

## **Diseño de rutas de distribución de Empresas de productos de consumo masivo, mediante una aplicación de optimización espacial, la cual utiliza el software gvSig y el lenguaje de programación Pyomo.**

### **Resumen**

Para las Empresas de productos de consumo masivo, para poder cumplir sus objetivos de rentabilidad, es de suma importancia contar con redes de distribución eficientes, que les permitan llevar sus productos en tiempo, mezcla y cantidad; para lo cual en los últimos años han incorporado en el diseño de las mismas nuevas tecnologías, como son los modelos de optimización espacial, generalmente lo hacen a través de la compra de software propietario, esto les ha traído los siguientes inconvenientes: altos precios y el número de restricciones limitado, no cumpliendo con sus necesidades; ante esto surge la oportunidad de poder contar con un sistema de optimización espacial basado en el sistema de información geográfica gvSig y el lenguaje de optimización Pyomo (ambos de código libre), eliminando los problemas antes mencionados y obteniendo una disminución en sus costos de distribución en un promedio del 35%.

**Palabras clave:** optimización espacial, sistemas de información geográfica, pyomo, redes de distribución, empresas de consumo de productos masivo.

**Felipe de Jesús Castro Hernández y Ricardo Abdelarrague Serrano**

Centro Universitario UAEM Valle de México, Coordinación de Ingeniería Industrial,  
Área de Investigación en Logística, [fdcastroh@uaemex.mx](mailto:fdcastroh@uaemex.mx) y [rabelarragues@uaemex.mx](mailto:rabelarragues@uaemex.mx)

### **1. Introducción.**

El área de investigación en logística del Centro Universitario UAEM Valle de México, perteneciente a la Coordinación de Ingeniería Industrial, tiene la tarea de analizar la problemática que tienen las Empresas en sus actividades relacionadas con la logística, para esto se utilizan principalmente herramientas basadas en los sistemas de información geográfica; una de las necesidades que se han detectado es la incursión de sistemas de optimización espacial para el diseño de sus rutas de distribución, esta incorporación la han hecho a través de la compra de software propietario, el cual no cumple con sus necesidades además de sus elevados precios de adquisición.

Teniendo en cuenta esto, el objetivo de este proyecto es el poder contar con una aplicación basada en optimización espacial, la cual permita a las Empresas de productos de consumo masivo, diseñar rutas de distribución que cumplan con las características requeridas de rentabilidad, como son: el número de clientes visitados, la mezcla de producto entregado, la distancia recorrida por día, la capacidad del vehículo, etc., además de que económicamente puedan tener acceso a esta, sin importar el tamaño o recursos que tengan. Para esto se utilizó la estrategia de integración SIG-O separada, integrando el sistema de información geográfico (SIG) gvSig y el lenguaje de programación Pyomo, este último a través de la aplicación SolverStudio.

En este artículo está organizado de la siguiente manera: se explican las necesidades de las Empresas de productos de consumo masivo en cuanto a sistemas basados en modelos de optimización espacial, los conceptos básicos de optimización espacial y las formas en que integran los SIG y los programas de optimización, y se da una explicación de cómo opera el sistema ya integrado, al final se muestran los resultados en una Empresa y las conclusiones.

## **2. Necesidades de las Empresas de productos de consumo masivo.**

La mayor venta de productos de consumo masivo y de un alto nivel de rotación, tales como alimentos, medicinas, dulces, mercería se realiza a través del pequeño comercio detallista, conocido en México como “changarros”. Este canal representa 80% del consumo total de los productos mencionados, según datos obtenidos del reporte que presentan las compañías que han desarrollado exitosamente sistemas de distribución directa, entre las que se pueden mencionar Bimbo, Coca Cola, Sabritas, etc. Además de que nos lo muestra la proporción de ventas totales de los fabricantes en el canal mayorista, contra el autoservicio.

Otra de las ventajas mayores para las empresas con distribución directa, es que las ventas a este canal son al contado, lo que permite tener un excelente flujo de dinero fresco todos los días.

