilidades que brindan comodidad y seguridad para ejecutar las tareas operativas y de almacenamiento de producto. Además se distribuyen los espacios de las bodegas de forma que facilitan la movilización de producto y envase. En promedio se mejora la capacidad de almacenaje en 30%.
  - Construcción de jardín perimetral de planta Quito. Esta iniciativa cubre a la fábrica volviéndola parte del entorno. La pared del jardín perimetral contiene un panel interno de insonorización que ayuda a mitigar el ruido que genera la fábrica durante su proceso de producción, permitiendo una mejor calidad de vida y disminuyendo la contaminación ambiental por ruido. Del lado externo se colocaron plantas nativas de la zona, mejoran el ornato del sector.

- Trimestre 3, Año 4: Negociación de tarifas de transporte logístico. Se negoció un nuevo sistema de operación que comprende operadores de transporte y contratistas de mantenimiento. El transporte se asignó a cinco operadores los cuales fueron localizados por región. En el mantenimiento, se buscó la especialización contratando un contratista de mantenimiento de carrocerías y otro contratista de gestión de neumáticos. La responsabilidad de la carga y del tráiler fue transferida al transportista, mejorando la administración del capital de trabajo. La reducción de tarifa de transporte es de 4%.
- Trimestre 4, Año 4: Construcción de centros de distribución adicionales en Quito. Se estudia la construcción de nuevos centros de distribución en las afueras de Quito a fin de evitar las restricciones de transporte de esta ciudad. Las restricciones de transporte son pico y placa, y circulación vehicular en horario diurno en el barrio donde está ubicada la fábrica. Se busca aumentar la capacidad de almacenar a 36.000 HI para descentralizar las operaciones, disminuyendo ruido y tráfico en el barrio donde está ubicada la fábrica.

#### **4.2. LOCALIZACIÓN DE NUEVOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN**

El barrio donde está ubicada la fábrica de Quito fue un sector industrial, que con el paso del tiempo y el crecimiento de la ciudad se volvió residencial. Al tener esta nueva característica el barrio, se incrementaron las restricciones de circulación en el sector, limitando el acceso al transporte de carga pesada únicamente en horario nocturno.

Adicionalmente, el municipio de Quito ha restringido mediante la norma “pico y placa” la circulación vehicular según su último dígito de placa en las horas de mayor afluencia vehicular (en la mañana de 7:00 a 9:30, y, en la tarde de 16:00 a



19h30). Esto conlleva a que los camiones no puedan acceder a la fábrica hasta tarde en la noche.

Por lo anterior es necesario encontrar una nueva bodega en la ciudad de Quito para facilitar las operaciones de transporte, abastecimiento a centros de distribución de provincias y entrega de producto a clientes detallistas.

Para esto, se debe determinar el flujo de producto desde la fábrica hasta las bodegas donde se decida operar. Desde la fábrica y las nuevas bodegas se realizará la entrega de producto a los clientes detallistas, que están repartidos en 6 grandes conglomerados urbanos (Calacalí, Calderón, Pifo, Cumbaya, Los Chillos y Conocoto). Aunque muchos clientes están ubicados al sur de Quito, no se han encontrado bodegas en este sector de la ciudad con las condiciones debidas de accesibilidad vial para tráileres o camiones de reparto (ver figura 10).



**Figura 10. Localización de Sectores de Ventas en Quito**

Se cuenta con la tabla de fletes desde la fábrica hasta las bodegas propuestas. Se considera además el costo fijo mensual de alquilar estas bodegas como parámetros de entrada del modelo de localización. En el modelo se asume que los costos variables de almacenamiento son independientes del número de bodegas abiertas y por lo tanto se convierten en una constante.

De esta forma, se va a encontrar el número óptimo de bodegas a abrir considerando sus capacidades de forma que se minimicen los costos totales de logística (almacenaje, transporte y reparto). Se han agregado los productos considerando los hectolitros transportados.

#### **4.3. INTERPRETACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LOCALIZACIÓN DE BODEGAS**

El modelo matemático de localización de bodegas propone programación lineal entera para localizar las bodegas a alquilar. El modelo matemático está conformado de la siguiente manera:

##### **4.3.1. CONJUNTOS**

*i*: representación de las posibles bodegas a alquilar, se nombra 1 a Calacalí, 2 a Calderón, 3 a Pifo, 4 a Cumbaya, 5 a Los Chillos, y 6 a Conocoto.

*j*: representación de los sectores de reparto, se nombra 1 a Calacalí, 2 a Calderón, 3 a Pifo, 4 a Cumbaya, 5 a Los Chillos, y 6 a Conocoto.

##### **4.3.2. PARÁMETROS**

- Capacidad de almacenaje de los centros de distribución ( $Cap_i$ )

$$Cap = \begin{bmatrix} 80.000 \\ 18.400 \\ 20.000 \\ 15.000 \\ 15.200 \\ 28.000 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de transportar desde la fábrica a los centros ( $T1_i$ ).

$$T1 = \begin{bmatrix} 3.00 \\ 1.47 \\ 1.00 \\ 1.00 \\ 1.33 \\ 2.00 \end{bmatrix}$$

- Costo fijo de alquilar los centros ( $CFJ_j$ ).

$$CFJ = \begin{bmatrix} 40.000 \\ 6.500 \\ 15.000 \\ 15.000 \\ 5.000 \\ 30.000 \end{bmatrix}$$

- Demanda estimada del territorio ( $Dem_j$ )

$$Dem = \begin{bmatrix} 3.333 \\ 3.056 \\ 3.056 \\ 2.778 \\ 2.500 \\ 2.778 \end{bmatrix}$$

- Costo de entregar producto desde la bodega i en la zona j ( $T3_{ij}$ )

$$T3 = \begin{bmatrix} 5.00 & 8.83 & 8.83 & 8.83 & 8.83 & 8.83 \\ 6.29 & 5.00 & 6.29 & 6.29 & 6.29 & 6.29 \\ 6.14 & 6.14 & 5.00 & 6.14 & 6.14 & 6.14 \\ 5.00 & 5.00 & 5.00 & 5.00 & 5.00 & 5.00 \\ 5.53 & 5.53 & 5.53 & 5.53 & 5.00 & 5.53 \\ 6.63 & 6.63 & 6.63 & 6.63 & 6.63 & 5.00 \end{bmatrix}$$

Los parámetros de capacidad están expresados en hectolitros, los costos fijos están expresados en unidades monetarias, los costos variables están expresados en unidades monetarias por hectolitro movilizado, y, la demanda semanal en hectolitros.

#### 4.3.3. VARIABLES DE DECISIÓN

Estas contemplan el volumen movilizado, de la fábrica hasta centros de distribución, de centros de distribución a sectores de reparto; además se consideran la opción de aperturar o no los centros de distribución.

$X_i$ : producto enviado desde la fábrica al CD  $i$

$Y_{i,j}$ : producto enviado desde el CD  $i$  al sector de entrega  $j$

$W_i$ : verificación de uso del CD  $i$

**OBJ**: costo de transporte total desde planta al mercado

Las variables  $X_i$ ,  $Y_{i,j}$ , **OBJ**, son variables positivas; mientras las variables  $W_i$ , son variables binarias.

#### 4.3.4. RESTRICCIONES

Las restricciones consideran los siguientes escenarios: balance de flujo entre los centros de distribución a los sectores de reparto, capacidad de almacenaje de los centros de distribución; satisfacción de la demanda por semana; cantidad de centros de distribución a aperturar.

Las restricciones se detallan a continuación:

- *Restricción de capacidad de almacenaje*

$$\sum_i X_i \leq CAP_i$$

- *Restricción de capacidad de bodegas*

$$\sum_i X_i \leq MW_i$$

- *Restricción de Satisfacción de la Demanda*

$$\sum_i Y_{ij} = DEM_j$$

- *Restricción de Balance de Flujos*

$$X_i = \sum_j Y_{ij}$$

- *Restricción de CD a aperturar*

$$\sum_i W_i \geq 2$$

#### 4.3.5. FUNCIÓN OBJETIVO

El objetivo de este modelo es satisfacer la demanda semanal en cada una de los sectores de reparto, minimizando el costo de transporte logístico, y, el costo de transporte, ubicando los centros de distribución necesarios.

$$OBJ = \sum_i T1_i X_i + \sum_i \sum_i T3_{ij} Y_{ij} + \sum_i CFJ_i W$$

$$X_i, Y_{i,j} \geq 0$$

$$W_i \in \{0,1\}$$

Definidos los conjuntos, parámetros, variables de decisión, restricciones y función objetivo; se expresa el problema de optimización como un modelo algebraico. Este modelo se resuelve en GAMS Base Module. En el anexo B se muestra el modelo en GAMS y en el anexo C la solución del mismo.

$$\text{Min OBJ} = \sum_i T1_i X_i + \sum_i \sum_i T3_{ij} Y_{ij} + \sum_i CFJ_i W_i$$

sujeto a :

$$\sum_i X_i \leq CAP_i$$

$$\sum_i X_i \leq MW_i$$

$$\sum_i Y_{ij} = DEM_j$$

$$X_i = \sum_j Y_{ij}$$

$$\sum_i W_i \geq 2$$

$$X_i, Y_{i,j} \geq 0$$

$$W_i \in \{0,1\}$$

El modelo de localización de centros de distribución cuenta con las siguientes asunciones y/o simplificaciones:

- El centro de distribución de la fábrica en Quito solo tiene disponible el 50% del espacio para almacenar el producto destinado a los clientes de Quito. El espacio restante de almacenaje es usado para abastecer de producto a los centros de distribución de provincias.
- No se consideran los costos variables de almacenaje.
- No se considera la asignación de flota para realizar el transporte desde la fábrica a los centros de distribución.
- Se asume que la totalidad de la demanda es atendida en la semana correspondiente, sin generar backorders.

El modelo sugiere localizar el nuevo centro de distribución en Pifo, con lo cual la capacidad de almacenaje en Quito pasa de 30.000 HI a 50.000 HI, significando un incremento de capacidad del 65%.

El modelo también sugiere mantener las operaciones en su mayoría en el centro de distribución adjunto a la fábrica, pero por lo mencionado anteriormente (restricción de horarios de circulación, normativa pico y placa) las operaciones de

reparto se trasladan a Pifo, quedando en la fábrica solamente las operaciones de abastecimiento a los centros de distribución de provincias.

#### **4.4. INTERPRETACIÓN DEL ESCENARIO PROPUESTO**

El escenario propuesto usa el mismo código de programación lineal entera para generar el plan de transporte. Los cambios solo se detallan en conjuntos y parámetros, los cuales se detallan a continuación:

##### **4.4.1. CONJUNTOS**

*i*: representación de las fábricas productoras, se nombra 1 a Guayaquil, y 2 a Quito.

*j*: representación de los centros de distribución primarios (CD1), se nombra 1 a Guayaquil, y 2 a Quito.

*k*: representación de los centros de distribución de provincias (CD2), se numeran desde el 1 al 32.

*p*: representación de los sectores de ventas, se numeran desde el 1 al 32.

*l*: representación de la semana del plan, se numeran desde el 1 al 25.

*m*: representación de los tráileres del operador logístico A, se numeran desde el 1 al 100.

*n*: representación de los tráileres del operador logístico C, se numeran desde el 1 al 40.

