

## **DISEÑO DE UN RECORRIDO ÓPTIMO PARA LA RECOLECCIÓN DE ENVASES VACÍOS DE AGROQUÍMICOS EN EL SUDOESTE BONAERENSE**

Alberto Bandoni<sup>1</sup>, Andrea A. Savoretti<sup>2</sup>, Antonela E. Sorichetti<sup>3</sup>, Laura Mammini<sup>4</sup>

Como consecuencia de la actividad agropecuaria, en la provincia de Buenos Aires, Argentina, se producen por año aproximadamente cinco millones de envases vacíos de agroquímicos, los cuales no son gestionados correctamente. Para realizar una gestión adecuada de los mismos se desarrolló un modelo para el diseño de un recorrido óptimo para la recolección de envases vacíos de agroquímicos en los veintidós distritos del Sudoeste Bonaerense minimizando la distancia recorrida. El modelo se desarrolló con el software GAMS (General Algebraic Modeling System), que es un sistema de modelado de programación matemática que permite resolver problemas lineales, no lineales y de optimización. Se implementó un modelo del tipo problema de ruteo de vehículos (VRP) de programación lineal con variables mixto-enteras, para optimizar el recorrido de recolección. Se dividió a la región en cuestión en tres zonas a fin de obtener un recorrido para cada una y se determinó que los tres circuitos finalicen en el Partido de Saavedra, siendo la variable a optimizar el punto de partida de cada recorrido. Se obtuvieron circuitos de 655 km para la zona 1, 784 km para la zona 2 y 733 km para la zona 3, con una frecuencia de recolección quincenal para la zona 1 y de dos veces por semana para las zonas 2 y 3. La capacidad de llenado del camión recolector se alcanza en un 60%, 85% y 77% respectivamente, con lo cual existe un margen de seguridad en el caso de que se generen más envases de lo estimado.

Palabras claves: Optimización, agroquímicos, ruteo, Sudoeste Bonaerense.

---

<sup>1</sup>UNS-PLAPIQUI (UNS-CONICET), Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) - Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) - Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC). Argentina. abandoni@plapiqui.edu.ar

<sup>2</sup>UNS, Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) - Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) - Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC). Argentina. savoreti@upso.edu.ar

<sup>3</sup>UNS, Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) - Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) - Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC). Argentina. antonelasorichetti@gmail.com

<sup>4</sup>UNS, Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) - Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) - Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC). Argentina. laura.mammini@upso.edu.ar

## Diseño de un recorrido óptimo para la recolección de envases vacíos de agroquímicos en el Sudoeste Bonaerense

Alberto Bandoni<sup>1</sup>, Andrea A. Savoretti<sup>2</sup>, Antonela E. Sorichetti<sup>3</sup>, Laura Mammini<sup>4</sup>

### 1. Introducción

El aumento en la demanda de alimentos a nivel mundial ha generado una conducta fuertemente activa en los países productores de cereales, los que se han visto inducidos a buscar nuevos métodos para aumentar la productividad histórica de sus tierras. Esta situación, que ha ocasionado no sólo el aumento en el consumo de algunos agroquímicos utilizados, sino también la incorporación de nuevos y más eficientes productos, no se ha visto acompañada por la adopción de mejores prácticas agrícolas, que permitieran garantizar la sustentabilidad productiva y ambiental de sus recursos naturales, y proteger la salud de la población. Particularmente, la forma adecuada y sustentable del uso de los agroquímicos y de los residuos provenientes de los mismos, se presenta como un importante problema a resolver. En la República Argentina, con algo más de 36 millones de hectáreas cultivadas, se utilizan casi 230 millones de litros de herbicidas y cerca de 350 millones de litros de agroquímicos líquidos. Los envases necesarios para su comercialización generan unas 17.000 tn de PEAD cada año<sup>5</sup>.