Cabe mencionar que el costo de distribución en el que cualquier sistema de distribución directa incurre es el mismo, ya que la inversión en vehículos, gasto de combustible, gasto de mantenimiento preventivo y correctivo de unidades (y todo lo relacionado con el funcionamiento de los vehículos en general) es en todos los casos el mismo costo. De esta manera, el secreto del éxito en este sistema es necesariamente el tener redes de distribución eficientes que puedan lograr vender la mayor cantidad de productos en territorios muy compactos (Hernández, 2002).

Las Empresas han optado por utilizar programas basados en modelos de optimización espacial propietarios, los cuales no cumplen con sus necesidades, representándoles los siguientes problemas:

- a. El tener un número limitado de variables de decisión y de restricciones, lo que les limita su capacidad de diseño de sus redes de distribución.

- b. Los altos precios de las aplicaciones comerciales de optimización de rutas, hacen que sólo tengan acceso a estas grandes Empresas. Como por ejemplo la Empresa Uni Solutions ofrece una aplicación para el diseño de rutas por un pago mensual de 20,000 dólares<sup>1</sup>.
- c. Al no cumplir con sus necesidades, sus diseños deben de adaptarlos de manera manual, una vez que tienen el resultado final, lo que lo convierte en un proceso ineficiente.

Existe una gran cantidad de programas enfocados a resolver las necesidades de ruteo de las Compañías, todos estos son cajas cerradas que no les permiten, a los diseñadores de redes de distribución, adaptarlos a sus necesidades, una lista completa fue publicada por la organización informs<sup>2</sup> en la cual nos describe las características de cada una de estas, no contando con ninguna de código libre o fácil de acceder, debido a su precio, para las Empresas de cualquier tamaño.

### **3. Optimización espacial: integración de sistemas de información geográfica y de optimización.**

La optimización espacial la podemos definir como la solución de problemas reales de índole espacial, los cuales pueden ser resueltos a través de la integración de programas de optimización y SIG (Guerra y Lewis, 2002).

Los SIG han probado su eficacia en resolver un número incontable de problemas relacionados con decisiones espaciales, gracias a esas capacidades, los SIG están comenzado a incrementar su popularidad y uso en otras áreas. Sin embargo el futuro del SIG está teniendo muchos cambios, el más importante y común es su integración a cada vez mayor información, lo cual a veces es difícil y costosa (Cox y Gifford, 1997).

Un importante y crítico aspecto consiste en enfocar la moderna utilización de los SIG para resolver problemas reales. Estudios de literatura revelan que utilizar solamente los SIG no proporcionan soluciones satisfactorias, debido a que no es posible resolver problemas complejos. Parece muy lógico pensar en su integración con herramientas más complejas. La integración consiste en un proceso de llevar y relacionar algunos componentes en un sistema maestro y tener la seguridad que estos se comportan como un todo coordinado. En este contexto algunos autores (Muttiah, 1996 y Alvarez, 2007) proponen combinar un enfoque de optimización con un SIG. Esos estudios muestran que el propósito de la integración constituye una prometedora solución que hace más fácil y más eficiente la solución de problemas reales. A esta integración se le denomina SIG-O.

Una vez que el sistema de optimización es seleccionado para integrarse con el SIG, la segunda cuestión es cómo será el comportamiento de dicha integración. En general hay tres diferentes

---

<sup>1</sup> <http://www.unisolutions.com.ar/> (Consultado Abril, 2014).

<sup>2</sup> <https://www.informs.org/ORMS-Today/Public-Articles/February-Volume-39-Number-1/Software-Survey-Vehicle-Routing> (Consultado Abril, 2014).

estrategias que han sido adoptadas para combinar herramientas de optimización con un SIG, son las siguientes:

- a. Estrategia de integración SIG-O completa. Las rutinas de optimización son desarrolladas dentro del ambiente del SIG o a la inversa. En el último caso, las rutinas del SIG son incrustadas en las herramientas de optimización.
- b. Estrategia de integración SIG-O separada. El SIG trabaja como un pre procesador y un pos procesador a los sistemas de optimización.
- c. Estrategia de integración SIG-O combinada. La integración de las herramientas de optimización y del SIG pueden ser un híbrido de las dos previas integraciones.

En la figura 1 se muestra el modelo general del flujo de la información de cómo opera un sistema de optimización espacial.

