

PROGRAMACIÓN BINARIA APLICADA A SISTEMAS DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS

BINARY PROGRAMMING APPLIED TO SYSTEM OF WASTE
COLLECTION ROUTES



AUTOR

JAVIER ARIAS OSORIO
Magister en Administración
Universidad Industrial de Santander
Docente tiempo completo
EEIE
jearias@uis.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

ASTRID JOHANNA REYES PITA
Ingeniería Industrial
Inversiones Nevada
Jefe de Producción
astridrpd@hotmail.com
COLOMBIA

INSTITUCION

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE
SANTANDER - UIS
Universidad Pública
Calle 9ª. Cra 27
Teléfono: 6344000
webadmin@uis.edu.co
COLOMBIA

INSTITUCION

INVERSIONES NEVADA
Empresa de alimentos
Calle 85 # 25 - 118
COLOMBIA

Recepción: Junio 10 de 2009

Aceptación: Septiembre 17 de 2009

tematica: Gestión de operaciones

Artículo Tipo: Artículo de investigación científica y tecnológica

RESUMEN

Dentro de la operación logística de los negocios, hay elementos muy importantes a considerar, no sólo relacionados con el producto terminado, sino con todos los insumos y/o productos (residuos) generados en un proceso logístico, alineados a las normas de calidad de la empresa.

Este artículo cubre el proceso de recolección de residuos generados por la explotación y el procesamiento de ferróniquel en Cerro Matoso S.A., una empresa controlada por BHP Billiton, que se encuentra ubicada en el departamento de Córdoba, en el norte de Colombia. El objetivo es optimizar el diseño de rutas de recolección de residuos, a través del uso de un modelo de programación binaria y validar los resultados, utilizando para ello una herramienta computacional convencional y efectiva a la vez.

Entre las consideraciones que hacen de este trabajo un trabajo diferente de aquellos conocidos que abarcan esta temática, está en que el negocio de recolección de residuos considera los elementos de la dinámica propia de la generación de residuos de manera continua y disponibles para la recolección en cualquier momento, esto involucra la relación entre rutas a través de la red de la empresa que incluye 62 puntos de acopio, un gran número de caminos disponible entre ellos, etc.

PALABRAS CLAVES

Programación lineal entera binaria
Diseño de rutas de recolección de residuos
Minería

ABSTRACT

Inside the logistics business operation, there are very important elements to consider, not only related to finished product, but with all inputs and/or products (waste) generated in a logistical process aligned to quality standards of the company.

This article covers the process of waste collection generated by the production and processing of nickel mining at Cerro Matoso S.A, a company controlled by BHP Billiton that is located in Córdoba's department in northern Colombia. The aim is to optimize the design of waste collection routes through the use of a binary programming model and validate the results.

Among the considerations that make this work different of those ones known in this particular problem, is that the business waste collection consider the dynamic elements of itself waste generation in a continuous manner and available for collection at any time, this involves the relationship between route through the company network that includes 67 points of collection, a large number of paths available between them, times of loading and unloading, etc.

KEYWORDS

Binary programming
Design waste collection routes
Mining

INTRODUCCIÓN

La recolección de residuos es una actividad crítica, debido a la variabilidad del sistema; la generación de diversas clases de residuos en diferentes cantidades y en áreas dispersas, hace que la logística de la recolección se vuelva cada vez más compleja, es por ello que uno de los objetivos principales de los administradores de un proceso de Gestión Integral de residuos es diseñar rutas de recolección que minimicen el costo, los tiempos y/o distancias, garanticen un mayor control respecto a la cantidad de residuos dispuestos durante una jornada laboral y permitan flexibilizar las actividades para acoplarlas a eventualidades.

Este artículo presenta un caso de estudio realizado para Cerro Matoso S.A. (CMSA), empresa dedicada a la explotación y producción de ferroniquel, en Montelíbano, Córdoba (Colombia); quien desea determinar una ruta que minimice la distancia recorrida por cada vehículo recolector de residuos.