De acuerdo a la Ley Nacional 24.051, los envases que almacenaron agroquímicos son residuos peligrosos, entendiéndose como peligroso a “todo residuo que pueda causar daño directa o indirectamente a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general”, calificándolos en particular como Y4: desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de biocidas y productos fitosanitarios. Estos envases contaminados se transforman no solo en un residuo de difícil eliminación, sino también en un elemento de alta peligrosidad para la salud y el ambiente. Sin embargo su material es económicamente valioso y técnicamente reciclable. Argentina adoptó la técnica del triple lavado por la Norma IRAM N° 12.069 basada en una normativa de la EPA de los años setenta. En principio, entonces, el plástico de los bidones podría reutilizarse pero primero debe completar un proceso de descontaminación siguiendo el protocolo de triple lavado<sup>6</sup> por parte de los aplicadores, y luego un procesamiento en plantas especializadas (que deben estar habilitadas como procesadores de residuos especiales) que implica el lavado y posterior tratamiento de los efluentes para eliminar los contaminantes. Una problemática aún no resuelta a nivel nacional, además del tipo

---

<sup>5</sup> Acciones en gestión de envases de agroquímicos. Unidad de Investigación y Desarrollo Ambiental, Dirección Nacional de Articulación Institucional, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 2° Jornadas del Sur Bonaerense. Actualización en Seguridad Agroalimentaria: Agroquímicos y Toxicología.

<sup>6</sup> Guía para el uso adecuado de plaguicidas y la correcta disposición de sus envases”. Ing. Agr. Fanny Martens, Boletín de divulgación N°41. ISSN 0328-3380. INTA-Agencia de Extensión Rural Tandil.

de procesamiento que permite garantizar la trazabilidad del producto obtenido a partir de este proceso, es cómo llevar a cabo la logística para obtener la materia prima de este proceso (residuo del acto de utilización de productos agroquímicos), minimizando así la presencia de un residuo contaminante en las áreas rurales y urbanas de la República Argentina.

El sudoeste bonaerense (SOB), tiene como principal actividad económica la producción agropecuaria, contando con cerca de 10 millones de hectáreas productivas. Por este motivo, la generación permanente de residuos peligrosos provenientes del uso de los agroquímicos en el SOB es un problema común a los veintidós partidos que forman parte de esta región, y que, de manera aislada y generalmente poco eficiente, se ha tratado de resolver en los distintos municipios.



Figura 1. Localización del área de estudio

En este trabajo, se presenta una propuesta inicial de un circuito para la recolección y acopio de envases vacíos, para su posterior procesamiento; la cual se propone como una alternativa para disponer de un modelo de sistema de gestión que pueda abastecer a una o más plantas de tratamiento de envases (a diseñar en base a tecnologías disponibles y/o a nuevas tecnologías actualmente en período de prueba), que permitirá reducir la presencia de estos agentes contaminantes en el SOB. Los resultados obtenidos podrían utilizarse para diseñar posteriormente una Experiencia Piloto de Gestión Ambiental Participativa de envases de agroquímicos en el SOB.

La determinación de los roles de los participantes (directos e indirectos) facilitará el diseño del sistema integral que pueda ser financiado (total o parcialmente) en función de las respectivas responsabilidades establecidas en la normativa vigente, propiciando la creación de algún tipo de asociación público-privada, solventada en alguna medida con lo obtenido partir de los productos que el mismo proyecto pueda generar.

El circuito de recolección se desarrolló con el software GAMS (General Algebraic Modeling System), que es un sistema de modelado de programación matemática que

permite resolver problemas lineales, no lineales y de optimización. GAMS usa un lenguaje de modelización, en donde el usuario puede escribir en un editor la formulación del modelo matemático, y luego aplicar un solver para resolver completamente el modelo, brindando así un claro conocimiento de las condiciones de su modelo y de las consecuencias que tiene sobre él un cambio en el valor de cualquier variable.