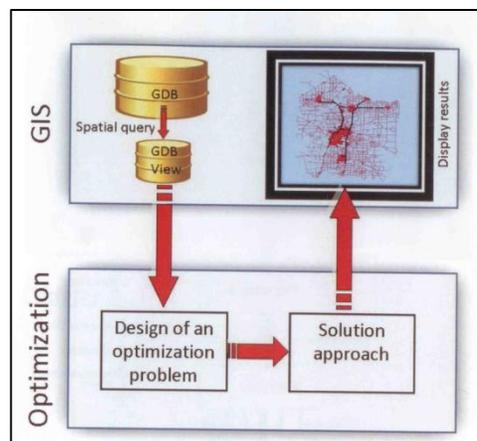


Figura 1. Flujo de información en un programa de optimización espacial.  
(Faiz, Sami and Krichen, Saoussen, 213, p.145)

#### 4. Desarrollo de la aplicación.

En el desarrollo de nuestra aplicación se utilizó la estrategia de integración SIG-O separada, en donde el programa gvSig le proporciona en un inicio información al sistema de optimización, basado en el lenguaje Pyomo, para posteriormente recibir los resultados y mostrarlos en forma de mapas temáticos, el programa gvSig funciona como pre procesador y al final como pos procesador.

Se eligió el SIG gvSig debido a que tiene mejores características en comparación con otros programas de código abierto similares (González y Cáceres, 2013), además de ser de código abierto, se buscó este tipo de programa con el fin de que las Empresas pudieran acceder a este sin costo.

Por otra parte se seleccionó el lenguaje de optimización Pyomo debido a las siguientes ventajas: es un paquete de software de código abierto para el modelado y resolución de programas

matemáticos en Python; Pyomo se puede utilizar para definir problemas abstractos y concretos, crear instancias de problemas, y resolver estos casos con la norma de código abierto y solucionadores comerciales; Pyomo proporciona una capacidad que es comúnmente asociada con lenguajes de modelado algebraico como AMPL, AIMMS y GAMS; los objetos de modelado de Pyomo están incrustados dentro de todas las funciones que tiene un lenguaje de programación de alto nivel con un amplio conjunto de bibliotecas de apoyo; Pyomo esta soportado por las capacidades de la biblioteca de software Coopr, que junto con Pyomo es parte de la iniciativa COIN-OR de código abierto de IBM para software de investigación de operaciones. La característica principal de ambos ambientes es que tienen un lenguaje común para poder comunicarse que es el lenguaje de programación Python (Hart, 2012).

La aplicación funciona bajo la siguiente metodología:

- a. Para poder realizar el diseño de las rutas lo primero que se requiere es tener la base de datos de los clientes georeferenciada, para esto se utilizó la herramienta de georeferenciación de la aplicación gvSig, partiendo de la base de datos de los clientes, debido a que las direcciones no son de todo exactas, los clientes que no se pudieron georeferenciar, se visitaron tomando sus coordenadas con el apoyo de un equipo GPS.
- b. Una vez que se tienen los clientes georeferenciados, se determinan las zonas actuales en donde trabajan las rutas actuales y en donde operaran las nuevas rutas, esto tiene la finalidad de que los vendedores no tengan problema de conocer las zonas en donde operaran sus nuevas rutas, a estos puntos les vamos a llamar centroides de las rutas.
- c. Ya con los centroides determinados, se obtiene con la ayuda de la extensión de redes, la distancia euclidiana de todos los clientes a todos los centroides, esta matriz nos va a servir como medio para evaluar los costos de distribución de las nuevas rutas.
- d. Con la matriz de distancias y las variables con las cuales se van a diseñar las rutas se elabora un modelo de optimización, para ello se utiliza el programa SolverStudio el cual utiliza el lenguaje Pyomo, entre la información que necesitamos para establecer las restricciones siguientes: el valor del cliente en pesos, visitas por semana, cantidad de producto a comprar por día, mezcla a comprar y comisión por venta. El modelo de optimización, es un modelo de asignación en donde va a asignar un solo cliente a un centroide que tenga la menor distancia, pero que el conjunto de todos los clientes que se asignen al centroide cumplan con las condiciones de la ruta, de esta manera cada restricción va a ser una ruta y el conjunto de todas las restricciones nos tiene que dar una suma de distancias mínima.