El problema se define como el recorrido de recolección de residuos en 62 puntos de acopio ubicados en diferentes áreas de la mina. La situación en estudio se modela como un problema de Programación lineal entera binaria y se determina la solución mediante la herramienta computacional de Microsoft Excel, empleando el complemento *Solver Premium*.

1. TEORÍA

La investigación de operaciones (IO) es una herramienta útil para la toma de decisiones en todos los niveles de una organización, debido a que permite, estudiar complejos sistemas reales, con la finalidad de optimizar el funcionamiento de los mismos, teniendo en cuenta las restricciones existentes.

El diseño de rutas para la recolección de residuos hace referencia a un problema de redes, en el cual se deben transportar los residuos desde los puntos de acopio hasta las zonas de disposición final, a través de una red de caminos. Para obtener el modelo matemático del sistema, se realiza la revisión de los modelos propuestos en la literatura, para el análisis y resolución de problemas de redes.

Un aspecto importante es que para la situación en estudio, es necesario que las rutas diseñadas, pasen una sola vez por cada uno de los nodos de la red, razón por la cual, los métodos de ruta crítica, flujo máximo y costo mínimo, no aplican, debido a que éstos permiten identificar un camino de origen a destino que determina el tiempo máximo, el flujo máximo o el costo mínimo respectivamente, sin incluir a todos los nodos en algunos casos o incluyendo más de una vez a algunos de ellos; de igual forma, el método del árbol de expansión mínima, no se emplea, debido a que este modelo, busca interconectar todos los nodos sin garantizar una secuencia y bajo la posibilidad de formar pequeños ciclos dentro de la red. De acuerdo con este análisis, se elige la programación lineal entera binaria, por su flexibilidad, como herramienta para llevar a cabo el planteamiento matemático para la programación de rutas del Sistema de Recolección de Residuos de CMSA.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema consiste en determinar la ruta, para visitar 62 puntos de acopio de residuos, una sola vez, con el propósito de minimizar la distancia total recorrida, partiendo de un lugar de origen desde donde parten siempre los camiones, a un lugar destino donde se encuentra el repositorio de los desechos de la empresa. Los puntos están ubicados en todas las áreas de trabajo de la Mina y están definidos por el conjunto de nodos "n". Para su interpretación, se diseña la red que conecta los puntos de acopio a visitar (ver figura 1), de acuerdo con las posibilidades de traslados existentes entre ellos, estableciendo las distancias asociadas a cada una de las aristas.

La ruta a establecer debe tener como nodo de origen específico el punto de reunión del personal al inicio de la jornada, debe visitar todos los nodos exactamente

una vez durante el recorrido y trasladar los residuos al nodo destino.