##### **4.4.2. PARÁMETROS**

- Capacidad de producción de las plantas (*Cap\_Prod<sub>i</sub>*)

$$Cap\_Prod = \begin{bmatrix} 97,500 \\ 71,500 \end{bmatrix}$$

- Capacidad de almacenaje de los centros de distribución ( $Cap\_Alm_j$ )

$$Cap\_Alm = \begin{bmatrix} 138,576 \\ 33612 \end{bmatrix}$$

- Capacidad de almacenaje de los distribuidores ( $Cap\_Dist_k$ )

$$Cap\_Dist = \begin{bmatrix} 5,353 \\ 1,350 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 2,963 \end{bmatrix}$$

- Capacidad de transporte en los camiones de los operadores: 125 HI.
- Costo Fijo de utilizar el operador logístico A en la semana  $l$ : \$10.000
- Costo fijo de utilizar el camión  $n$  del operador logístico C en la semana  $l$ : \$150
- Costo variable de almacenaje de los centros de distribución primarios ( $Cost\_Alm_j$ ).

$$Cost\_Alm = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.92 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de almacenaje de los centros de distribución secundarios ( $Cost\_Dist_k$ )



$$Cost\_Dist = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.39 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1.61 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de transporte primario entre CD1 ( $Transp_{i,j}$ )

$$Transp_{2,2} = \begin{bmatrix} 0.00 & 4.41 \\ 4.41 & 0.00 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de reparto por distribuidor en cada sector de venta ( $Reparto_{k,p}$ )

$$Reparto_{32,32} = \begin{bmatrix} 6 & 10,000 & \dots & 10,000 \\ 10,000 & 6 & \dots & 10,000 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 10,000 & 10,000 & \dots & 6 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de transporte logístico realizado por el operador A ( $Transl_{j,k}$ )

$$Transl_{32,2} = \begin{bmatrix} 3.46 & 1.95 \\ 7.72 & 3.46 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 10,000 & 2.48 \end{bmatrix}$$

- Costo variable de transporte logístico realizado por el operador C ( $Translc_{j,k}$ )

$$Translc_{69,2} = \begin{bmatrix} 3.98 & 2.24 \\ 8.80 & 3.98 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 10,000 & 2.85 \end{bmatrix}$$

- Demanda estimada del territorio por semana ( $Demanda_{p,l}$ )

$$Demanda_{32,25} = \begin{bmatrix} 4,804 & 5,031 & \dots & 7,663 \\ 980 & 991 & \dots & 1,251 \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ 980 & 991 & \dots & 1,251 \end{bmatrix}$$

- Duración de viajes desde los centros de distribución a las bodegas de los distribuidores ( $Duracion_{k,j}$ )

$$Duracion_{32,2} = \begin{bmatrix} 19.00 & 10.00 \\ 43.00 & 15.00 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 10,000 & 13.00 \end{bmatrix}$$

Los parámetros de capacidad están expresados en hectolitros, los costos fijos están expresados en unidades monetarias, los costos variables están expresados en unidades monetarias por hectolitro movilizado, la duración de los viajes están expresados en horas semanales, y, la demanda semanal en hectolitros.

#### 4.5. RESULTADOS OBTENIDOS

En base a la optimización de la función objetivo se muestran los resultados obtenidos:

- Producción de Fábricas

La producción de las plantas, con el aumento de capacidad trabajan usando el 71%, siendo la planta más usada Guayaquil (usa el 80% de capacidad, mientras Quito usa el 66%). Después del aumento de capacidad, la producción de cada

planta se usa para satisfacer la demanda de su respectivo centro de distribución. El detalle de producción semanal se detalla en la tabla 10.

Nivel de Producción		Semana									
Planta		1	2	3	4	5	20	21	22	23	24
1			68,724	70,119	71,629	74,386	85,346	97,500	97,500	97,500	97,500
2		24,799	46,459	44,893	46,542	48,325	52,162	57,268	66,470	71,500	
<b>Total general</b>		<b>24,799</b>	<b>115,183</b>	<b>115,012</b>	<b>118,171</b>	<b>122,711</b>	<b>137,508</b>	<b>154,768</b>	<b>163,970</b>	<b>169,000</b>	<b>97,500</b>

Utilización de Capacidad		Semana									
Planta		1	2	3	4	5	20	21	22	23	24
1			70%	72%	73%	76%	88%	100%	100%	100%	100%
2		35%	65%	63%	65%	68%	73%	80%	93%	100%	
<b>Total general</b>		<b>15%</b>	<b>68%</b>	<b>68%</b>	<b>70%</b>	<b>73%</b>	<b>81%</b>	<b>92%</b>	<b>97%</b>	<b>100%</b>	<b>58%</b>

**Tabla 10. Producción Semanal por Planta**

- Transporte a Centros de Distribución Primarios

Los centros de distribución primarios han recibido en su totalidad la producción de cada planta. Lo que es importante notar, la falta de necesidad para generar stocks. Únicamente existe falta de stock en las semanas 21, 22 y 23 en adelante, lo cual indica que la producción es inmediatamente trasladada a los distribuidores, usando los centros de distribución como facilidades de cross docking. En la tabla 11 y en la tabla 4 se muestran los traslados y stock por centro de distribución primario a lo largo de las 24 semanas del plan

Traslados a Almacenes		Semana									
Planta		1	2	3	4	5	20	21	22	23	24
1			68,724	70,119	71,629	74,386	85,346	97,500	97,500	97,500	97,500
2		24,799	46,459	44,893	46,542	48,325	52,162	57,268	66,470	71,500	
<b>Total general</b>		<b>24,799</b>	<b>115,183</b>	<b>115,012</b>	<b>118,171</b>	<b>122,711</b>	<b>137,508</b>	<b>154,768</b>	<b>163,970</b>	<b>169,000</b>	<b>97,500</b>

Stock final		Semana									
Planta		1	2	3	4	5	20	21	22	23	24
1		69,288	240	0	0	0	0	5829	14293	8325	0
2		16,806	0	0	0	0	0	0	0	1750	0
<b>Total general</b>		<b>86,094</b>	<b>240</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5,829</b>	<b>14,293</b>	<b>10,075</b>	<b>0</b>

**Tabla 11. Detalles de Traslados y Stock por CD1**

- Transporte a Centros de Distribución Provincias

Dada la condición inicial del problema, los centros de distribución de provincias partían con inventarios iguales a la mitad de su máxima capacidad, no se realizaron traslados de productos hasta los centros de distribución de provincias en la semana 1 del plan. El consolidado de traslados por centro y stock final se muestra en la tabla 12.

Traslados a CD2 Traslado T1	Semana									
	1	2	3	4	5	20	21	22	23	24
CD1 Guayaquil	38,737	69,049	68,964	70,119	71,629	86,344	79,517	89,036	103,468	105,825
CD2 Atendidos	13	19	20	20	20	20	21	20	20	20
CD1 Quito	9,362	41,605	46,459	44,893	46,542	50,443	52,162	57,268	64,720	73,250
CD2 Atendidos	7	11	11	12	12	12	12	13	13	13
<b>Stock CD2</b>	<b>90,162</b>	<b>15,066</b>	<b>1,594</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>1,330</b>	<b>0</b>	<b>213</b>	<b>335</b>	<b>3,473</b>

**Tabla 12. Detalles de Traslados y Stock por CD2**

Desde Guayaquil se atendieron 20 centros de distribución de provincias, movilizándose semanalmente 76.000 HI en promedio. Mientras que desde Quito se atendieron 12 centros de distribución de provincias en promedio, con un volumen semanal de hectolitros movilizadas de 46.500 HI. en promedio. Cabe recalcar, que solo dos de los siete centros de distribución de provincias fue abastecido desde las dos plantas.

Con la suficiente capacidad de producción, y, suficiente capacidad de transporte a los centros de distribución de provincias; no fue necesario generar stock para cubrir la demanda semanal. En la mitad de semanas del plan, los CD2 no mantuvieron stock, mientras que en las otras semanas el stock promedio al final de la semana fue 2.400 HI.

- Transporte a Centros de Distribución Provincias con Operadores Logísticos

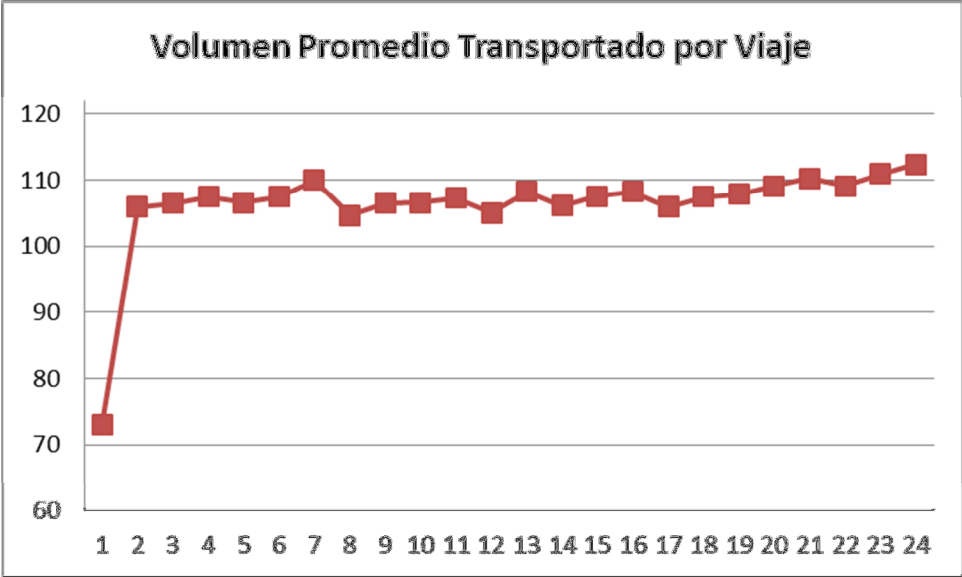
En esta sección se revisan tres aspectos: cantidad de camiones usados por operador logístico; viajes por semana por tráiler; y, programación semanal de camiones y destinos.

En el primer caso, se observa la conveniencia de trabajar con el operador logístico A, siendo la flota de tráileres usada a su total capacidad desde la semana 1 del plan. Hay que notar que durante todo el plan se usan tres tráileres del proveedor C para abastecer el centro de distribución de Pifo (ver tabla 13).

Utilización de Operadores TL Semana										
Operador	1	2	3	4	5	20	21	22	23	24
Operador A	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Operador C	2	3	3	2	3	3	3	3	3	3
Mix del Operador A	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%

**Tabla 13. Detalle de Utilización de Operadores**

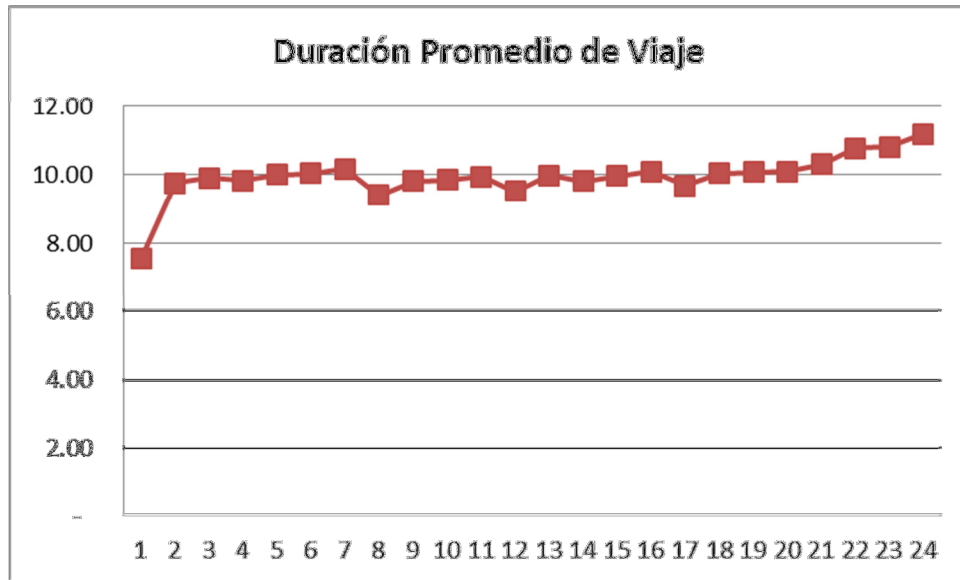
Los camiones del operador A, en promedio realizan nueve viajes por semana, siendo la semana de más actividad la semana 24 (12 viajes por semana). Se confirma de la información mostrada en las tablas que se utilizan el 100% de los tráileres en cada semana. El total de viajes semanales promedio es 808 viajes.