## 2. Revisión bibliográfica

Varios trabajos han sido desarrollados con el fin de optimizar rutas de recolección. (Agha S. R., 2006) optimiza el sistema de enrutamiento de Deir El Balah, Franja de Gaza, utilizando un modelo de programación mixta-entera. El modelo minimiza la distancia total recorrida por los vehículos de recolección. Bonomo y col. (2011) proponen un método que utiliza las operaciones técnicas de investigación para optimizar las rutas de los vehículos de recolección de residuos. Además del criterio de distancia mínima, en el problema de optimización incorporan el objetivo de reducir el desgaste del vehículo y desgaste medido por el concepto de trabajo mecánico. (Komilis, 2008) desarrolló dos modelos de optimización lineal mixto entero para optimizar la operación de recolección y transferencia de residuos sólidos urbanos antes de su traslado al relleno sanitario, para la ciudad de Atenas, Grecia. El modelo se basa en minimizar el tiempo (h / d), mientras que el segundo modelo se basa en minimizar el costo total (€ / día). (Laporte & Nobert, 1981) consideraron el problema de localizar un único relleno sanitario entre n puntos de recolección. El objetivo es minimizar la suma del costo de funcionamiento del depósito y el costo de enrutamiento. (Vecchi, Jorge, Ravagnani, & Paraíso, 2014) presentan un modelo de optimización para resolver el problema de la planificación de la recolección y transporte de residuos sólidos en las ciudades medianas. El modelo matemático desarrollado se formula como un problema de programación lineal con variables mixto - enteras y se transcribe en el Software GAMS. Samanlioglu (2012) propone el desarrollo de un nuevo modelo de ubicación de ruta multiobjetivo implementado en la región de Mármara en Turquía. En el modelo matemático, considera tres criterios: minimizar el costo total, que incluye el costo total de transporte de materiales peligrosos y residuos de desecho y el costo fijo de establecer centros de tratamiento, eliminación y reciclaje; minimizar los riesgos del transporte total relacionado a la exposición de la población a lo largo de las rutas de transporte de materiales peligrosos y residuos de desecho; y minimizar el riesgo total de la población en torno a los centros de tratamiento y eliminación. Rhoma y col. (2009) desarrollan un modelo matemático de logística de RSU, capaz de estimar los costos de recolección y transporte, así como el impacto ambiental de los residuos sólidos municipales, utilizando como caso de estudio una de las ciudades más pobladas de Alemania.

## 3. Desarrollo

El objetivo es diseñar un recorrido óptimo donde un camión equipado con una trituradora, triture y almacene los envases que serán recolectados en cada centro de acopio transitorio (CAT) de cada distrito. Una vez finalizado el recorrido, los chips de plástico se almacenarán en un depósito donde posteriormente serán lavados en una

planta de tratamiento ubicada en un determinado distrito el cual será seleccionado teniendo en cuenta una serie de prioridades. Una vez realizada la trituración, los chips de plástico se lavarán para luego ser reciclados para su utilización de manera de otorgar al proyecto un elemento adicional de rentabilidad. Para la ejecución del modelo se eligió que el punto final de todos los recorridos sea Saavedra, siendo la variable a optimizar el punto de partida de cada circuito.

Uno de los datos del problema es la cantidad de envases vacíos generados por municipio por unidad de tiempo. Los mismos fueron facilitados en una unidad de tiempo en años los cuales, posteriormente fueron afectados por un factor para expresarlos en unidades semanal y quincenal (Tablas 1, 2 y 3). Otro dato es la capacidad del camión recolector el cual es de 9630 envases vacíos de agroquímicos triturados en promedio y las distancias entre los distritos. Como aproximación de dichas distancias se utilizó la página web [www.ruta0.com](http://www.ruta0.com), que calcula la distancia por ruta entre dos ciudades, para cada partido se tomó como referencia la ciudad cabecera del mismo. Los datos que se le proveen al modelo son datos reales obtenidos de fuentes primarias y secundarias con el fin de obtener un resultado confiable e implementable en la práctica.

Se implementó un modelo del tipo problema de enrutamiento de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés) de programación lineal con variables mixto-enteras, para optimizar el recorrido del camión. Cada distrito del SOB representa un punto de recolección ( $P_i$ ), y en cada punto  $P_i$  existe una determinada cantidad de envases vacíos de agroquímicos ( $f_i$ ) almacenados en un Centro de Acopio Transitorio que serán recolectados por cada camión. Los datos requeridos para la implementación son: un set de nodos,  $N(i) = \{1, 2, \dots, n\}$  donde cada nodo es un distrito del SOB, un set que representa los camiones para la recolección de los residuos,  $k = \{1\}$  para este caso planteado donde se va a utilizar un solo vehículo; un parámetro asociado a la capacidad de los camiones,  $c_k$ , un parámetro asociado a la cantidad de residuos a recolectar en cada punto de recolección,  $f_i$ ; una tabla de distancias de orden  $n \times n$ ,  $d(i, j)$ , que representa la distancia a recorrer desde el nodo  $i$  al nodo  $j$  y  $x(i, j, k)$  que es una variable binaria que vale 1 si el vehículo  $k$  transita desde el nodo  $i$  al  $j$ , 0 en el otro caso. Se considerarán para el modelo solo 21 distritos ya que según la información relevada Monte Hermoso no genera ningún envase de agroquímico debido a que no posee actividad agropecuaria.