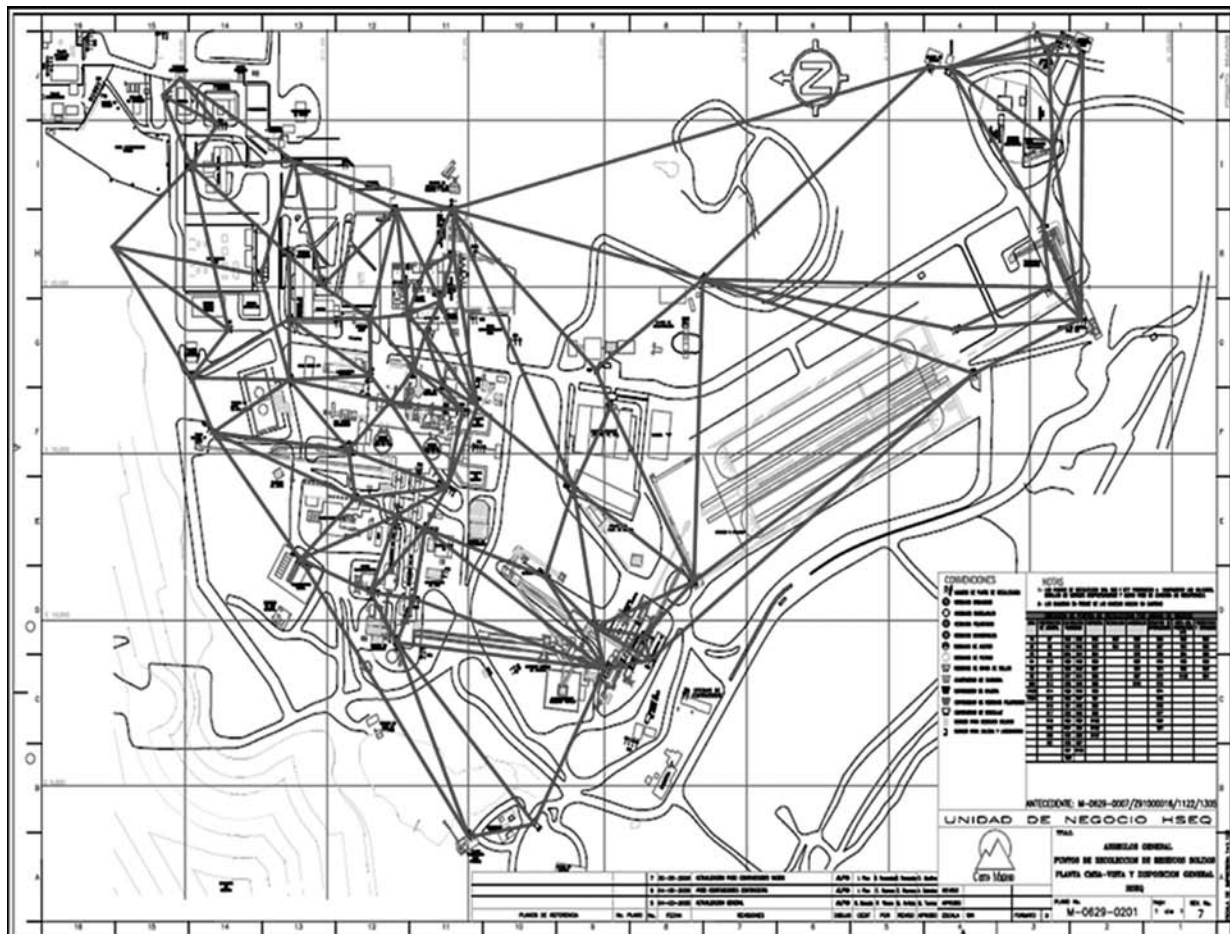
3. METODOLOGÍA

Para dar solución al problema planteado, se presenta un modelo matemático, que emplea la programación lineal, a partir de tres supuestos, que forman parte de la factibilidad de la solución a encontrar:

a. El tiempo de recolección en cada uno de los puntos y el tiempo de descarga en las áreas de disposición o almacenamiento, se consideran constantes bajo las condiciones de generación de residuos estudiada, por esta razón el modelo se encamina a la minimización de la distancia recorrida entre los puntos de acopio.

b. La capacidad de los vehículos recolectores se considera infinita, de acuerdo a las tasas de generación de residuos actuales.

FIGURA 1. Red de interconexión de los puntos de acopio para el diseño de las rutas del Sistema de Recolección de Residuos de CMSA. Fuente: Elaboración Propia



c. La distancia entre el punto de salida de la Mina a las áreas de disposición final o almacenamiento temporal se consideran constantes para todas las rutas, razón por la cual no se incluye en el modelo.

Una vez establecidos los supuestos y, estudiados y analizados cada uno de los factores que involucra el Sistema de Recolección, se lleva a cabo la formulación del modelo.