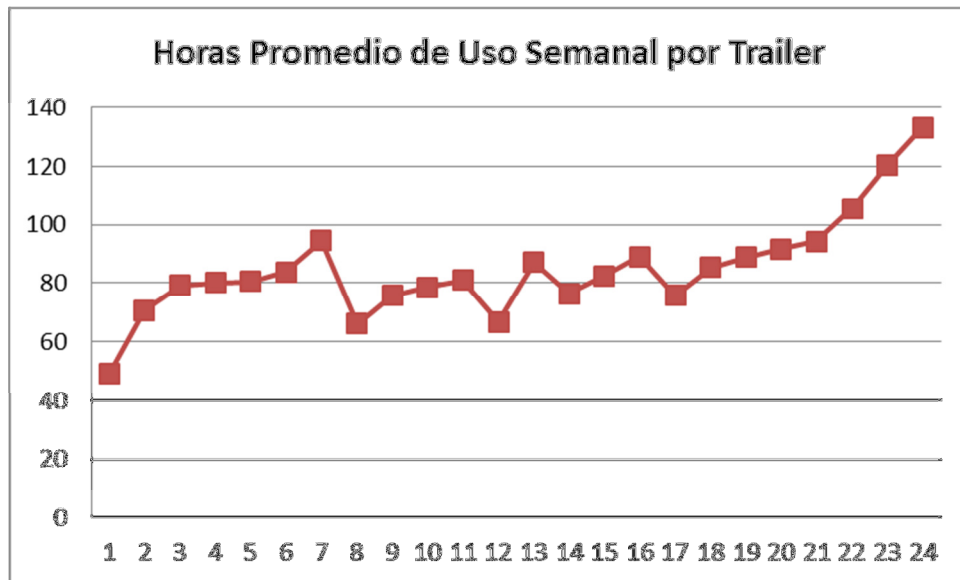
**Figura 11. Volumen Promedio Transportado por Viaje**

Otra información obtenida del análisis de resultados, se tiene que el volumen promedio transportado es 105 HI por camión (ver figura 11), la duración promedio de los viajes es de 10 horas, es decir al menos el 50% de la demanda se traslada

a bodegas de distribuidores a 5 horas de distancia de los centros de distribución de Guayaquil y Quito (ver figura 12).



**Figura 12. Duración Promedio de Viaje por Semana**



**Figura 13. Horas Promedio de Uso Semanal por Tráiler**

Respecto a las horas totales usadas por camión, las horas semanales de uso va subiendo progresivamente desde 50 horas semanales (30%) hasta 134 horas semanales (80%) de uso en la semana 24 (ver figura 13).

En promedio, los tráileres tienen ocupado el 51% de su tiempo. Con esto se puede indicar que la posibilidad de incrementar el volumen trasladado se incrementaría hasta en un 49%, sin tener que aumentar la flota del operador logístico.

- Transporte desde CD2 a sectores de venta

Bodega		(Todas)											
Suma de Reparto	Semana												
Sector	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	4,804	5,031	4,882	4,116	4,158	4,517	6,185	2,981	4,419	4,035	4,621		
2	980	991	976	865	907	937	1,175	756	892	809	932		
3	3,055	2,174	2,452	2,221	2,151	2,207	4,018	1,687	1,826	2,036	2,579		
4	16,913	17,096	16,836	14,923	15,654	16,155	20,273	13,035	15,389	13,950	16,072		
5	5,715	5,616	5,032	6,381	4,731	5,476	5,722	5,426	4,684	5,587	5,111		
6	4,210	4,211	4,552	4,869	4,762	5,172	5,732	4,994	4,893	4,605	4,756		
7	4,506	4,721	5,176	4,955	5,155	5,394	5,680	3,617	4,484	4,093	4,370		
8	4,003	4,259	3,893	4,498	3,968	4,195	4,800	3,119	3,955	4,472	4,445		
9	564	598	508	486	543	545	623	362	487	544	565		
10	2,702	2,683	2,589	2,144	2,404	2,803	3,441	1,923	2,540	2,563	2,658		
11	3,382	3,589	3,046	2,914	3,257	3,270	3,735	2,175	2,920	3,265	3,389		
12	1,127	1,196	1,015	971	1,086	1,090	1,245	725	973	1,088	1,130		
13	1,691	1,794	1,523	1,457	1,628	1,635	1,868	1,087	1,460	1,633	1,695		
14	846	897	762	728	814	818	934	544	730	816	847		
15	564	598	508	486	543	545	623	362	487	544	565		
16	846	897	762	728	814	818	934	544	730	816	847		
17	564	598	508	486	543	545	623	362	487	544	565		
18	1,127	1,196	1,015	971	1,086	1,090	1,245	725	973	1,088	1,130		
19	846	897	762	728	814	818	934	544	730	816	847		
20	6,058	5,548	5,770	6,388	6,064	7,302	6,972	5,546	6,097	7,008	7,128		
21	1,691	1,794	1,523	1,457	1,628	1,635	1,868	1,087	1,460	1,633	1,695		
22	2,344	2,311	2,333	2,358	2,278	2,276	2,785	2,255	3,009	2,487	2,196		
23	6,909	6,229	7,079	6,699	6,541	6,462	7,975	5,566	5,594	5,932	6,096		
24	1,973	2,094	1,777	1,700	1,900	1,908	2,179	1,269	1,703	1,905	1,977		
25	4,573	3,997	3,720	4,257	3,846	3,902	4,977	3,662	3,200	3,589	3,653		
26	1,471	1,487	1,464	1,298	1,361	1,405	1,763	1,134	1,338	1,213	1,398		
27	1,226	1,239	1,220	1,081	1,134	1,171	1,469	945	1,115	1,011	1,165		
28	4,293	4,616	4,091	5,090	4,523	4,366	4,452	3,924	4,501	4,319	4,152		
29	4,068	3,879	3,834	3,815	3,495	3,782	4,189	2,808	2,880	3,000	3,184		
30	28,183	29,908	25,386	24,282	27,141	27,253	31,126	18,125	24,331	27,209	28,243		
31	980	991	976	865	907	937	1,175	756	892	809	932		
32	980	991	976	865	907	937	1,175	756	892	809	932		
<b>Total general</b>	<b>123,193</b>	<b>124,134</b>	<b>116,951</b>	<b>115,087</b>	<b>116,750</b>	<b>121,370</b>	<b>141,899</b>	<b>92,809</b>	<b>110,079</b>	<b>114,240</b>	<b>119,886</b>		

**Tabla 14. Detalle Parcial de Satisfacción de la Demanda**

La demanda de los sectores de ventas, por condición del problema, es atendida

$$Satisf \_ Demanda_{k,l} \rightarrow \sum_{p=1}^{69} X_{k,p,l} = Demanda_{k,l}$$

cada semana. La restricción , garantiza el flujo de adecuado de productos desde las bodegas de los distribuidores. En la tabla 14 se muestra un detalle parcial de la satisfacción de la demanda. La solución del escenario propuesto se muestra en el Anexo D.

**4.6. ANÁLISIS ECONÓMICO**

Es necesario comparar si el escenario propuesto obtuvo un costo menor referente al escenario actual. Debe considerarse que el escenario propuesto está ubicado en el tiempo respecto al escenario actual cinco años más adelante. El escenario actual moviliza 2.522.226 HI a un costo de \$20.800.798 en el periodo del plan. Usando el criterio de exactitud de pronóstico, en el escenario propuesto el cumplimiento de volumen puede variar ±2%.

**4.6.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MODELOS**

Se muestra a continuación en la tabla 15 de exactitud de pronóstico, hectolitros movilizados y costo asociado al plan de transporte para cumplimiento de demandas desde 98% hasta el 102%.

	<b>Cumplimiento</b>				
	<b>98%</b>	<b>99%</b>	<b>100%</b>	<b>101%</b>	<b>102%</b>
<b>Hectolitros</b>	2,955,602	2,985,761	3,015,921	3,046,080	3,076,239
<b>Costo</b>	21,222,951	21,444,556	21,668,599	21,896,011	22,125,481
<b>\$/HI</b>	7.181	7.182	7.185	7.188	7.192

**Tabla 15. Costo y Hectolitros de Acuerdo a Cumplimiento**

La diferencia absoluta de costo entre el escenario propuesto respecto al escenario actual es \$874.824 mayor. Pero en el análisis del ratio \$/HI, el escenario propuesto es menor en \$1.06. Para corroborar la disminución de costos por hectolitros se realiza una prueba t.



En la prueba  $t$  se evalúa la hipótesis nula que la media del ratio costo por hectolitros (\$/Hl) del escenario propuesto será igual a ratio costo por hectolitro del escenario actual ( $\mu_0$ ), el detalle de la prueba  $t$  se muestra en el anexo E.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

Donde  $\bar{x}$  es la media muestral del ratio \$/Hl según el porcentaje de cumplimiento,  $s$  es la desviación de la media muestral y  $n$  es el tamaño de la muestra. El valor de  $t$  es -429, y para este valor de  $t$ , el nivel de significancia  $p$  es 0. Con esto se afirma que la media del ratio \$/Hl del escenario propuesto es menor que el ratio \$/Hl del escenario actual.

#### 4.6.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CONTRA PRESUPUESTO

En la resolución del escenario propuesto no se cumple el supuesto de tener en stock en cada centro de distribución (primario o de provincias) al final de la semana el equivalente a la mitad de los hectolitros a ser demandados en la próxima semana. Para poder comparar efectivamente los costos presupuestados respecto a los costos obtenidos del escenario propuesto, la comparación solo considera los costos variables de transporte logístico y reparto.

Rubro	Dólares	
	Presupuesto	Escenario Propuesto
TL	\$ 14,497,926	\$ 4,878,096
T3	\$ 50,010,279	\$ 16,490,912
HL	6,629,083	3,015,921

**Tabla 16. Datos de TL y T3 para Presupuesto y Escenario Propuesto**

En las tablas 16 y 17 se muestra el presupuesto y los costos obtenidos del escenario propuesto. Como el escenario propuesto tiene un horizonte temporal menor, la comparación es realizada en costo por hectolitro (\$/Hl).