Dada la cantidad de envases a recolectar, la capacidad del camión recolector, y la gran extensión territorial del Sudoeste Bonaerense, se divide al SOB en 3 zonas y se optimiza un recorrido por zona con un solo camión para satisfacer la demanda de recolección de envases en cada zona. Así, en lugar de implementar el modelo en los 22 distritos con una alta probabilidad de que formen subrutas en el recorrido como indican (Vecchi, Jorge, Ravagnani, & Paraíso, 2014), se implementará el modelo en cada zona y cada recorrido óptimo concluirá en el mismo destino.

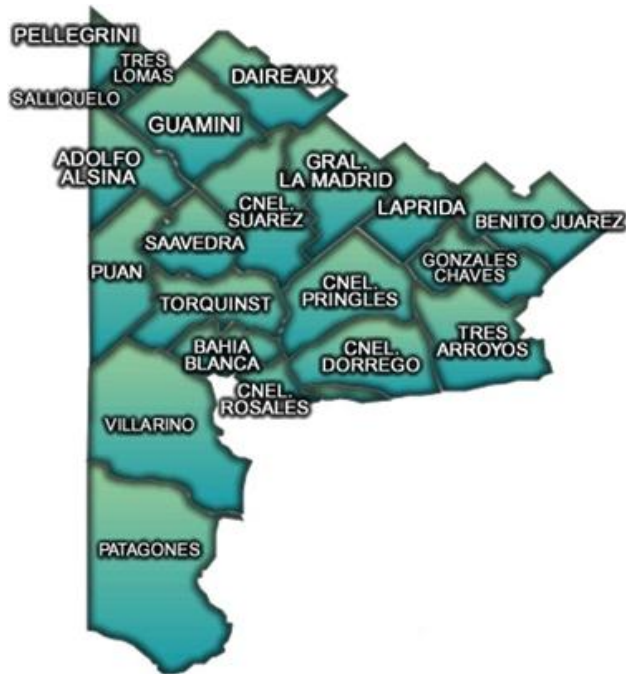


Figura 2. Distritos del Sudoeste Bonaerense



Figura 3. Zona 1



Figura 4. Zona 2



Figura 5. Zona 3

<b>DISTRITOS DE LA ZONA 1</b>	<b>CANTIDAD DE ENVASES DE 20 LITROS GENERADOS POR AÑO</b>	<b>CANTIDAD DE ENVASES DE 20 LITROS GENERADOS CADA 15 DÍAS</b>
<b>BAHÍA BLANCA</b>	<b>11040</b>	<b>425</b>
<b>CARMEN DE PATAGONES</b>	<b>29430</b>	<b>1132</b>
<b>CORONEL ROSALES</b>	<b>13359</b>	<b>514</b>
<b>TORNQUIST</b>	<b>56880</b>	<b>2188</b>
<b>VILLARINO</b>	<b>39420</b>	<b>1516</b>
<b>TOTAL</b>	<b>150129</b>	<b>5774</b>

Tabla 1. Cantidad de envases a recolectar en la zona 1

<b>DISTRITOS DE LA ZONA 2</b>	<b>CANTIDAD DE ENVASES DE 20 LITROS GENERADOS POR AÑO</b>	<b>CANTIDAD DE ENVASES DE 20 LITROS GENERADOS POR SEMANA</b>
<b>ADOLFO ALSINA</b>	<b>161160</b>	<b>3099</b>
<b>CORONEL SUÁREZ</b>	<b>176100</b>	<b>3387</b>
<b>DAIREAUX</b>	<b>85200</b>	<b>1638</b>
<b>GUAMINÍ</b>	<b>130500</b>	<b>2510</b>
<b>PELLEGRINI</b>	<b>62400</b>	<b>1200</b>

<b>PUÁN</b>	<b>71520</b>	<b>1375</b>
<b>SAAVEDRA</b>	<b>82440</b>	<b>1585</b>
<b>SALLIQUELÓ</b>	<b>32340</b>	<b>622</b>
<b>TRES LOMAS</b>	<b>42960</b>	<b>826</b>
<b>TOTAL</b>	<b>844620</b>	<b>16243</b>

