

# LOS SISTEMAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS (LOS MÉTODOS Y SUS APLICACIONES)

Edgar Pérez Arriaga <sup>1</sup>, Jesús Racero Moreno<sup>2</sup>, Gabriel Villa Caro <sup>2</sup>

## Resumen

En los últimos años el crecimiento económico ha conducido a un aumento y cambio del nivel de consumo que está estrechamente unido al incremento de la emisión de residuos sólidos urbanos. La recolección de estos residuos se ha convertido en un problema de especial importancia que cobra mayor énfasis cuando los recursos disponibles para su recolección son limitados. En este trabajo se hace una descripción de los diferentes métodos aplicados como lo son los que aplican heurísticas y metaheurísticas, estudios de tiempos y movimientos entre otros, para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios.

## 1. Introducción

El actual crecimiento económico asociado al incremento de la población en áreas urbanas va estrechamente ligado al incremento de residuos sólidos generados por una sociedad de consumo. La insuficiente capacidad, sobre todo de capital, para recoger los residuos. La aparición de tiraderos clandestinos, es uno de los problemas que acarrea un mal manejo de rutas de recolección y ello se convierte en potenciales focos de infección y transmisión de enfermedades en las ciudades.

Tanto la capacidad de los camiones, las distancias, y el crecimiento acelerado de nuevos centros de población, aunado al mal diseño de las rutas contribuye a que el servicio de recolección no cumpla con las expectativas esperadas de este servicio. (Obras Públicas, Victoria 2005)

El estudio de la recolección, manejo y tratamiento de residuos sólidos urbanos está compuesto por una gran cantidad de

tareas, algunos de ellos son: los estudios de generación de basura, localización de contenedores donde los ciudadanos depositan los residuos, emplazamiento de centros de tratamiento de residuos, cuantificación de la flota y características de los vehículos de recolección y personal necesario para la recolección o diseño de las rutas a seguir.

El diseño de rutas es una estrategia a considerar para solucionar, por su elevado costo en el proceso de recolección de residuos.

El diseño de rutas para la recolección de basura no es un problema fácil de resolver (VRP, Vehicle Routing Problem o bien CARP, Capacitated Arc Routing Problem), los algoritmos propuestos en la literatura no resuelven algunas veces de forma óptima la problemática, pero si más cercana a la ideal y de máxima eficiencia comparada con el método actualmente utilizado, que en muchos casos complementan el conocimiento y experiencia profesional con elementos cuantitativos. Las primeras herramientas propuestas se han utilizado en planificaciones a corto y mediano plazo, pero los cambios de operatividad pueden tener un costo importante de implementación. (Financieros, políticos y sociales), por ello se debe considerar también el largo plazo, un replanteamiento de rutas y posibles centros de transferencias de los Residuos Sólidos Domiciliarios. (Estrada Bellmann, 2006)

## 2. Revisión de la literatura

En la literatura existen muchas referencias sobre el problema de los residuos urbanos. El esfuerzo se ha centrado en aspectos socio-económicos. En el pasado se ha dedicado un gran esfuerzo en el estudio teórico incluyen-

do aspectos socio-económicos y análisis medioambiental asociado a la planificación y gestión, o bien estudios sobre métodos y técnicas y algoritmos para la automatización del proceso. Los principales enfoques se centran en el estudio de los intereses confrontados entre los ciudadanos (residentes) y el gobierno municipal en relación a la selección de los emplazamientos de las plantas de tratamiento, zonas de almacenamiento temporal, características de la recolección y transporte y su impacto en la salud humana debido al tráfico, ruido, etc. En este contexto, el cálculo del costo total de recolección y transporte ha sido estudiado.