Rubro	\$/HL		
	Presupuesto	Escenario Propuesto	Variación Porcentual
<b>TL</b>	\$2.19	\$1.62	-26%
<b>T3</b>	\$7.54	\$5.47	-28%

**Tabla 17. Ratios \$/HL de TL y T3 para Presupuesto y Escenario Propuesto**

Comparando los ratios \$/Hl se muestra que el modelo obtiene una reducción de costos del 27%. Esto se debe a dos causas básicamente, en transporte logístico aunque el escenario admite traslado a siete centros de distribución desde las dos fábricas, el abastecimiento se realiza únicamente desde la fábrica más cercana. Además el modelo no considera el costo de seguros, pérdidas ni reparaciones de los tráileres. Mientras que en reparto, la tarifa de reparto presupuestada considera el costo variable de mantener el stock en los centros de distribución de provincias, pero el escenario propuesto no mantiene stock en los almacenes.

En este proyecto, el resultado más importante del escenario propuesto es la asignación adecuada de la flota, usando de mejor forma posible los tráileres, asegurando su máxima ocupación y reduciendo los costos de transporte de forma significativa.

## 5. CAPÍTULO 5

### 5.1. CONCLUSIONES

Considerando el objetivo general planteado al inicio del proyecto, el costo de distribución de la “Empresa de Bebidas ABC” usando el escenario propuesto, con respecto al escenario actual y al presupuesto, disminuye 13% y 27%. En este sentido se afirma que el costo de distribución en épocas de alta demanda es optimizado usando el escenario propuesto, asegurando además contar con capacidad suficiente para satisfacer la demanda durante el próximo lustro.

Revisando los objetivos específicos del proyecto se realizan las siguientes conclusiones:

- El modelo matemático de localización de bodegas en la ciudad de Quito contempla la apertura de una única bodega en el sector de Pifo, donde las vías de circulación no cuentan con la restricción de “pico y placa”, ni con restricciones de circulación de un barrio residencial como es del caso del barrio donde está ubicada la fábrica.
- El escenario propuesto entrega un plan de transporte considerando la producción semanal, la capacidad de almacenaje de los centros de distribución primarios, la capacidad de transporte y los tiempos de duración de los viajes desde los centros de distribución primarios hasta los centros de distribución secundarios, y la satisfacción de la demanda de los sectores de reparto.

En este sentido los parámetros de utilización del escenario propuesto son:

- 71% de la capacidad de producción semanal,
- 100% de los tráileres del operador A,
- 8% de los tráileres del operador C,
- 51% del tiempo disponible de los tráileres,

- 84% de la capacidad de transporte de los tráileres,
- 5% de la capacidad de almacenaje de los centros de distribución secundario,
- 100% de satisfacción de la demanda.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

En este proyecto se encuentran algunas oportunidades de mejora, las cuales se detallan a continuación como recomendaciones para aproximar con mayor precisión el plan de transporte:

- Utilizar en el modelo matemático únicamente los costos variables de almacenaje y transporte.
- Separar la producción y demanda semanal por tipo de envase (presentaciones de 12 botellas de 600 c.c., 24 botellas de 330 c.c., maltas y aguas).
- Contar como parámetros de entrada de producción la capacidad de producción por cada presentación, la cual no será mayor a la capacidad de producción total de las plantas.
- Definir como planta productora de cada presentación de producto en el escenario propuesto la fábrica más utilizada en la realidad por la “Empresa de Bebidas ABC”.
- Aplicar como restricción de capacidad la regla de negocio que los centros de distribución primarios como de provincias deben mantener al final de la semana producto equivalente a la mitad de la demanda de la siguiente

semana, siempre y cuando esta cantidad sea menor que la capacidad de almacenaje.

- Optimizar la cantidad de centros de distribución de provincias, usando modelos de localización, para disminuir el costo de almacenaje.
- Considerar en el escenario propuesto la regla de negocio que la duración de los viajes para entregar producto a los clientes detallistas no será mayor de 72 horas semanales, asegurando el cumplimiento de horas trabajadas por semana de los distribuidores según los principios de seguridad de la “Empresa de Bebidas ABC”.

## ANEXOS

### ANEXO A. FORMULACIÓN DEL MODELO EN GAMS PARA PLAN DE TRANSPORTE

#### set

**i** planta abastecedora /1\*2/  
**j** depot almacenamiento /1\*2/  
**k** distribuidor /1\*69/  
**l** semana del plan /1\*25/  
**m** trailer proveedor A /1\*85/  
**n** trailer proveedor B /1\*40/  
alias (k,p)

#### parameter

**cap\_prod(i)** capacidad de producción de las plantas  
**cap\_alm(j)** capacidad de almacenaje de las bodegas  
**cst\_alm(j)** costo variable de almacenaje de las bodegas  
**cap\_dist(k)** capacidad de almacenaje de los distribuidores  
**cost\_dist(k)** costo variable de almacenaje de los distribuidores

#### table

**transp(i,j)** costo variable de transp primario desde la planta i a la bodega j  
**transl(k,j)** costo variable de transp logistico desde la bodega j al distribuidor k con el operador A  
**translb(k,j)** costo variable de transporte logistico desde la bodega j a distribuidor k con el operador B  
**translc(k,j)** costo variable de transporte logistico desde la bodega j al distribuidor k con el operador C  
**duracion(k,j)** duracion de viaje de transporte logistico desde la bodega j al distribuidor k  
**demanda(k,l)** demanda estimada del distribuidor k en la semana l  
**reparto(k,p)** costo reparto

#### variables

**S1(j,l)** stock del almacen j en la semana l  
**S2(k,l)** stock del distribuidor k en la semana l  
**X1(i,j,l)** producto enviado desde la fabrica i al almacen j en la semana l  
**X2(j,k,l)** producto enviado desde el almacen j al distribuidor k en la semana l  
**X3(k,p,l)** producto enviado desde el distribuidor k a la zona p en la semana l  
**Gasto** costo de transporte total desde planta al mercado  
**TL(l,j,k,m)** producto enviado en la semana l desde el almacen j al distribuidor k en el trailer m del proveedor A  
**Vj1(l,j,k,m)** viaje realizado en la semana l desde el almacen j al distribuidor k en el trailer m del proveedor A  
**B1(l,j,k,n)** producto realizado en la semana l desde el almacen j al distribuidor k en la plataforma m del proveedor B  
**B2(l,j,k,n)** producto realizado en la semana l desde el almacen j al distribuidor k en el trailer n del proveedor C  
**Vj2(l,j,k,n)** viaje realizado en la semana l desde el almacen j al distribuidor k en el trailer m del proveedor C  
**Adm(l)** Verificación de uso de los m trailers en la semana l  
**Flt(l,n)** verificación de uso de los trailers n en la semana l

**positive variables** x1, x2, x3, S1, S2;

**binary variables** Vj1, Vj2, Adm, Flt;

### equations

bal\_almacen(j,l)  
bal\_distrib(k,l)  
cap\_fabrica(i,l)  
cap\_centros(j,l)  
cap\_distribuidores(k,l)  
satisf\_demanda(k,l)  
cap\_trailer(l,j,k,m)  
cap\_plat(l,j,k,n)  
plan\_tl(j,k,l)  
horas1(m,l)  
horas2(n,l)  
Viajes1(l,j,k,m)  
viajes2(l,j,k,n)  
contrato(l)  
flete(l,n);

bal\_almacen(j,l)\$(ord(l) gt 1).. s1(j,l-1) + sum[i,x1(i,j,l-1)] - sum[k,x2(j,k,l)] =E= s1(j,l);  
bal\_distrib(k,l)\$(ord(l) gt 1).. s2(k,l-1) + sum[j,x2(j,k,l-1)] - sum[p,x3(k,p,l)] =E= s2(k,l);  
cap\_fabrica(i,l).. sum[j,x1(i,j,l)] =L= cap\_prod(i);  
cap\_centros(j,l).. s1(j,l) =L= cap\_alm(j);  
cap\_distribuidores(k,l).. s2(k,l) =L= cap\_dist(k);  
satisf\_demanda(k,l).. sum[p,x3(k,p,l)] =E= demanda(k,l);  
cap\_trailer(l,j,k,m).. TL(l,j,k,m) =L= 125;  
cap\_plat(l,j,k,n).. B2(l,j,k,n) =L= 125;  
plan\_tl(j,k,l).. sum[m,TL(l,j,k,m)] + sum[n,B1(l,j,k,n)] + sum[n,B2(l,j,k,n)] =E= x2(j,k,l);  
Viajes1(l,j,k,m).. TL(l,j,k,m) =L= 10000\*Vj1(l,j,k,m);  
Viajes2(l,j,k,n).. B2(l,j,k,n) =L= 10000\*Vj2(l,j,k,n);  
horas1(m,l).. sum[(j,k),Vj1(l,j,k,m)\*duracion(k,j)]=L= 168;  
horas2(n,l).. sum[(j,k),Vj2(l,j,k,n)\*duracion(k,j)]=L= 168;  
contrato(l).. sum[(j,k,m),Vj1(l,j,k,m)] =L= 10000\*Adm(l);  
flete(l,n).. sum[(j,k),Vj2(l,j,k,n)] =L= 10000\*Flt(l,n);

### Equations

costo;  
costo.. gasto =E=  
sum[(j,l),s1(j,l)\*cst\_alm(j)] + sum[(k,l),s2(k,l)\*cost\_dist(k)] +  
sum[(i,j,l),x1(i,j,l)\*transp(i,j)] + sum[(l,j,k,m),TL(l,j,k,m)\*transl(k,j)] +  
sum[(l,j,k,n),B1(l,j,k,n)\*translb(k,j)] + sum[(l,j,k,n),B2(l,j,k,n)\*translc(k,j)] +  
sum[(k,p,l),x3(k,p,l)\*reparto(k,p)] + sum[l,Adm(l)\*10000] +  
sum[(l,n),Flt(l,n)\*150]

## ANEXO B. FORMULACIÓN DEL MODELO EN GAMS PARA LOCALIZACIÓN DE BODEGAS

### SET

**i** /'Calacali', 'Calderon', 'Pifo', 'Cumbaya', 'LosChillos', 'Conocoto'/

**j** /'Calacali', 'Calderon', 'Pifo', 'Cumbaya', 'LosChillos', 'Conocoto'/

### parameter

**T1(i)**/Calacali 3.00, Calderon 1.47, Pifo 1.00, Cumbaya 1.00, LosChillos 1.33, Conocoto 2.00/

**CAP(i)**/Calacali 80000, Calderon 18400, Pifo 20000, Cumbaya 15000, LosChillos 15200, Conocoto 28000/

**DEM(j)**/Calacali 3333, Calderon 3056, Pifo 3056, Cumbaya 2778, LosChillos 2500, Conocoto 2778/

**CFJ(i)**/Calacali 40000, Calderon 6500, Pifo 15000, Cumbaya 15000, LosChillos 5000, Conocoto 30000/

### table

**T3(i,j)** costo variable de reparto desde la bodega i hasta la zona j

	Calacali	Calderon	Pifo	Cumbaya	LosChillos	Conocoto
Calacali	5	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83
Calderon	6.29	5	6.29	6.29	6.29	6.29
Pifo	6.14	6.14	5	6.14	6.14	6.14
Cumbaya	5	5	5	5	5	5
LosChillos	5.53	5.53	5.53	5.53	5.53	5.53
Conocoto	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63