La definición formal del problema de asignación (o problema asignación lineal) es:

Dados dos conjuntos, A y T. de igual tamaño, juntos con una función peso  $C: A \times T \rightarrow \mathbb{R}$ . Encuentra una biyección  $f: A \rightarrow T$  como la función de costo:

$\sum C(a, f(a))$  está minimizada

Normalmente la función peso es vista como una matriz cuadrada de valores reales C, con lo que el costo de la función queda así:

$$\sum_{a \text{ pertenece } A} C(a, f(a))$$

El problema es "lineal" porque la función de costo a optimizar así como todas las restricciones contienen solo términos lineales.

- e. Se diseñó una interface la cual se alimenta con la información de los requerimientos de los clientes de venta y la de distancias, esta utiliza un modelo de programación lineal en el cual se pueden diseñar las rutas configurando un número ilimitado de restricciones y cuya función objetivo es que la distancia recorrida entre todo el sistema de distribución sea mínima, este modelo de programación lineal fue diseñado con el lenguaje Pyomo, que es una derivación del lenguaje Python, y tiene la opción de poder resolverlo con el apoyo de motores de código libre como: Glpk, Cbc ó propietarios como: Gurobi, Xpress, etc., en este caso se utilizó Cbc.
- f. Una vez que se alimenta la interface con la información esta resuelve el modelo de optimización y despliega la información de manera gráfica en el software gvSig, la información que nos da por ruta es: número de clientes por ruta, día de visita, vehículo a utilizar, mezcla de producto a surtir por cliente y nueva comisión del vendedor, todas estas variables se establecen como restricciones cuando se configura el modelo, el número de variables y su tipo pueden variar o se pueden establecer otras, esta es una ventaja de nuestra aplicación que este número no tiene límites.

## 5. Resultados.

La metodología de optimización espacial se utilizó para el diseño de rutas en una Empresa de productos de consumo masivo en la Ciudad de Toluca, la situación era la siguiente:

- a. Tenía 56 rutas de las cuales 40 no cumplían con los niveles de rentabilidad de la Compañía, el límite de rentabilidad está establecido en una venta de 1,500 unidades por día y en este caso el número de rutas mencionado no lo cumplía.
- b. Las rutas tenían en algunos días más de 70 clientes programados, lo cual no es posible, esto se debía a que su base de datos no estaba actualizada, la información que tenía era lo que se llaman "clientes fantasmas".
- c. Las zonas de cada ruta no estaban definidas, la mayoría de las rutas se cruzaban.

- d. Las imágenes 2, 3 y 4 nos muestran de manera gráfica esta situación, en donde se ven los territorios cruzados y las distancias que se recorrían.

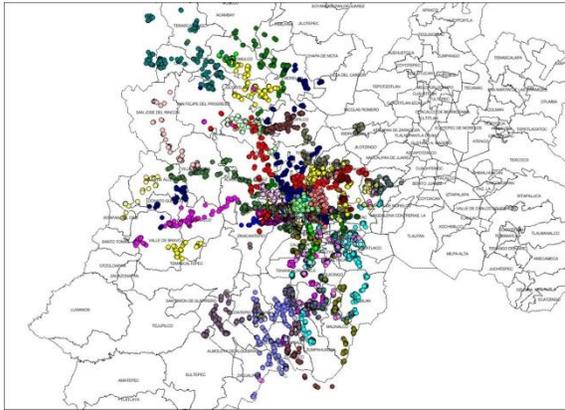


Figura 2. Clientes georeferenciados cada color una ruta (elaboración propia).

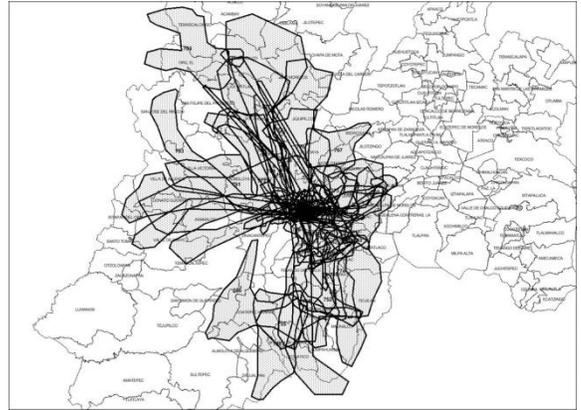


Figura 3. Cada polígono es el territorio es de una ruta (elaboración propia).