En la literatura, se han descrito y desarrollado algoritmos asociados a la localización y diseño de rutas mediante modelos deterministas como Modelos de programación lineal (Hsieh y Ho, 1993). Estos modelos no contemplan diversos factores como la frecuencia de la recolección de residuos y el carácter aleatorio de las emisiones o depósitos de los ciudadanos. Este problema ha sido afrontado por Huang (et al, 1995) donde aplicando técnicas borrosas ha ampliado el campo para la aplicación de esta problemática.

En referencia al diseño de rutas, las primeras herramientas de diseño óptimo de rutas y frecuencias surgen en la década de los 70's, basados en ideas intuitivas, sin una formulación del modelo y su función objetivo, en algunos casos sin exploración del espacio de soluciones. Posteriormente, en la década de los 80, se formulan algunas funciones objetivo, y se incorporan nuevos parámetros tales como el cubrimiento de

<sup>1</sup> Unidad Académica Multidisciplinaria de Agronomía y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Victoria Tamaulipas, México.  
<sup>2</sup> Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla.

la demanda, factor de carga. (Axhausen y Smith, 1984). Finalmente, el problema que resuelve el diseño de rutas con la especificación de frecuencia de paso es planteado y demostrado que es un problema no computable en tiempo polinomial (NP) ya que se asemeja al problema MVRPW (Múltiple vehicule routing problem with time Windows, Problema de diseño múltiples rutas con ventana de tiempo) donde los métodos exactos no obtienen solución en tiempos razonables. El problema puede ser resuelto mediante técnicas heurísticas o bien técnicas meta-heurísticas tales como Algoritmos genéticos, Recocido Simulado, Búsqueda Tabú o Sistemas de hormigas.

### 3. Caracterización de los métodos de resolución

En la década de los 90's aparecen otros enfoques, como la utilización de meta-heurísticas y la exploración del espacio de soluciones. La facilidad de integrar módulos existentes y de incorporar interfases gráficas, estimulan el desarrollo de nuevos métodos, los que se diferenciarán por su:

- Adaptabilidad: respecto de los datos disponibles, principalmente aquellos relativos a la topología de la red de tránsito y a la demanda de viajes (matrices origen-destino);
- Interactividad: con el usuario, de modo de permitir la incorporación de conocimiento humano (técnico humano) en el proceso de toma de decisiones;
- Eficiencia: calidad en los resultados y tiempos de procesamiento razonables;
- Flexibilidad: en cuanto al horizonte de planificación, los primeros métodos refirieron a planificaciones de corto y mediano plazo. Ortúzar, J. de D. y Willumnsen, L. (1996)

El principal componente que caracteriza a cada uno de los modelos, es su formulación. Los modelos presentados, en general, buscan maximizar el nivel de servicio, minimizando el uso de los recursos, según determinadas restricciones.

En lo relacionado a los métodos heurísticos, se puede decir que son aproximados y que se basan generalmente en el sentido común del proyectista y en ciertas reglas de experiencia. Aparentemente, requiere de un mínimo de esfuerzo, recursos económicos y materiales, además que los expertos consideran que son adaptables a un amplio rango de

## Resumen de las características de Modelos Usados

Método	Ventajas	Desventajas
HEURÍSTICOS	Recomendados para el diseño de micro-rutas	Difícil obtener rutas óptimas
METAHEURÍSTICOS	Resolver problemas de gran complejidad. Proporcional marco general	Aproximados y complejos
LITTLE	Identifica cuatro criterios: robustez, facilidad del control, simplicidad	Se necesitan de otras ecuaciones para resultados explícitos
VRP	Facilita la toma de decisiones, impacto relevante en los costos	Define rutas de transporte entre múltiples orígenes y destino, define secuencia de visitas para minimizar costos
WESTINGHOUSE	Análisis a detalle de tiempos y movimientos y evaluación de desempeño	Susceptible a prejuicios y apreciación persona

problemas. (Pólya, George, 1990)

Entre las principales ventajas que presentan los métodos heurísticos es que son más eficientes y dan mejores resultados que las diseñadas con base en la experiencia del proyectista. La principal desventaja es que no son los más recomendables, ya que es muy difícil que se obtengan rutas óptimas con tales métodos. Los métodos heurísticos han sido aplicados sobre poblaciones menores de cien mil habitantes. En lo referente a las reglas básicas para el diseño de rutas por métodos heurísticos, estas son sencillas de ejecutar ya que son comunes al momento de aplicar.