PASO 1. Definir las variables de decisión

Mediante el modelo, se pretende determinar el camino que deben seguir los vehículos para recolectar los residuos acopiados en cada uno de los puntos dispuestos en las instalaciones de la empresa. Por tal motivo, se establecen variables binarias (toman el valor cero si no se elige el camino o uno si se elige), que representan cada una la arista correspondiente entre dos nodos y la dirección en que se toma la misma. Por consiguiente, las variables de decisión para el modelo se designan con la siguiente simbología:

X_{ij} = Arista entre el nodo i y el nodo j

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si se elige la arista entre los nodos } i \text{ y } j \\ 0 & \text{Si no se elige la arista entre los nodos } i \text{ y } j \end{cases}$$

PASO 2. Escribir la función objetivo

Para lograr la eficiencia en el sistema de recolección de residuos, es necesario, minimizar la distancia recorrida por los vehículos, debido a que ella repercute en el tiempo total de la recolección. La función objetivo establecida, para cumplir las expectativas del modelo, es la siguiente:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_{ij} \quad (1)$$

Donde,

a_{ij} = Parámetro que representa la distancia entre el nodo i y el nodo j

X_{ij} = Arista entre el nodo i y el nodo j

n = Cantidad de puntos de acopio

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

$j = 1, 2, 3, \dots, n$

PASO 3. Escribir las restricciones

Restricción 1. En un recorrido de recolección, sólo se debe visitar una vez cada nodo. Es decir, es necesario que sólo se pueda tomar un camino que llega y otro

que sale de cada uno de los nodos. Esta restricción se enuncia de la siguiente forma:

$$\sum_{j=1}^n x_{ji} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$$

Donde,

i, j = Nodos de la red

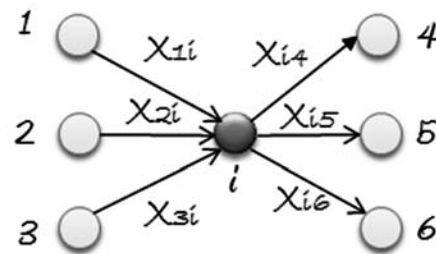
X_{ij} = Arista entre el nodo i y el nodo j

n = Cantidad de puntos de acopio

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ (Sin incluir el nodo origen y el nodo destino)

$j = 1, 2, 3, \dots, n$ (Sin incluir el nodo origen y el nodo destino)

FIGURA 2. Restricción 1. Fuente: Elaboración Propia



$$X_{1i} + X_{2i} + X_{3i} = 1 \quad X_{i4} + X_{i5} + X_{i6} = 1$$

La primera ecuación define que la sumatoria de las variables que representan las aristas que llegan al nodo i debe ser igual a uno, lo cual garantiza que sólo llegará un vehículo al punto de recolección. La segunda ecuación indica que la sumatoria de las variables que representan las aristas que salen del nodo i , debe ser igual a uno, para asegurar que para salir de cada uno de los puntos de acopio sólo se empleará un camino (Ver figura 2). Esta restricción no se asigna a los nodos origen y destino, debido a que, en el caso del nodo origen solo se toma una arista de salida y no entra ninguna arista y, en el nodo destino se toma una arista de entrada sin que salga ninguna arista.

Restricción 2. Al estar en el nodo destino, no es posible tomar un camino para acceder a alguno de los nodos intermedios. Esta restricción se garantiza indicando, que la sumatoria de las variables que representan las aristas que salen del nodo destino debe ser igual a cero (Ver figura 3), es decir:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 0 \quad (3)$$