Tabla 2. Cantidad de envases a recolectar en la zona 2

<b>DISTRITOS DE LA ZONA 3</b>	<b>CANTIDAD DE ENVASES DE 20 LITROS GENERADOS POR AÑO</b>	<b>CANTIDAD DE ENVASES DE 20 LITROS GENERADOS POR SEMANA</b>
<b>ADOLFO GONZALEZ CHAVEZ</b>	<b>114180</b>	<b>2196</b>
<b>BENITO JUÁREZ</b>	<b>84960</b>	<b>1634</b>
<b>CORONEL DORREGO</b>	<b>145080</b>	<b>2790</b>
<b>CORONEL PRINGLES</b>	<b>96540</b>	<b>1857</b>
<b>GENERAL LAMADRID</b>	<b>67860</b>	<b>1305</b>
<b>LAPRIDA</b>	<b>17340</b>	<b>333</b>
<b>TRES ARROYOS</b>	<b>246540</b>	<b>4741</b>
<b>TOTAL</b>	<b>772500</b>	<b>14856</b>

Tabla 3. Cantidad de envases a recolectar en la zona 3



El camión inicia el recorrido en punto óptimo que se corresponde a algún distrito de cada zona y lo finaliza en Saavedra, donde se instalaría el depósito para los chips de plástico y la planta que trate el agua de lavado.

El modelo matemático se compone de una función objetivo representada por la Ecuación 1 mediante la cual se desea minimizar la distancia a recorrer por el vehículo.

$$\text{Min} \left( \sum_{k=1}^1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{(i,j)} * x_{(i,j,k)} \right) \forall i \neq j \quad (1)$$

La Ecuación 2 es una restricción que considera la capacidad del camión.

$$\sum_{i=1}^n f_{(i)} \leq c_{(k)}, \quad k = 1 \quad (2)$$

La Ecuación 3 tiene como objetivo darle continuidad al circuito de recolección.

$$\sum_{i=1}^{n-1} x_{(i,t,k)} = \sum_{j=2}^n x_{(t,j,k)}, \quad t = 2, \dots, n-1; k = 1; i \neq t; j \neq t \quad (3)$$

La Ecuación 4 especifica que el distrito de Saavedra será el punto final del recorrido.

$$\sum_{i=1}^n x_{i(\text{Saavedra}),k} = 1, \quad k = 1 \quad (4)$$

La Ecuación 5 especifica que del distrito de Saavedra no saldrá ningún vehículo ya que es el punto final del recorrido.

$$\sum_{j=1}^n x_{(\text{Saavedra}),j,k} = 0, \quad k = 1 \quad (5)$$

La Ecuación 6 asegura que el mismo recorrido de i a j no sea realizado más de una vez por el camión.

$$x_{(i,j,k)} + x_{(j,i,k)} \leq 1, \quad i, j = 1, \dots, 21; i < j; k = 1 \quad (6)$$

La ecuación 7 asegura que el camión k salga una vez y solo una de cada nodo i, excepto en el nodo Saavedra que es el punto final del recorrido.

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n; i \neq j; i \neq \text{Saavedra}; k = 1 \quad (7)$$

La Ecuación 8 asegura el camión k llegue una vez y solo una a cada nodo j.

$$\sum_{i=1}^n x_{(i,j,k)} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n; i \neq j \quad (8)$$

#### 4. Resultados

Luego de implementar el modelo para cada zona se obtuvieron los siguientes resultados:

Para la zona 1 el modelo determina que el punto inicial del recorrido sea Carmen de Patagones siguiendo su recorrido por Punta Alta, Tornquist, Bahía Blanca, Médanos y finaliza en el municipio de Pigüé siendo el recorrido total mínimo de 665 km. La frecuencia del recorrido será cada dos semanas, recolectando en total en cada recorrido 5774 envases aproximadamente. Para la zona 2 el punto inicial del recorrido será Daireux, luego continúa recolectando por Carhué, Puan, Coronel Suárez, Guaminí, Tres Lomas, Pellegrini, Salliqueló, finaliza en Pigüé y el recorrido total mínimo es de 784 km. La frecuencia del recorrido será dos veces por semana, recolectando en total en cada recorrido 8120 envases aproximadamente. Para la zona 3 el punto inicial del recorrido será Adolfo González Chávez, continúa por Benito Juárez, Laprida, General La Madrid, Coronel Pringles, Coronel Dorrego, Tres Arroyos y finaliza en Pigüé con un recorrido total mínimo de 733 km. La frecuencia del recorrido será también de dos veces por semana, recolectando en total en cada recorrido 7428 envases aproximadamente. Dado que la capacidad del camión se ha estimado en 9630 envases, en ningún recorrido se llenará completamente, sino que se llenará en un 60%, 85% y 77% respectivamente para cada zona, con lo cual si en algún periodo del año se generaran más envases que en otros, en función de lo que se coseche en cada distrito y en la cantidad en que se produzca, existe un margen de seguridad considerable para cuando se generen más envases que lo estimado. Cada recorrido se grafica en la Figura 6.