Existen muchos algoritmos de solución para el VRP. En los últimos años han tomado importancia el desarrollo de algoritmos basados en procesos denominados Meta-heurísticos: Gendreu y otros (1991), Osman, (1993), Campos y Mota (1995), Kontoravdis (1995).

Los procedimientos Metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Los Metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de:

inteligencia artificial (búsqueda tabú), evolución biológica (algoritmos evolutivos) y mecanismos estadísticos (templado simulado). Gendreu (1991).

Las metaheurísticas tienen muchos aspectos que las hacen ser un excelente método para resolver gran cantidad de problemas complejos en la industria: en general ellas son simples, fáciles de implementar, robustas y han sido probadas como altamente efectivas en resolver los problemas difíciles. Aún en sus implementaciones simples y más básicas, las metaheurísticas han sido capaces de resolver efectivamente problemas muy difíciles y complejos. Esas ventajas están relacionadas con los cuatro atributos de las metaheurísticas, que son: precisión, velocidad, simplicidad y flexibilidad, Cordeau et al. (2002).

La búsqueda tabú, a diferencia de otros algoritmos basados en técnicas aleatorias de búsqueda de soluciones cercanas, se caracteriza porque utiliza una estrategia basada en el uso de estructuras de memoria para escapar de los óptimos locales, en los que se puede caer al "moverse" de una solución a otra por el espacio de soluciones. Glover (1989).

En el caso algoritmos de solución para el VRP. En los últimos años han tomado

importancia el desarrollo de algoritmos basados en procesos denominados Meta-heurísticos: Gendreu y otros (1.991), Osman, (1.993), Campos y Mota (1.995), Kontoravdis (1.995).

Los problemas de rutas de vehículos, dentro de los problemas de distribución y transporte, tienen importancia por sí mismos tanto desde el punto de vista teórico como por sus muchas aplicaciones. Se modelizan como problemas de recorridos en grafos (mixtos en el supuesto más general) que deben dar servicio, con ciertas condiciones, a las líneas, a los vértices o a ambos.

#### 4. Conclusiones

POR AUTOR

M.G.C. Edgar Pérez Arriaga

Un sistema de rutas bien diseñado, trae como consecuencia que el servicio de recolección y transporte de los residuos sólidos municipales sea eficiente. En otras palabras reduce costos de operación y mantenimiento; se modifica la proporción de las distancias productivas respecto a la distancia total recorrida; se da el servicio a toda la población tal como se ha proyectado; se aprovecha toda la capacidad de los vehículos recolectores; se aprovecha toda la jornada legal de trabajo;

Dr. Pedro Estrada Bellman

Hacen falta estudios para una adecuada transferencia de tecnología en el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios, considerando los métodos de

programación lineal, que tomen en cuenta la mayor cantidad de variables como lo son: la distribución - concentración de las poblaciones, según estrato económico, distancia de recorrido a la deposición final, así como las restricciones que implica la infraestructura del ayuntamiento de cada ciudad por periodos de tiempo específicos.

Dr. Jesús Racero Moreno

El diseño de rutas en la recolección de residuos urbanos es un problema muy complejo, cuya solución óptima es casi imposible de alcanzar. Los autores que han tratado el problema buscan soluciones en varias etapas independientes entre sí y secuenciales, en una primera se localizan los emplazamientos de contenedores donde los ciudadanos dejan sus residuos, a continuación se diseñan las rutas y finalmente se obtienen las frecuencias de recolección. La independencia existente entre estas etapas sugiere que las soluciones obtenidas en cada una de ellas no tenga por que ser una buena solución desde el punto de vista global. Esta debilidad sugiere el desarrollo de nuevas líneas de trabajo que aborde el problema englobando las tres etapas y ofreciendo una solución donde existan dependencias entre la localización, diseño de rutas y cálculo de frecuencias.