### scalar

**M** /22000/

### variables

**OBJ** Funcion Objetivo

**X(i)** Hl semana de productos a transportar desde la fábrica Cumbaya hacia la bodega i

**Y(i,j)** Hl semana de productos a transportar desde el bodega i hacia el sector j

**W(i)** 1 si la bodega i se abre 0 de lo contrario

**positive variables** X, Y;

**binary variables** W;

### equations

COSTO, CAPACIDAD(i), CAPBOG(i), DEMANDA(j), BALANCE(i), BODEGAS;

CAPACIDAD(i)..  $X(i) \leq CAP(i)$ ;

CAPBOG(i)..  $X(i) \leq M * W(i)$ ;

DEMANDA(j)..  $\sum [i, Y(i,j)] = e = DEM(j)$ ;

BALANCE(i)..  $X(i) = e = \sum [j, Y(i,j)]$ ;

BODEGAS..  $\sum [i, W(i)] = g = 2$ ;

COSTO.. OBJ = e =

$\sum [i, T1(i) * X(i)] + \sum [(i,j), T3(i,j) * Y(i,j)] + \sum [i, CFJ(i) * W(i)]$ ;



**MODEL** LOCALIZACION /ALL/  
**SOLVE** LOCALIZACION USING MIP MINIMIZING OBJ  
**DISPLAY** X.L, Y.L, W.L, OBJ.L

# ANEXO C. RESOLUCIÓN DEL MODELO EN GAMS PARA LOCALIZACIÓN DE BODEGAS

Model Statistics SOLVE LOCALIZACION Using MIP From line 43

## MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	6	SINGLE EQUATIONS	26
BLOCKS OF VARIABLES	4	SINGLE VARIABLES	49
NON ZERO ELEMENTS	151	DISCRETE VARIABLES	6

GENERATION TIME = 0.219 SECONDS 4 Mb WIN240-240 Feb 14, 2013

EXECUTION TIME = 0.219 SECONDS 4 Mb WIN240-240 Feb 14, 2013  
 GAMS Rev 240 WEX-VS8 24.0.2 x86/MS Windows 01/25/15 16:36:36 Page 5  
 General Algebraic Modeling System  
 Solution Report SOLVE LOCALIZACION Using MIP From line 43

## SOLVE SUMMARY

MODEL LOCALIZACION OBJECTIVE OBJ  
 TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE  
 SOLVER CPLEX FROM LINE 43

\*\*\*\* SOLVER STATUS 1 Normal Completion  
 \*\*\*\* MODEL STATUS 8 Integer Solution  
 \*\*\*\* OBJECTIVE VALUE 135006.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT 0.764 1000.000  
 ITERATION COUNT, LIMIT 10 2000000000

IBM ILOG CPLEX Feb 14, 2013 24.0.2 WIN 38380.38394 VS8 x86/MS Windows  
 Cplex 12.5.0.0

MIP status(102): integer optimal, tolerance  
 Cplex Time: 0.19sec (det. 0.22 ticks)  
 Fixing integer variables, and solving final LP...  
 Fixed MIP status(1): optimal  
 Cplex Time: 0.00sec (det. 0.03 ticks)  
 Solution satisfies tolerances.

MIP Solution: 135006.000000 (10 iterations, 0 nodes)  
 Final Solve: 135006.000000 (0 iterations)

Best possible: 126043.100489  
 Absolute gap: 8962.899511  
 Relative gap: 0.066389

## LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- EQU COSTO . . . 1.000

---- EQU CAPACIDAD

## LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

Calacali	-INF	. 80000.000	.
Calderon	-INF	. 18400.000	.
Pifo	-INF	3056.000 20000.000	.
Cumbaya	-INF	14445.000 15000.000	.
LosChillos	-INF	. 15200.000	.
Conocoto	-INF	. 28000.000	.

---- EQU CAPBOG

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Calacali	-INF	.	.	.
Calderon	-INF	.	.	.
Pifo	-INF	-1.894E+4	.	.
Cumbaya	-INF	-7555.000	.	.
LosChillos	-INF	.	.	.
Conocoto	-INF	.	.	.

---- EQU DEMANDA

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Calacali	3333.000	3333.000	3333.000	6.000
Calderon	3056.000	3056.000	3056.000	6.000
Pifo	3056.000	3056.000	3056.000	6.000
Cumbaya	2778.000	2778.000	2778.000	6.000
LosChillos	2500.000	2500.000	2500.000	6.000
Conocoto	2778.000	2778.000	2778.000	6.000

---- EQU BALANCE

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Calacali	.	.	1.000	.
Calderon	.	.	1.000	.
Pifo	.	.	1.000	.
Cumbaya	.	.	1.000	.
LosChillos	.	.	0.470	.
Conocoto	.	.	.	.

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- EQU BODEGAS 2.000 2.000 +INF .

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- VAR OBJ -INF 1.3501E+5 +INF .

OBJ Funcion Objetivo

---- VAR X HI semana de productos a transportar desde la fabrica Cumbaya hacia la bodega i

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

Calacali	.	.	+INF	2.000
Calderon	.	.	+INF	0.470
Pifo	.	3056.000	+INF	.
Cumbaya	.	14445.000	+INF	.
LosChillos	.	.	+INF	0.860
Conocoto	.	.	+INF	2.000

---- VAR Y HI semana de productos a transportar desde el bodega i hacia el sector j

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

Calacali	.Calacali	.	.	+INF	.
Calacali	.Calderon	.	.	+INF	3.830
Calacali	.Pifo	.	.	+INF	3.830
Calacali	.Cumbaya	.	.	+INF	3.830
Calacali	.LosChillos	.	.	+INF	3.830
Calacali	.Conocoto	.	.	+INF	3.830
Calderon	.Calacali	.	.	+INF	1.290
Calderon	.Calderon	.	.	+INF	.
Calderon	.Pifo	.	.	+INF	1.290
Calderon	.Cumbaya	.	.	+INF	1.290
Calderon	.LosChillos	.	.	+INF	1.290

Calderon .Conocoto	.	.	.	+INF	1.290
Pifo .Calacali	.	.	.	+INF	1.140
Pifo .Calderon	.	.	.	+INF	1.140
Pifo .Pifo	.	3056.000	.	+INF	.
Pifo .Cumbaya	.	.	.	+INF	1.140
Pifo .LosChillos	.	.	.	+INF	1.140
Pifo .Conocoto	.	.	.	+INF	1.140
Cumbaya .Calacali	.	3333.000	.	+INF	.
Cumbaya .Calderon	.	3056.000	.	+INF	.
Cumbaya .Pifo	.	.	.	+INF	EPS
Cumbaya .Cumbaya	.	2778.000	.	+INF	.
Cumbaya .LosChillos	.	2500.000	.	+INF	.
Cumbaya .Conocoto	.	2778.000	.	+INF	.
LosChillos.Calacali	.	.	.	+INF	.
LosChillos.Calderon	.	.	.	+INF	EPS
LosChillos.Pifo	.	.	.	+INF	EPS
LosChillos.Cumbaya	.	.	.	+INF	EPS
LosChillos.LosChillos	.	.	.	+INF	EPS
LosChillos.Conocoto	.	.	.	+INF	EPS
Conocoto .Calacali	.	.	.	+INF	0.630
Conocoto .Calderon	.	.	.	+INF	0.630
Conocoto .Pifo	.	.	.	+INF	0.630
Conocoto .Cumbaya	.	.	.	+INF	0.630
Conocoto .LosChillos	.	.	.	+INF	0.630
Conocoto .Conocoto	.	.	.	+INF	0.630

---- VAR W 1 si la bodega i se abre 0 de lo contrario

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

Calacali	.	.	1.000	40000.000
Calderon	.	.	1.000	6500.000
Pifo	.	1.000	1.000	15000.000
Cumbaya	.	1.000	1.000	15000.000
LosChillos	.	.	1.000	5000.000
Conocoto	.	.	1.000	30000.000

\*\*\*\* REPORT SUMMARY : 0 NONOPT  
0 INFEASIBLE  
0 UNBOUNDED

# ANEXO D. RESOLUCIÓN DEL MODELO EN GAMS PARA ESCENARIO PROPUESTO

Model Statistics SOLVE plan\_pico Using MIP From line 409  
MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS 14 SINGLE EQUATIONS 455,617  
BLOCKS OF VARIABLES 11 SINGLE VARIABLES 540,151  
NON ZERO ELEMENTS 1,551,502 DISCRETE VARIABLES 224,000

GENERATION TIME = 2.558 SECONDS 113 Mb WIN240-240 Feb 14, 2013

EXECUTION TIME = 2.558 SECONDS 113 Mb WIN240-240 Feb 14, 2013

GAMS Rev 240 WEX-VS8 24.0.2 x86/MS Windows 01/25/15 16:43:37 Page 5  
General Algebraic Modeling System  
Solution Report SOLVE plan\_pico Using MIP From line 409

## SOLVE SUMMARY

MODEL plan\_pico OBJECTIVE gasto  
TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE  
SOLVER CPLEX FROM LINE 409

\*\*\* SOLVER STATUS 1 Normal Completion  
\*\*\* MODEL STATUS 8 Integer Solution  
\*\*\* OBJECTIVE VALUE 21675622.3000

RESOURCE USAGE, LIMIT 16.505 1000.000  
ITERATION COUNT, LIMIT 4886 2000000000

IBM ILOG CPLEX Feb 14, 2013 24.0.2 WIN 38380.38394 VS8 x86/MS Windows  
--- GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.  
Cplex 12.5.0.0

MIP status(102): integer optimal, tolerance  
Cplex Time: 15.02sec (det. 13930.35 ticks)  
Fixing integer variables, and solving final LP...  
Fixed MIP status(1): optimal  
Cplex Time: 0.56sec (det. 405.87 ticks)  
Solution satisfies tolerances.

MIP Solution: 21675622.300000 (3809 iterations, 0 nodes)  
Final Solve: 21675622.300000 (1077 iterations)

Best possible: 21675273.900000  
Absolute gap: 348.400000  
Relative gap: 0.000016

---- 409 VARIABLE X1.L producto enviado desde la fabrica i al almacen j en l  
a semana l

	1	2	3	4	5	6
1.1	68724.000	70119.000	71629.000	74386.000	84609.000	
2.2	24799.000	46459.000	44893.000	46542.000	48325.000	54513.000
+	7	8	9	10	11	12
1.1	55453.000	66505.000	73539.000	74782.000	57921.000	82311.000
2.2	37393.000	43521.000	40689.000	45093.000	37316.000	45764.000
+	13	14	15	16	17	18
1.1	71529.000	76686.000	82615.000	64606.000	78303.000	83819.000

2.2 42935.000 46450.000 46488.000 44474.000 47756.000 48584.000

+ 19 20 21 22 23 24

1.1 86344.000 85346.000 97500.000 97500.000 97500.000 97500.000

2.2 50443.000 52162.000 57268.000 66470.000 71500.000

---- 409 VARIABLE S1.L stock del almacen j en la semana l

1 2 21 22 23

1 69288.000 239.500 5829.000 14293.000 8325.000

2 16806.000 1750.000

---- 409 VARIABLE X2.L producto enviado desde el almacen j al distribuidor k en la semana l