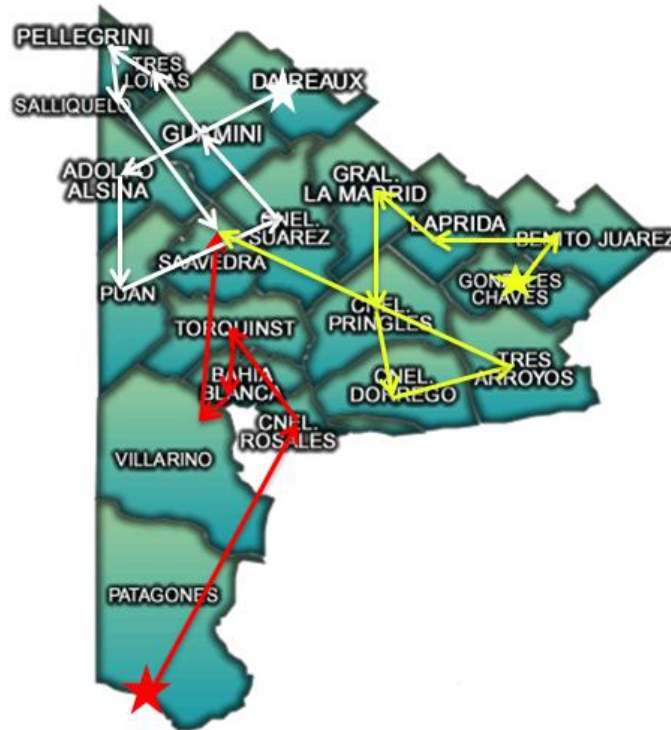


Figura 6. Resultados del modelo

## 5. Conclusiones

Como se observa en los resultados, se han obtenido circuitos continuos para cada recorrido donde cada uno inicia en un distrito elegido por el modelo y finaliza en el distrito de Saavedra tal como se le indicó al modelo a través de las ecuaciones 5 y 7. En este trabajo se logró desarrollar un modelo donde se encuentra un recorrido óptimo para 3 subregiones del Sudoeste Bonaerense fijando el punto final para cada recorrido minimizando la distancia recorrida y cumpliendo con la demanda de envases en cada distrito. En una etapa posterior se implementará el modelo imponiendo como destino final cada distrito del SOB con el fin de comparar las distancias recorridas y en función de los resultados determinar cuál es el mejor distrito para localizar el depósito de chips de plástico y la planta de tratamiento de efluentes. Además, se podría ajustar el modelo de tal manera que no sea necesaria la división por zonas y se obtengan circuitos cerrados únicos para todo el SOB en su conjunto.

## 6. Bibliografía

Agha, S. R. (2006). Optimizing Routing of Municipal Solid Waste Collection Vehicles in Deir El-Balah-Gaza Strip. *The Islamic University Journal*, 75-89.

Bonomo y col. (2011). A method for optimizing waste collection using mathematical programming: a Buenos Aires case study". *Waste Management Res* 2012 30: 311. DOI: 10.1177/0734242X11402870.

Komilis, D. (2008). Conceptual modeling to optimize the haul and transfer of municipal solid waste. *Waste Management* 28, 2355-2365.

Laporte, G., & Nohert, Y. (1981). An exact algorithm for minimizing routing and operating costs in depot location. *European Journal of Operational Research*, Vol. 6, Issue 2, 224-226.

Rhoma y col. (2009). "Environmental & Economical Optimization for Municipal Solid Waste Collection Problems, A Modeling and Algorithmic Approach Case Study"

Samanlioglu (2012). "A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem". *European Journal of Operational Research*.

Vecchi, T. P., Jorge, L. M., Ravagnani, M. A., & Paraíso, P. R. (2014). Optimization of Planning Routes in Solid Waste Collection. *David Publishing* Vol. 8, 596-601.