Dr. Gabriel Villa Caro

El problema descrito en este trabajo es un problema muy complejo que puede ser abordado mediante dos vías. El desarrollo

#### AUTORES:

Ing. M.G.C. Edgar Pérez Arriaga  
Unidad Académica Multidisciplinaria de Agronomía y Ciencias. Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Victoria Tamaulipas, México. edgar@uat.edu.mx

#### CO-AUTORES

DR. Pedro Estrada Bellmann  
Unidad Académica Multidisciplinaria de Agronomía y Ciencias. División de Estudios de Posgrado. Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Victoria Tamaulipas, México. pestrada@uat.edu.mx  
DR. Jesús Racero Moreno,  
DR. Gabriel Villa Caro  
Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla.

de heurísticas propias del problema, que presentan la ventaja de ser rápidas para problemas de pequeño tamaño y muy condicionado por los datos de la ciudad y resultados que se desea obtener. El segundo tipo de enfoque basado en procedimientos meta-heurístico tiende a ser más genérico, existiendo muchas alternativas de aplicación. Así mismo, la literatura provee de ejemplos análogos que facilitarían nuevas líneas de investigación asociadas al tema. Por último, el desarrollo y uso de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica facilitan la interpretación de los resultados obtenidos en la aplicación de los métodos y procedimientos de resolución. ||

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Axhausen, K. W. y Smith, R. L. (1984) Evaluation of Heuristic Transit Network Optimization Algorithms. *Transportation Research Record*, Vol 976, 7-20.
- [2] CAMPOS V. y MOTA E. (1.995): "Metaheurísticos para el CVRP". XXII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. Sevilla, Noviembre 1.995.
- [4] Cordeau J.F., Gendreau M., Laporte G., Potvin J.Y., and Semed F., "A guide to vehicle routing heuristics", *JORS*, 53, 2002 (pp. 512-522).
- [5] GENDREU M., HERTZ A. and LAPORTE G. (1.991): "A Tabú Search Heuristic for Vehicle Routing Problem". *Management Sci.* 40 (10), pp.1276-1290.
- [6] GLOVER F. (1.989). "Tabú Search: Part I". *ORSA Journal on Computing*, Vol 1, pp. 190-206.
- [7] Ing. Libertad García Cabrales (2005), *Servicios Públicos*, Ayuntamiento Victoria (2005-2007).
- [8] Joaquín Bautista, Jordi Pereira, Elena Fernández. *Diseño de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en el área metropolitana de Barcelona*. Dpto. de Organización de Empresas. Universidad de Cataluña. España.
- [9] Joaquín Bautista.; Jordi Pereira. (2004) *Ant Algorithms for Urban Waste Collection Routing*. *Lecture Notes in Computer Science*, 3172:302-309.
- [10] KONTORAVDIS G. and BARD J. F. (1.995): "A GRASP for the Vehicle Routing Problem with Time Windows". *ORSA Journal on Computing*, Vol. 7, pp.10-23.
- [11] Ortúzar, J. de D. y Willumsen, L. (1996) *Modelling transport*. John Wiley and Sons, Inc.
- [12] OSMAN I. H. (1.993): "Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem". *Annals of Operations Research*, Vol. 41, pp. 421-451.
- [13] Pólya, George (1990), *How to Solve It*, Penguin Books. ISBN 0140124993 Pedro Estrada Bellman 2005 División de Estudios de Posgrado Unidad Académica Multidisciplinaria de Agronomía y Ciencias (UAT).
- [14] Vittorio Maniezo. 2004. *Algorithms for large directed CARP instances: urbansolid waste collection operational support*. Department of Computer Science University of Bologna. Italy.