1 2 3 4 5 6

1.5 3219.000 5616.000 5032.000 6381.000 4731.000 5476.000

1.8 3366.500 4498.000 3968.000 4195.000

1.9 206.000 508.000 486.000 543.000 545.000

1.10 376.000 2683.000 2589.000 2144.000 2404.000 2803.000

1.11 2219.000 3589.000 3046.000 2914.000 3257.000 3270.000

1.12 500.000 1196.000 1015.000 971.000 1086.000 1090.000

1.13 333.000 1523.000 1457.000 1628.000 1635.000

1.14 189.000 897.000 762.000 728.000 814.000 818.000

1.15 242.500 508.000 486.000 543.000 545.000

1.16 298.000 762.000 728.000 814.000 818.000

1.17 434.500 508.000 486.000 543.000 545.000

1.18 36.000 1196.000 1015.000 971.000 1086.000 1090.000

1.19 455.500 762.000 728.000 814.000 818.000

1.20 155.500 5548.000 5770.000 6388.000 6064.000 7302.000

1.21 1061.000 1794.000 1523.000 1457.000 1628.000 1635.000

1.22 759.000 2311.000 2333.000 2358.000 2278.000 2276.000

1.23 141.000 6250.000 7058.000 6699.000 6541.000 6462.000

1.24 800.500 2094.000 1777.000 1700.000 1900.000 1908.000

1.25 1098.000 3997.000 3720.000 4257.000 3846.000 3902.000

1.30 28183.000 29908.000 25386.000 24282.000 27141.000 27253.000

2.1 2127.500 5031.000 4882.000 4116.000 4158.000 4517.000

2.2 305.000 991.000 976.000 865.000 907.000 937.000

2.3 1634.500 2174.000 2452.000 2221.000 2151.000 2207.000

2.4 15921.000 16836.000 14923.000 17082.000 17500.000

2.6 2095.500 4552.000 4869.000 4762.000 5172.000

2.7 1014.500 4721.000 5176.000 4955.000 5155.000 5394.000

2.26 772.000 1487.000 1464.000 1298.000 1361.000 1405.000

2.27 200.000 1220.000 1081.000 1134.000 1171.000

2.28 1118.000 4616.000 4091.000 5090.000 4523.000 4366.000

2.29 2390.000 3879.000 3834.000 3815.000 3495.000 3782.000

2.31 795.000 907.000 937.000

2.32 489.500 976.000 865.000 907.000 937.000

+ 7 8 9 10 11 12

1.5 5722.000 5426.000 4684.000 5587.000 5111.000 4641.000

1.8 4800.000 3119.000 3955.000 4472.000 4445.000 3295.000

1.9 623.000 362.000 487.000 544.000 565.000 417.000

1.10 3441.000 1923.000 2540.000 2563.000 2658.000 2087.000

1.11 3735.000 2220.000 2875.000 3265.000 3389.000 2501.000

1.12 1245.000 725.000 973.000 1088.000 1130.000 834.000

1.13 1868.000 1087.000 1460.000 1633.000 1695.000 1251.000

1.14 934.000 544.000 730.000 816.000 847.000 625.000

1.15 623.000 362.000 487.000 544.000 565.000 417.000

1.16 934.000 544.000 730.000 816.000 847.000 625.000

1.17 623.000 362.000 487.000 544.000 565.000 417.000

1.18 1245.000 725.000 973.000 1088.000 1130.000 834.000

1.19 934.000 544.000 730.000 816.000 847.000 625.000

1.20 6972.000 5546.000 6097.000 7008.000 7128.000 5342.000

1.21	1868.000	1087.000	1460.000	1633.000	1695.000	1251.000
1.22	2785.000	2255.000	3009.000	2487.000	2196.000	2224.000
1.23	7975.000	5566.000	5594.000	5932.000	6096.000	5088.000
1.24	2179.000	1269.000	1703.000	1905.000	1977.000	1459.000
1.25	4977.000	3662.000	3200.000	3589.000	3653.000	3143.000
1.30	31126.000	18125.000	24331.000	27209.000	28243.000	20845.000
2.1	6185.000	2981.000	4419.000	4035.000	4621.000	3758.000
2.2	1175.000	756.000	892.000	809.000	932.000	740.000
2.3	4018.000	1687.000	1826.000	2036.000	2579.000	2117.000
2.4	17500.000	13035.000	15389.000	13950.000	16072.000	12762.000
2.6	5732.000	4994.000	4893.000	4605.000	4756.000	3957.000
2.7	5680.000	3617.000	4484.000	4093.000	4370.000	4374.000
2.26	1763.000	1134.000	1338.000	1213.000	1398.000	1110.000
2.27	1469.000	945.000	1115.000	1011.000	1165.000	925.000
2.28	4452.000	3924.000	4501.000	4319.000	4152.000	3507.000
2.29	4189.000	2808.000	2880.000	3000.000	3184.000	2586.000
2.31	1175.000	756.000	892.000	809.000	932.000	740.000
2.32	1175.000	756.000	892.000	809.000	932.000	740.000

+ 13 14 15 16 17 18

1.5	6328.000	4893.000	5338.000	5621.000	5712.000	4543.000
1.8	5183.000	4194.000	4230.000	5162.000	4332.000	5831.000
1.9	608.000	548.000	575.000	583.000	446.000	583.000
1.10	2654.000	2072.000	2928.000	4314.000	1896.000	2069.000
1.11	3649.000	3287.000	3451.000	3500.000	2676.000	3501.000
1.12	1216.000	1096.000	1150.000	1167.000	892.000	1167.000
1.13	1824.000	1643.000	1725.000	1750.000	1338.000	1750.000
1.14	912.000	822.000	863.000	875.000	669.000	875.000
1.15	608.000	548.000	575.000	583.000	446.000	583.000
1.16	912.000	822.000	863.000	875.000	669.000	875.000
1.17	608.000	548.000	575.000	583.000	446.000	583.000
1.18	1216.000	1096.000	1150.000	1167.000	892.000	1167.000
1.19	912.000	822.000	863.000	875.000	669.000	875.000
1.20	6673.000	6001.000	6480.000	7536.000	5802.000	8172.000
1.21	1824.000	1643.000	1725.000	1750.000	1338.000	1750.000
1.22	2673.000	2433.000	2590.000	2648.000	2239.000	2894.000
1.23	7037.000	6036.000	6739.000	7729.000	6293.000	6170.000
1.24	2128.000	1917.000	2013.000	2042.000	1561.000	2042.000
1.25	4942.000	3717.000	4096.000	4688.000	3987.000	3698.000
1.30	30404.000	27391.000	28757.000	29167.000	22303.000	29175.000
2.1	5354.000	4255.000	5274.000	5286.000	4106.000	4572.000
2.2	886.000	944.000	1005.000	940.000	845.000	1014.000
2.3	1906.000	2003.000	2597.000	2679.000	2204.000	2170.000
2.4	15286.000	16292.000	17336.000	16212.000	16047.000	17500.000
2.6	5599.000	4389.000	4609.000	4379.000	5042.000	4594.000
2.7	4527.000	3623.000	4099.000	4682.000	4299.000	4804.000
2.26	1329.000	1417.000	1507.000	1410.000	1267.000	1521.000
2.27	1108.000	1181.000	1256.000	1175.000	1056.000	1268.000
2.28	4692.000	4115.000	3812.000	4521.000	4599.000	4987.000
2.29	3305.000	2828.000	2945.000	3324.000	3319.000	3298.000
2.31	886.000	944.000	1005.000	940.000	845.000	1014.000
2.32	886.000	944.000	1005.000	940.000	845.000	1014.000

+ 19 20 21 22 23 24

1.4		3621.000	2500.000	1750.000	4084.000	
1.5	3974.000	4631.000	3846.000			
1.8	6595.000	6969.000	6502.000	7379.000	8058.000	10000.000
1.9	637.000	642.000	499.000	674.000	775.000	785.000
1.10	3699.000	2323.000	2701.000	3377.000	3406.000	4177.000
1.11	3821.000	3854.000	2996.000	4043.000	4652.000	4713.000
1.12	1274.000	1285.000	999.000	1348.000	1551.000	1571.000
1.13	1910.000	1927.000	1498.000	2021.000	2326.000	2356.000
1.14	955.000	963.000	749.000	1011.000	1163.000	1178.000
1.15	637.000	642.000	499.000	674.000	775.000	785.000
1.16	955.000	963.000	749.000	1011.000	1163.000	1178.000
1.17	637.000	642.000	499.000	674.000	810.000	750.000
1.18	1274.000	1285.000	999.000	1348.000	1551.000	1571.000
1.19	955.000	963.000	749.000	1011.000	1163.000	1178.000

1.20	6526.000	7738.000	9821.000	8300.000	9811.000	10072.000
1.21	1910.000	1927.000	1498.000	2021.000	2326.000	2356.000
1.22	2632.000	3033.000	2958.000	3172.000	3678.000	4090.000
1.23	6604.000	6929.000	6944.000	7625.000	11500.000	6625.000
1.24	2229.000	2248.000	1748.000	2358.000	2714.000	2749.000
1.25	4754.000	5266.000	4674.000	4799.000	5531.000	6334.000
1.30	31841.000	32114.000	24968.000	33690.000	38765.000	39273.000
2.1	5558.000	5758.000	5589.000	6410.000	6512.000	7663.000
2.2	1023.000	1092.000	1220.000	1156.000	1124.000	1251.000
2.3	2675.000	2384.000	2588.000	2625.000	3625.000	3871.000
2.4	17500.000	17500.000	17500.000	17500.000	17500.000	17500.000
2.5			4727.000	6078.000	7186.000	
2.6	5638.000	5394.000	5099.000	5626.000	7396.000	8673.000
2.7	3528.000	5998.000	4016.000	4886.000	5819.000	7592.000
2.26	1535.000	1637.000	1830.000	1733.000	1688.000	1875.000
2.27	1279.000	1365.000	1525.000	1444.000	1405.000	1564.000
2.28	4933.000	4236.000	5460.000	5429.000	6898.000	8323.000
2.29	2869.000	2895.000	4895.000	3420.000	4427.000	5250.000
2.31	1023.000	1092.000	1220.000	1156.000	1124.000	1251.000
2.32	1023.000	1092.000	1220.000	1156.000	1124.000	1251.000

+ 25

1.30 97500.000

---- 409 VARIABLE S2.L stock del distribuidor k en la semana l

	1	2	3	4	6	7
1	2676.500					
2	675.000					
3	1420.500					
4	18088.000	1175.000			1428.000	2773.000
5	2496.000					
6	6325.500	2115.500				
7	3491.500					
8	8788.500	4785.500	526.500			
9	956.000	392.000				
10	2326.000					
11	1163.000					
12	627.000					
13	3152.000	1461.000				
14	657.000					
15	919.500	355.500				
16	1445.000	599.000				
17	727.500	163.500				
18	1091.000					
19	1287.500	441.500				
20	5902.500					
21	630.000					
22	1585.000					
23	6768.000		21.000			
24	1172.500					
25	3475.000					
26	699.000					
27	2265.000	1039.000				
28	3175.000					
29	1678.000					
31	3017.000	2037.000	1046.000	70.000		
32	1481.500	501.500				

+ 9 18 19 20 22 23

3				39.000	63.000	
4		1479.000	1482.000	1330.000	74.000	140.000
11	45.000					
23				100.000	132.000	

+ 24



8 57.000  
 17 35.000  
 23 3379.000  
 26 2.000

---- 409 VARIABLE X3.L producto enviado desde el distribuidor k a la zona p en la semana l