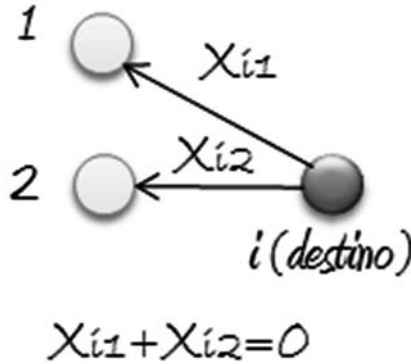
Donde,

i = Nodo destino

n = Cantidad de puntos de acopio

X_{ij} = Arista entre el nodo i y el nodo j

FIGURA 3. Restricción 2. Fuente: Elaboración Propia



Restricción 3. No es posible tomar caminos para llegar al nodo origen. Esta restricción se favorece, estableciendo que la sumatoria de las variables que representan las aristas que llegan al nodo origen, debe ser igual a cero (Ver figura 4).

$$\sum_{j=1}^n x_{ji} = 0 \quad (4)$$

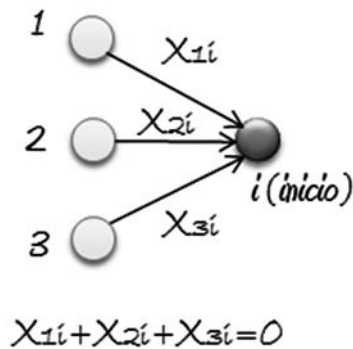
Donde,

i = Nodo origen

n = Cantidad de puntos de acopio

X_{ij} = Arista entre el nodo i y el nodo j

FIGURA 4. Restricción 3. Fuente: Elaboración Propia



Restricción 4. La cantidad de caminos que salen del origen y que llegan al destino depende del número de rutas a establecer, es decir, del número de vehículos disponibles. Esta restricción se garantiza, estableciendo que la sumatoria de las variables que representan las aristas que salen del nodo origen es igual al número de vehículos disponibles. Es decir:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = k \quad (5)$$

Donde,

i = Nodo origen

n = Cantidad de puntos de acopio

X_{ij} = Arista entre el nodo i y el nodo j

k = Número de vehículos disponibles

De igual forma, la sumatoria de las variables que representan las aristas que llegan al nodo destino es igual al número de vehículos disponibles (Ver figura 5).

$$\sum_{j=1}^n x_{ji} = k \quad (6)$$

Donde,

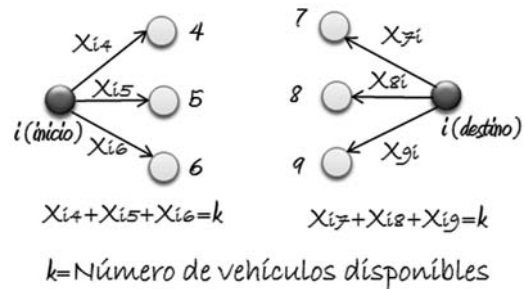
i = Nodo destino

n = Cantidad de puntos de acopio

X_{ij} = Arista entre el nodo i y el nodo j

k = Número de vehículos disponibles

FIGURA 5. Restricción 4. Fuente: Elaboración Propia



Restricción 5. Las aristas de la red que representa el modelo no son dirigidas, es decir, no cuentan con una dirección previamente definida, razón por la cual, el modelo como parte de la solución, debe decidir el sentido que tomará cada una de ellas. Esta restricción se garantiza estableciendo que la sumatoria de las variables que representan las dos direcciones que puede tomar cada una de las aristas, debe ser menor o igual

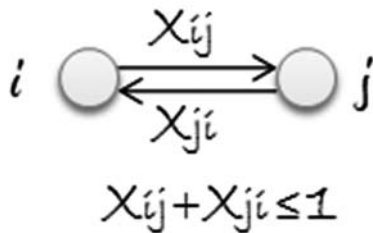
que uno. No existe igualdad a uno, debido a que no todas las aristas de la red son empleadas como parte del recorrido (Ver figura 6).

$$x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \quad \forall_i \text{ y } \forall_j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (7)$$

Donde,

X_{ij} = Arista entre el nodo i y el nodo j
 X_{ji} = Arista entre el nodo j y el nodo i
 n = Cantidad de puntos de acopio

FIGURA 6. Restricción 5. Fuente: Elaboración Propia.