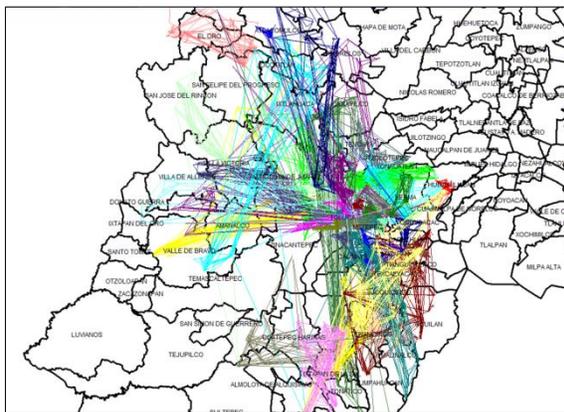


Figura 4. Cada línea representa las distancias recorridas por las rutas (elaboración propia).

Una vez que se implementó la metodología para la reestructuración de las rutas se obtuvieron los siguientes beneficios:

- Se redujeron de 56 a 48 rutas, las cuales alcanzaron los límites de rentabilidad requeridos.
- Se tuvieron territorios definidos para cada ruta, limitados por calles principales.
- La reducción en recorridos fue del 35%.
- Las imágenes 5, 6 y 7 nos muestran de manera gráfica estos resultados.

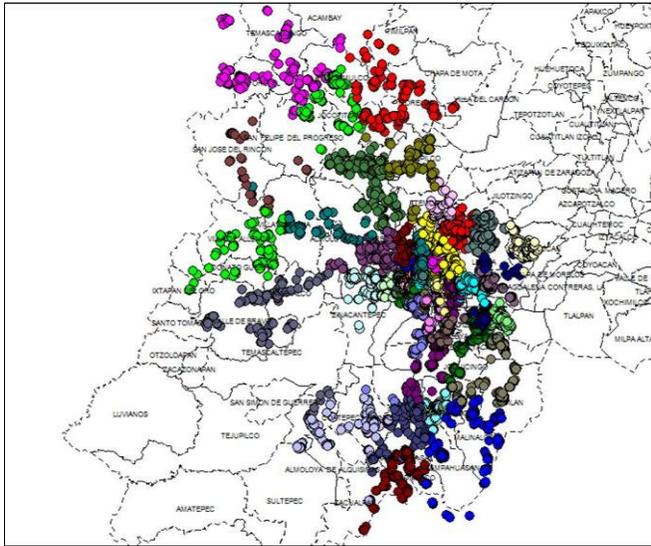


Figura 5. Rutas restructuradas cada color es una ruta (elaboración propia).

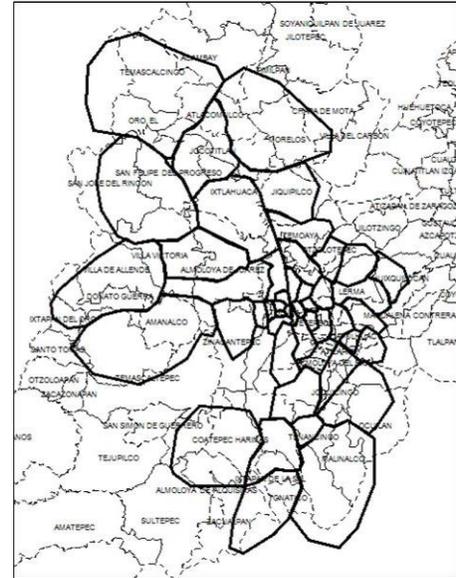


Figura 6. Cada polígono es el territorio de una ruta (elaboración propia).