	2	3	4	5	6	7
1.1	4804.000	5031.000	4882.000	4116.000	4158.000	4517.000
2.2	980.000	991.000	976.000	865.000	907.000	937.000
3.3	3055.000	2174.000	2452.000	2221.000	2151.000	2207.000
4.4	16913.000	17096.000	16836.000	14923.000	15654.000	16155.000
5.5	5715.000	5616.000	5032.000	6381.000	4731.000	5476.000
6.6	4210.000	4211.000	4552.000	4869.000	4762.000	5172.000
7.7	4506.000	4721.000	5176.000	4955.000	5155.000	5394.000
8.8	4003.000	4259.000	3893.000	4498.000	3968.000	4195.000
9.9	564.000	598.000	508.000	486.000	543.000	545.000
10.10	2702.000	2683.000	2589.000	2144.000	2404.000	2803.000
11.11	3382.000	3589.000	3046.000	2914.000	3257.000	3270.000
12.12	1127.000	1196.000	1015.000	971.000	1086.000	1090.000
13.13	1691.000	1794.000	1523.000	1457.000	1628.000	1635.000
14.14	846.000	897.000	762.000	728.000	814.000	818.000
15.15	564.000	598.000	508.000	486.000	543.000	545.000
16.16	846.000	897.000	762.000	728.000	814.000	818.000
17.17	564.000	598.000	508.000	486.000	543.000	545.000
18.18	1127.000	1196.000	1015.000	971.000	1086.000	1090.000
19.19	846.000	897.000	762.000	728.000	814.000	818.000
20.20	6058.000	5548.000	5770.000	6388.000	6064.000	7302.000
21.21	1691.000	1794.000	1523.000	1457.000	1628.000	1635.000
22.22	2344.000	2311.000	2333.000	2358.000	2278.000	2276.000
23.23	6909.000	6229.000	7079.000	6699.000	6541.000	6462.000
24.24	1973.000	2094.000	1777.000	1700.000	1900.000	1908.000
25.25	4573.000	3997.000	3720.000	4257.000	3846.000	3902.000
26.26	1471.000	1487.000	1464.000	1298.000	1361.000	1405.000
27.27	1226.000	1239.000	1220.000	1081.000	1134.000	1171.000
28.28	4293.000	4616.000	4091.000	5090.000	4523.000	4366.000
29.29	4068.000	3879.000	3834.000	3815.000	3495.000	3782.000
30.30	28183.000	29908.000	25386.000	24282.000	27141.000	27253.000
31.31	980.000	991.000	976.000	865.000	907.000	937.000
32.32	980.000	991.000	976.000	865.000	907.000	937.000

+	8	9	10	11	12	13
1.1	6185.000	2981.000	4419.000	4035.000	4621.000	3758.000
2.2	1175.000	756.000	892.000	809.000	932.000	740.000
3.3	4018.000	1687.000	1826.000	2036.000	2579.000	2117.000
4.4	20273.000	13035.000	15389.000	13950.000	16072.000	12762.000
5.5	5722.000	5426.000	4684.000	5587.000	5111.000	4641.000
6.6	5732.000	4994.000	4893.000	4605.000	4756.000	3957.000
7.7	5680.000	3617.000	4484.000	4093.000	4370.000	4374.000
8.8	4800.000	3119.000	3955.000	4472.000	4445.000	3295.000
9.9	623.000	362.000	487.000	544.000	565.000	417.000
10.10	3441.000	1923.000	2540.000	2563.000	2658.000	2087.000
11.11	3735.000	2175.000	2920.000	3265.000	3389.000	2501.000
12.12	1245.000	725.000	973.000	1088.000	1130.000	834.000
13.13	1868.000	1087.000	1460.000	1633.000	1695.000	1251.000
14.14	934.000	544.000	730.000	816.000	847.000	625.000
15.15	623.000	362.000	487.000	544.000	565.000	417.000
16.16	934.000	544.000	730.000	816.000	847.000	625.000
17.17	623.000	362.000	487.000	544.000	565.000	417.000
18.18	1245.000	725.000	973.000	1088.000	1130.000	834.000
19.19	934.000	544.000	730.000	816.000	847.000	625.000
20.20	6972.000	5546.000	6097.000	7008.000	7128.000	5342.000
21.21	1868.000	1087.000	1460.000	1633.000	1695.000	1251.000
22.22	2785.000	2255.000	3009.000	2487.000	2196.000	2224.000
23.23	7975.000	5566.000	5594.000	5932.000	6096.000	5088.000

24.24	2179.000	1269.000	1703.000	1905.000	1977.000	1459.000
25.25	4977.000	3662.000	3200.000	3589.000	3653.000	3143.000
26.26	1763.000	1134.000	1338.000	1213.000	1398.000	1110.000
27.27	1469.000	945.000	1115.000	1011.000	1165.000	925.000
28.28	4452.000	3924.000	4501.000	4319.000	4152.000	3507.000
29.29	4189.000	2808.000	2880.000	3000.000	3184.000	2586.000
30.30	31126.000	18125.000	24331.000	27209.000	28243.000	20845.000
31.31	1175.000	756.000	892.000	809.000	932.000	740.000
32.32	1175.000	756.000	892.000	809.000	932.000	740.000

+ 14 15 16 17 18 19

1.1	5354.000	4255.000	5274.000	5286.000	4106.000	4572.000
2.2	886.000	944.000	1005.000	940.000	845.000	1014.000
3.3	1906.000	2003.000	2597.000	2679.000	2204.000	2170.000
4.4	15286.000	16292.000	17336.000	16212.000	14568.000	17497.000
5.5	6328.000	4893.000	5338.000	5621.000	5712.000	4543.000
6.6	5599.000	4389.000	4609.000	4379.000	5042.000	4594.000
7.7	4527.000	3623.000	4099.000	4682.000	4299.000	4804.000
8.8	5183.000	4194.000	4230.000	5162.000	4332.000	5831.000
9.9	608.000	548.000	575.000	583.000	446.000	583.000
10.10	2654.000	2072.000	2928.000	4314.000	1896.000	2069.000
11.11	3649.000	3287.000	3451.000	3500.000	2676.000	3501.000
12.12	1216.000	1096.000	1150.000	1167.000	892.000	1167.000
13.13	1824.000	1643.000	1725.000	1750.000	1338.000	1750.000
14.14	912.000	822.000	863.000	875.000	669.000	875.000
15.15	608.000	548.000	575.000	583.000	446.000	583.000
16.16	912.000	822.000	863.000	875.000	669.000	875.000
17.17	608.000	548.000	575.000	583.000	446.000	583.000
18.18	1216.000	1096.000	1150.000	1167.000	892.000	1167.000
19.19	912.000	822.000	863.000	875.000	669.000	875.000
20.20	6673.000	6001.000	6480.000	7536.000	5802.000	8172.000
21.21	1824.000	1643.000	1725.000	1750.000	1338.000	1750.000
22.22	2673.000	2433.000	2590.000	2648.000	2239.000	2894.000
23.23	7037.000	6036.000	6739.000	7729.000	6293.000	6170.000
24.24	2128.000	1917.000	2013.000	2042.000	1561.000	2042.000
25.25	4942.000	3717.000	4096.000	4688.000	3987.000	3698.000
26.26	1329.000	1417.000	1507.000	1410.000	1267.000	1521.000
27.27	1108.000	1181.000	1256.000	1175.000	1056.000	1268.000
28.28	4692.000	4115.000	3812.000	4521.000	4599.000	4987.000
29.29	3305.000	2828.000	2945.000	3324.000	3319.000	3298.000
30.30	30404.000	27391.000	28757.000	29167.000	22303.000	29175.000
31.31	886.000	944.000	1005.000	940.000	845.000	1014.000
32.32	886.000	944.000	1005.000	940.000	845.000	1014.000

+ 20 21 22 23 24 25

1.1	5558.000	5758.000	5589.000	6410.000	6512.000	7663.000
2.2	1023.000	1092.000	1220.000	1156.000	1124.000	1251.000
3.3	2675.000	2384.000	2549.000	2601.000	3688.000	3871.000
4.4	17652.000	18830.000	21047.000	19934.000	19390.000	21584.000
5.5	3974.000	4631.000	3846.000	4727.000	6078.000	7186.000
6.6	5638.000	5394.000	5099.000	5626.000	7396.000	8673.000
7.7	3528.000	5998.000	4016.000	4886.000	5819.000	7592.000
8.8	6595.000	6969.000	6502.000	7379.000	8001.000	10057.000
9.9	637.000	642.000	499.000	674.000	775.000	785.000
10.10	3699.000	2323.000	2701.000	3377.000	3406.000	4177.000
11.11	3821.000	3854.000	2996.000	4043.000	4652.000	4713.000
12.12	1274.000	1285.000	999.000	1348.000	1551.000	1571.000
13.13	1910.000	1927.000	1498.000	2021.000	2326.000	2356.000
14.14	955.000	963.000	749.000	1011.000	1163.000	1178.000
15.15	637.000	642.000	499.000	674.000	775.000	785.000
16.16	955.000	963.000	749.000	1011.000	1163.000	1178.000
17.17	637.000	642.000	499.000	674.000	775.000	785.000
18.18	1274.000	1285.000	999.000	1348.000	1551.000	1571.000
19.19	955.000	963.000	749.000	1011.000	1163.000	1178.000
20.20	6526.000	7738.000	9821.000	8300.000	9811.000	10072.000
21.21	1910.000	1927.000	1498.000	2021.000	2326.000	2356.000
22.22	2632.000	3033.000	2958.000	3172.000	3678.000	4090.000
23.23	6604.000	6929.000	6844.000	7593.000	8253.000	10004.000

24.24	2229.000	2248.000	1748.000	2358.000	2714.000	2749.000
25.25	4754.000	5266.000	4674.000	4799.000	5531.000	6334.000
26.26	1535.000	1637.000	1830.000	1733.000	1686.000	1877.000
27.27	1279.000	1365.000	1525.000	1444.000	1405.000	1564.000
28.28	4933.000	4236.000	5460.000	5429.000	6898.000	8323.000
29.29	2869.000	2895.000	4895.000	3420.000	4427.000	5250.000
30.30	31841.000	32114.000	24968.000	33690.000	38765.000	39273.000
31.31	1023.000	1092.000	1220.000	1156.000	1124.000	1251.000
32.32	1023.000	1092.000	1220.000	1156.000	1124.000	1251.000