5. APLICACIÓN DEL MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA BINARIA PARA EL DISEÑO DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS

Para la aplicación del modelo se realiza un macroruteo, es decir, se divide la planta en sectores operativos para asignar un área específica a cada vehículo recolector (actualmente la empresa posee dos vehículos recolectores disponibles para hacer los recorridos y un tercero como reserva para eventualidades). El macroruteo tiene como objetivo balancear y nivelar las cargas de trabajo entre los diferentes equipos encargados de la recolección de residuos, y de igual forma, facilitar la ejecución de los procedimientos y administración de los mismos. De acuerdo con lo anterior se dividen las instalaciones de la empresa en dos partes, de tal forma que se logren equilibrar las cargas del sistema, teniendo en cuenta: actividades realizadas en el área, distribución de las instalaciones, cantidad de puntos de acopio, personal, tipo y cantidad de residuos generados y distancias empleadas para un viaje hasta el sitio de disposición final.

Microruteo

Una microruta hace referencia al recorrido específico que deben cumplir diariamente los vehículos de recolección en las áreas, a las cuales han sido asignados, con el fin de recolectar los residuos generados. Para la determinación

de las rutas en cada una de las áreas designadas, se aplica el modelo de programación lineal entera binaria (PLEB) presentado anteriormente.

Debido a la cantidad de variables y restricciones del problema, se emplea como herramienta para la solución del sistema de ecuaciones, el complemento software denominado *Premium Solver Products for Microsoft Excel* de FrontLine S.A, el cual permite dar solución a problemas de programación lineal, con un máximo de 2.000 variables y 1.000 restricciones.

De acuerdo a la solución obtenida para las variables, se establece una ruta para cada una de las áreas. Para la ruta de recolección de residuos en el Área I, el vehículo recorre una distancia total de 6.463,85 metros, valor obtenido para la función objetivo del modelo. De igual forma, se determina el tiempo estimado para la ruta, teniendo en cuenta el tiempo promedio que se demora el personal en cada uno de los puntos de acopio, para realizar la recolección de los residuos en forma separada, al dedicar un recorrido para la recolección de los residuos orgánicos y reciclables, y otro recorrido para la recolección de los residuos incinerables y peligrosos; el tiempo en sitio y el tiempo de transporte. El tiempo total establecido para el recorrido de recolección de residuos orgánico y reciclaje, y el recorrido de recolección de residuos incinerables y peligrosos, es de 417,026 minutos.

Con la propuesta para la ruta de recolección de residuos en el Área II, el vehículo recorre una distancia total de 6.631,22 metros, valor obtenido para la función objetivo del modelo; al comparar los resultados para las dos áreas, se observa que la distancia recorrida varía sólo en 167,37 metros, lo cual garantiza en cierto punto, el equilibrio en la distribución de cargas para los dos equipos de trabajo. El trazado de las rutas para ambas áreas se muestra en las figuras 7 y 8).

Al igual que para el Área I, se determina el tiempo estimado para la ruta, teniendo en cuenta las premisas mencionadas anteriormente. El tiempo total establecido para el recorrido de recolección de residuos orgánico y reciclaje, y el recorrido de recolección de residuos incinerables y peligrosos, es de 268,38 minutos.

Para mostrar la viabilidad de los resultados, se realiza la comparación entre los tiempos estimados y los tiempos reales de la ruta actual (según los resultados de un estudio de tiempos); los cuales se presentan en la Tabla 1. Como se observa, con las rutas propuestas se logra una reducción sustancial en los tiempos de recorrido y recolección, representados en 113,144 minutos de la jornada laboral.

FIGURA 7. Ruta Área I. Fuente: Elaboración Propia.