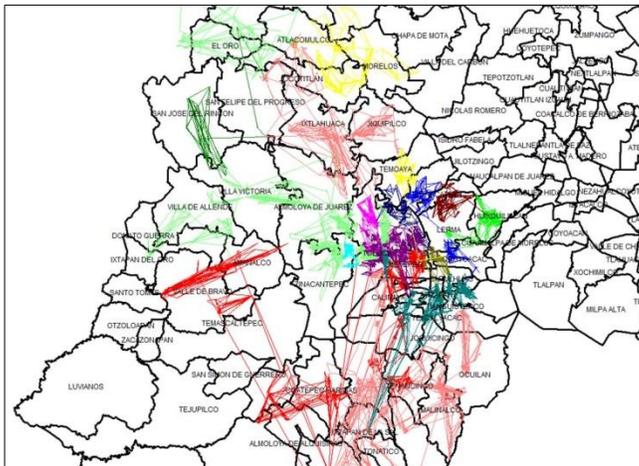


Figura 7. Cada línea representa las distancias recorridas reducidas en las rutas (elaboración propia).

## 6. Conclusiones.

Al término del proyecto podemos concluir lo siguiente:

- a. La metodología de optimización espacial formada por la integración de las plataformas gvSig y el lenguaje de programación Pyomo, es una buena alternativa para ser usada por las Empresas de productos de consumo masivo, para el diseño de sus redes de distribución,

ya que obtienen los siguientes beneficios: pueden acceder a ella a bajo costo y el número de restricciones no tiene límites, es decir se adapta a los requerimientos de las Empresas.

- b. Las Empresas para el diseño de sus sistemas de distribución es indispensable que se apoyen en herramientas basadas en metodologías de optimización espacial.

## Referencias bibliográficas

Alvarez, M.D., Sanz, R., Garrido, N. and Torres A. (2007), “Factors that affect the quality of the nio-waste fraction of selectively collect solid waste in Catalonia”, *Waste Management*, pp. 359-366.

Coopr, Sandia National Laboratories, <https://software.sandia.gov/trac/coopr/wiki/Pyomo>, fecha de consulta: Enero 2013, fecha de actualización: Abril 2014.

Cox, A.B. and Gilfford, F., (1997), *An overview to geographic information system*, Lincoln Institute of Land Policy, Cambridge, Massachsetts.

Faiz, Sami and Krichen, Saoussen (2013), *Geographical Information System and Spatial Optimization*, CRC Press Taylor & Francis Group, USA.

Gonzalez, R., Python para Todos, <http://mundogeek.net/tutorial-python/>, fecha de consulta: Octubre 2013, fecha de actualización: Septiembre 2013.

González, J.S. and Cáceres, G. (2013), “Comparison of GIS Desktop Tools for Development of SIGPOT”, *IEEE Latin America Transactions*, pp. 86-90.

Guerra, G. and Lewis J., Spatial Optimization and GIS, ArcUser Site, <http://www.esri.com/news/arcuser/0402/files/optimize.pdf> , fecha de consulta: Diciembre 2013, fecha de actualización: Abril Junio del 2002.

gvSig Asociación, <http://www.gvsig.org/web> , fecha de consulta: Abril 2014, fecha de actualización: Abril 2014.

Hart, W.E., Laird, C., Watson, J.P. and Woodruff, D.L. (2012), *Pyomo-Optimization Modeling in Python*, Springer New York, USA.

Hernández Jorge Manuel L. (2013), Un canal eficiente para distribución de perecederos, Énfasis Logística México y Centroamérica, <http://www.logisticamx.enfasis.com/notas/3782-un-canal-eficiente-distribucion-perecederos> , fecha de consulta: Abril 2014, fecha de actualización: Mayo 2002.

Lawhead, J. (2013), *Learning Geospatial Analysis with Python*, Packt Publishing Open Source, Birmingham, UK.

Muttiah, R.S., Engel, B.A. and Jones, D.D. (1996), “Waste disposal site selection using GIS-based simulated annealing”, *Computers and Geosciences*, pp. 22-29.

Partyka, Janice and Hall, Randolph (2014), Software Survey: Vehicle Routing, Institute for Operations Research and Management Science, <https://www.informs.org/ORMS-Today/Public-Articles/February-Volume-39-Number-1/Software-Survey-Vehicle-Routing> , fecha de consulta: Marzo 2014, fecha de actualización: Mayo 2014.

SolverStudio for Excel, <http://solverstudio.org/> , fecha de consulta: Abril 2014, fecha de actualización: Abril 2014.

Uni Solutions, <http://www.unisolutions.com.ar/> , fecha de consulta: Abril 2014, fecha de actualización: Abril 2014.