---- 409 EQUATION satisf\_demanda.L

	2	3	4	5	6	7
1	4804.000	5031.000	4882.000	4116.000	4158.000	4517.000
2	980.000	991.000	976.000	865.000	907.000	937.000
3	3055.000	2174.000	2452.000	2221.000	2151.000	2207.000
4	16913.000	17096.000	16836.000	14923.000	15654.000	16155.000
5	5715.000	5616.000	5032.000	6381.000	4731.000	5476.000
6	4210.000	4211.000	4552.000	4869.000	4762.000	5172.000
7	4506.000	4721.000	5176.000	4955.000	5155.000	5394.000
8	4003.000	4259.000	3893.000	4498.000	3968.000	4195.000
9	564.000	598.000	508.000	486.000	543.000	545.000
10	2702.000	2683.000	2589.000	2144.000	2404.000	2803.000
11	3382.000	3589.000	3046.000	2914.000	3257.000	3270.000
12	1127.000	1196.000	1015.000	971.000	1086.000	1090.000
13	1691.000	1794.000	1523.000	1457.000	1628.000	1635.000
14	846.000	897.000	762.000	728.000	814.000	818.000
15	564.000	598.000	508.000	486.000	543.000	545.000
16	846.000	897.000	762.000	728.000	814.000	818.000
17	564.000	598.000	508.000	486.000	543.000	545.000
18	1127.000	1196.000	1015.000	971.000	1086.000	1090.000
19	846.000	897.000	762.000	728.000	814.000	818.000
20	6058.000	5548.000	5770.000	6388.000	6064.000	7302.000
21	1691.000	1794.000	1523.000	1457.000	1628.000	1635.000
22	2344.000	2311.000	2333.000	2358.000	2278.000	2276.000
23	6909.000	6229.000	7079.000	6699.000	6541.000	6462.000
24	1973.000	2094.000	1777.000	1700.000	1900.000	1908.000
25	4573.000	3997.000	3720.000	4257.000	3846.000	3902.000
26	1471.000	1487.000	1464.000	1298.000	1361.000	1405.000
27	1226.000	1239.000	1220.000	1081.000	1134.000	1171.000
28	4293.000	4616.000	4091.000	5090.000	4523.000	4366.000
29	4068.000	3879.000	3834.000	3815.000	3495.000	3782.000
30	28183.000	29908.000	25386.000	24282.000	27141.000	27253.000
31	980.000	991.000	976.000	865.000	907.000	937.000
32	980.000	991.000	976.000	865.000	907.000	937.000

	8	9	10	11	12	13
1	6185.000	2981.000	4419.000	4035.000	4621.000	3758.000
2	1175.000	756.000	892.000	809.000	932.000	740.000
3	4018.000	1687.000	1826.000	2036.000	2579.000	2117.000
4	20273.000	13035.000	15389.000	13950.000	16072.000	12762.000
5	5722.000	5426.000	4684.000	5587.000	5111.000	4641.000
6	5732.000	4994.000	4893.000	4605.000	4756.000	3957.000
7	5680.000	3617.000	4484.000	4093.000	4370.000	4374.000
8	4800.000	3119.000	3955.000	4472.000	4445.000	3295.000
9	623.000	362.000	487.000	544.000	565.000	417.000
10	3441.000	1923.000	2540.000	2563.000	2658.000	2087.000
11	3735.000	2175.000	2920.000	3265.000	3389.000	2501.000
12	1245.000	725.000	973.000	1088.000	1130.000	834.000
13	1868.000	1087.000	1460.000	1633.000	1695.000	1251.000
14	934.000	544.000	730.000	816.000	847.000	625.000
15	623.000	362.000	487.000	544.000	565.000	417.000
16	934.000	544.000	730.000	816.000	847.000	625.000
17	623.000	362.000	487.000	544.000	565.000	417.000
18	1245.000	725.000	973.000	1088.000	1130.000	834.000
19	934.000	544.000	730.000	816.000	847.000	625.000
20	6972.000	5546.000	6097.000	7008.000	7128.000	5342.000
21	1868.000	1087.000	1460.000	1633.000	1695.000	1251.000
22	2785.000	2255.000	3009.000	2487.000	2196.000	2224.000

23	7975.000	5566.000	5594.000	5932.000	6096.000	5088.000
24	2179.000	1269.000	1703.000	1905.000	1977.000	1459.000
25	4977.000	3662.000	3200.000	3589.000	3653.000	3143.000
26	1763.000	1134.000	1338.000	1213.000	1398.000	1110.000
27	1469.000	945.000	1115.000	1011.000	1165.000	925.000
28	4452.000	3924.000	4501.000	4319.000	4152.000	3507.000
29	4189.000	2808.000	2880.000	3000.000	3184.000	2586.000
30	31126.000	18125.000	24331.000	27209.000	28243.000	20845.000
31	1175.000	756.000	892.000	809.000	932.000	740.000
32	1175.000	756.000	892.000	809.000	932.000	740.000

+ 14 15 16 17 18 19

1	5354.000	4255.000	5274.000	5286.000	4106.000	4572.000
2	886.000	944.000	1005.000	940.000	845.000	1014.000
3	1906.000	2003.000	2597.000	2679.000	2204.000	2170.000
4	15286.000	16292.000	17336.000	16212.000	14568.000	17497.000
5	6328.000	4893.000	5338.000	5621.000	5712.000	4543.000
6	5599.000	4389.000	4609.000	4379.000	5042.000	4594.000
7	4527.000	3623.000	4099.000	4682.000	4299.000	4804.000
8	5183.000	4194.000	4230.000	5162.000	4332.000	5831.000
9	608.000	548.000	575.000	583.000	446.000	583.000
10	2654.000	2072.000	2928.000	4314.000	1896.000	2069.000
11	3649.000	3287.000	3451.000	3500.000	2676.000	3501.000
12	1216.000	1096.000	1150.000	1167.000	892.000	1167.000
13	1824.000	1643.000	1725.000	1750.000	1338.000	1750.000
14	912.000	822.000	863.000	875.000	669.000	875.000
15	608.000	548.000	575.000	583.000	446.000	583.000
16	912.000	822.000	863.000	875.000	669.000	875.000
17	608.000	548.000	575.000	583.000	446.000	583.000
18	1216.000	1096.000	1150.000	1167.000	892.000	1167.000
19	912.000	822.000	863.000	875.000	669.000	875.000
20	6673.000	6001.000	6480.000	7536.000	5802.000	8172.000
21	1824.000	1643.000	1725.000	1750.000	1338.000	1750.000
22	2673.000	2433.000	2590.000	2648.000	2239.000	2894.000
23	7037.000	6036.000	6739.000	7729.000	6293.000	6170.000
24	2128.000	1917.000	2013.000	2042.000	1561.000	2042.000
25	4942.000	3717.000	4096.000	4688.000	3987.000	3698.000
26	1329.000	1417.000	1507.000	1410.000	1267.000	1521.000
27	1108.000	1181.000	1256.000	1175.000	1056.000	1268.000
28	4692.000	4115.000	3812.000	4521.000	4599.000	4987.000
29	3305.000	2828.000	2945.000	3324.000	3319.000	3298.000
30	30404.000	27391.000	28757.000	29167.000	22303.000	29175.000
31	886.000	944.000	1005.000	940.000	845.000	1014.000
32	886.000	944.000	1005.000	940.000	845.000	1014.000

+ 20 21 22 23 24 25

1	5558.000	5758.000	5589.000	6410.000	6512.000	7663.000
2	1023.000	1092.000	1220.000	1156.000	1124.000	1251.000
3	2675.000	2384.000	2549.000	2601.000	3688.000	3871.000
4	17652.000	18830.000	21047.000	19934.000	19390.000	21584.000
5	3974.000	4631.000	3846.000	4727.000	6078.000	7186.000
6	5638.000	5394.000	5099.000	5626.000	7396.000	8673.000
7	3528.000	5998.000	4016.000	4886.000	5819.000	7592.000
8	6595.000	6969.000	6502.000	7379.000	8001.000	10057.000
9	637.000	642.000	499.000	674.000	775.000	785.000
10	3699.000	2323.000	2701.000	3377.000	3406.000	4177.000
11	3821.000	3854.000	2996.000	4043.000	4652.000	4713.000
12	1274.000	1285.000	999.000	1348.000	1551.000	1571.000
13	1910.000	1927.000	1498.000	2021.000	2326.000	2356.000
14	955.000	963.000	749.000	1011.000	1163.000	1178.000
15	637.000	642.000	499.000	674.000	775.000	785.000
16	955.000	963.000	749.000	1011.000	1163.000	1178.000
17	637.000	642.000	499.000	674.000	775.000	785.000
18	1274.000	1285.000	999.000	1348.000	1551.000	1571.000
19	955.000	963.000	749.000	1011.000	1163.000	1178.000
20	6526.000	7738.000	9821.000	8300.000	9811.000	10072.000
21	1910.000	1927.000	1498.000	2021.000	2326.000	2356.000
22	2632.000	3033.000	2958.000	3172.000	3678.000	4090.000

23	6604.000	6929.000	6844.000	7593.000	8253.000	10004.000
24	2229.000	2248.000	1748.000	2358.000	2714.000	2749.000
25	4754.000	5266.000	4674.000	4799.000	5531.000	6334.000
26	1535.000	1637.000	1830.000	1733.000	1686.000	1877.000
27	1279.000	1365.000	1525.000	1444.000	1405.000	1564.000
28	4933.000	4236.000	5460.000	5429.000	6898.000	8323.000
29	2869.000	2895.000	4895.000	3420.000	4427.000	5250.000
30	31841.000	32114.000	24968.000	33690.000	38765.000	39273.000
31	1023.000	1092.000	1220.000	1156.000	1124.000	1251.000
32	1023.000	1092.000	1220.000	1156.000	1124.000	1251.000
----	428 VARIABLE gasto.L		= 2.167562E+7 costo de transporte total desde planta al mercado			

## ANEXO E. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA COMPROBAR LA DIFERENCIA DE MEDIAS

Para comprobar la disminución del ratio \$/HI en el escenario propuesto se plantea una prueba  $t$ , donde las hipótesis son:

$H_0$ : El ratio \$/HI del escenario propuesto es menor al ratio \$/HI del escenario actual;

Versus

$H_1$ : El ratio \$/HI del escenario propuesto es mayor al ratio \$/HI del escenario actual.

Los datos disponibles son:

- Muestra de ratios \$/HI del escenario propuesto;
- Tamaño muestral  $n$ ;
- Ratio esperado \$/HI del escenario actual.

El detalle de la prueba se muestra a continuación:

$H_0: \bar{X} = \mu_0$ ;

Vs.

$H_1: \bar{X} < \mu_0$

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

Estadígrafo de prueba

$X = (7.181, 7.182, 7.185, 7.188, 7192)$

$n = 5$

$\bar{X} = 7.186$

$\mu_0 = 8.246$

$s = 0.004$

$t = -429$

$p = 0.000$

Como el valor  $p$  de la prueba 0.000 se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ , en favor de la hipótesis alternativa  $H_1$ .

## BIBLIOGRAFÍA

1. Guerrero Casas, F. *Curso De Optimización. Programación Matemática*. Ariel Economía, Barcelona España. 1994
2. Padilla, M. *Fundamentos Básicos de Investigación Matemática*. <http://investigacionmatematica.blogspot.com>, Puerto Rico, 2011.
3. Taha, H. *Investigación de Operaciones, Novena Edición*. Pearson Education Inc. Publicando como Prentice Hall, México, 2012
4. Hernandez, L.; Olivares, E.; Fernandez, G. & Fernandez, E. *Modelación Multicriterio para la Localización de Dos Centros de Distribución para la Empresa Mis-Ver*. Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Misantla, Veracruz, México, 2011
5. Márquez, L.; *Optimización de una Red de Transporte Combinado para la Exportación del Carbón del Interior de Colombia*. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia), 2011
6. Escalona, P. & Medina, D.; *Modelo Continuo de Localización y Diseño para un Centro de Distribución en Ambiente Competitivo*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. 2012
7. Melo, M.; Nickel, S. & Saldanha-da-Gama, F. *Facility Location and Supply Chain Management – A review*. European Journal of Operational Research (2009): 401 - 412
8. Dobrusky; F. *Optimal Location of Cross-Docking Centers for a Distribution Network in Argentina*. Massachusetts Institute of Technology, USA. 2003
9. Fernandez, G.; Escribano, G., *El Análisis de la Robustez y la Ayuda a la Decisión Multicriterio Discreta*. Universidad San Pablo – CEU, España 2003