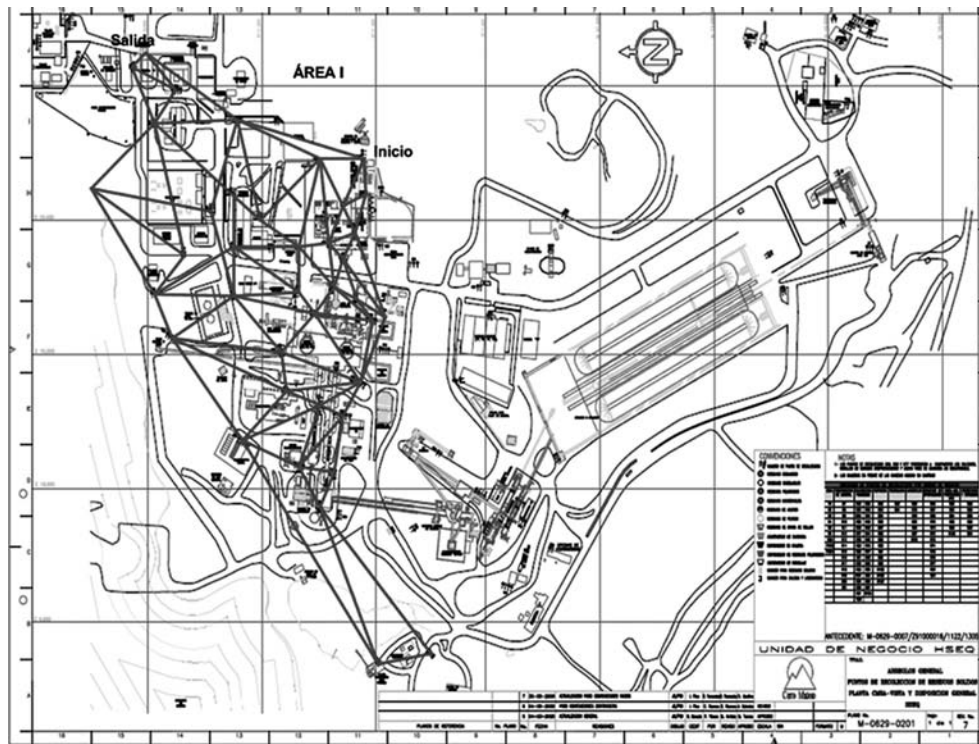
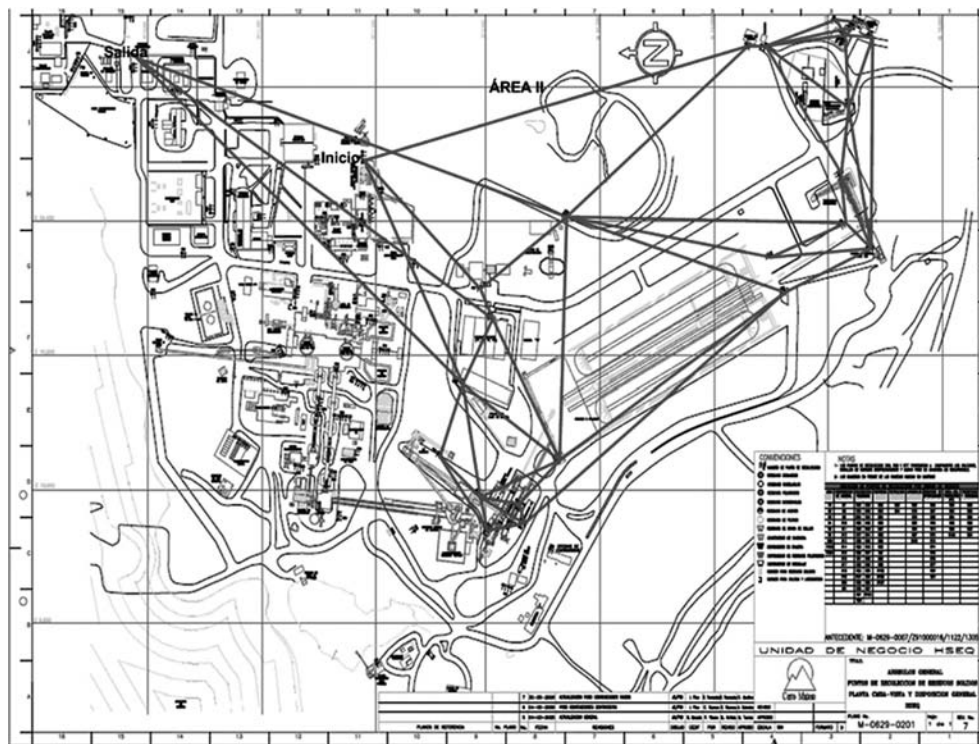


FIGURA 8. Ruta Área II. Fuente: Elaboración Propia.



6. CONCLUSIONES

La inmersión en los procesos de negocios, están relacionados con la organización, el tiempo y la disciplina para comprender y tratar de reestructurarlos, incluso cuando tratamos de proponer un cambio de uso de herramientas cuantitativas, como los modelos

matemáticos. En este caso, el software Solver Premium fue utilizado para introducir y validar el modelo, el cual muestra los resultados que permiten optimizar el tiempo de ruta y la cobertura de todos los puntos de recolección.

TABLA 1. Comparación Rutas Propuestas vs. Ruta actual

TIEMPOS ESTIMADOS PARA RUTAS PROPUESTAS				TIEMPO RUTA ACTUAL
RECORRIDO	R1	R2	TOTAL SISTEMA	RECOLECCIÓN RUTAS ACTUALES (Resultados Estudio de Tiempos)
	TIEMPOS			
TIEMPO TOTAL POR RUTA (min)	417,026	268,830	685,856	799
COMPARACIÓN (min)	113,144			

El enfoque de un modelo matemático que se ajuste a este problema en particular implica la integración de modelos básicos, en uno que responde a muchas cosas (como la búsqueda de rutas que permitan cubrir cada uno de los puntos en una sola recogida cada ronda), en cuyo caso no podía ser modelado por modelos previamente especificados, conocidos como modelos de red.

La aplicación del modelo permite equilibrar las cargas de trabajo asignadas a los recursos, disminuyendo la necesidad de alterar la programación establecida y dando flexibilidad al sistema.

Como un desarrollo consecuente se está trabajando al interior del grupo de Investigación OPALO de la UIS sobre este mismo problema pero adicionándole mayor complejidad al modelo, al considerar las variaciones posibles en los tiempos de carga y descarga, en la velocidad de los vehículos de acuerdo a la carga que lleven y la capacidad finita de los vehículos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Reyes Reinoso, Raúl. Diseño del Programa de recolección de desechos sólidos domiciliarios para el Municipio de Atizapán de Zaragoza como aplicación del problema del Agente Viajero. Tesis de Maestría en CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA. Unidad Profesional "Adolfo López Mateos". México D.F. 2005.
- [2] Racero, Jesús y Pérez, Arriaga. Optimización del sistema de rutas de residuos sólidos domiciliarios (Ecoeficiencia). X Congreso de Ingeniería de Organización. Valencia, España. 2006.
- [3] Hillier, Frederick; Lieberman, Gerald. Introducción a la Investigación de operaciones. Séptima edición. Editorial Mc Graw Hill. 2002.
- [4] MANUAL PARA EL DISEÑO DE RUTAS DE RECOLECCION DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES. Secretaría de Desarrollo social. México.
- [4] Ballou, Ronald. Logística, Administración de la cadena de suministro. Editorial Prentice Hall. 2004
- [5] MANUAL PARA EL DISEÑO DE RUTAS DE RECOLECCION DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES. Secretaría de Desarrollo social. México.
- [6] Laporte, Gilbert. The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. European Journal of Operational Research 59 (1992). Pag. 345-358