

## AVAILABLE RESOURCES ORGANIZATION FOR THE PLASTICS SELECTIVE COLLECTION

Carlos Alberola, M.; Benedito Bordonau, M.; Gallardo Izquierdo, A.;  
Colomer Mendoza, F. J.

Universitat Jaume I

One of the municipal engineering essential tasks is the municipal solid waste collection (MSW). The selective collection introduction has made that the number of collection routes has been multiplied due to more collection trucks are needed, at least one per MSW fraction such as organic-rest, paper and cardboard, glass and plastic fractions. Furthermore the recent years upward trend in fuel prices makes even more important the optimization routes collection. To organize the MSW collection, we must take into account that every town has its own streets layout characteristics and a number of limited resources. That means that the number of waste containers, the number of collection trucks as well as the available staff are basic premises to define the optimum collection routes. This paper presents the plastic selective collection organization in a Spanish town taking into account all these factor and adapting it to the actual resources.

**Keywords:** *Reorganization; Optimization; Routes; Collection; Municipal solid waste*

## ORGANIZACIÓN DE LOS RECURSOS DISPONIBLES PARA LA RECOGIDA SELECTIVA DE ENVASES.

Una de las tareas esenciales de la ingeniería municipal es la recogida de los residuos sólidos urbanos que se generan en las ciudades. La introducción de la recogida selectiva hace que el número de itinerarios de recogida se multipliquen, ya que se ponen en funcionamiento más camiones, como mínimo uno por fracción recogida, que en la mayoría de casos corresponde a orgánica-resto, papel-cartón, vidrio y envases. Además, la tendencia al alza que ha experimentado el precio de los carburantes en los últimos años hace que la optimización de esta recogida sea hoy en día más importante si cabe. Por otro lado, cada ciudad tiene unas características propias de trazado y unos recursos limitados que se deben tener en cuenta a la hora de organizar la recogida de residuos. Es decir, el número de contenedores ubicados en las calles, el número de camiones de recogida así como el personal disponible son premisas fundamentales de las que hay que partir para definir trazados óptimos. Este documento presenta el caso de la reorganización de la recogida selectiva de los envases de una ciudad española de tamaño medio en base a estos factores, adaptando la recogida a los recursos existentes en dicha localidad.

**Palabras clave:** *Reorganización; Optimización; Rutas; Recogida; Residuos sólidos urbanos*

## 1. Introducción

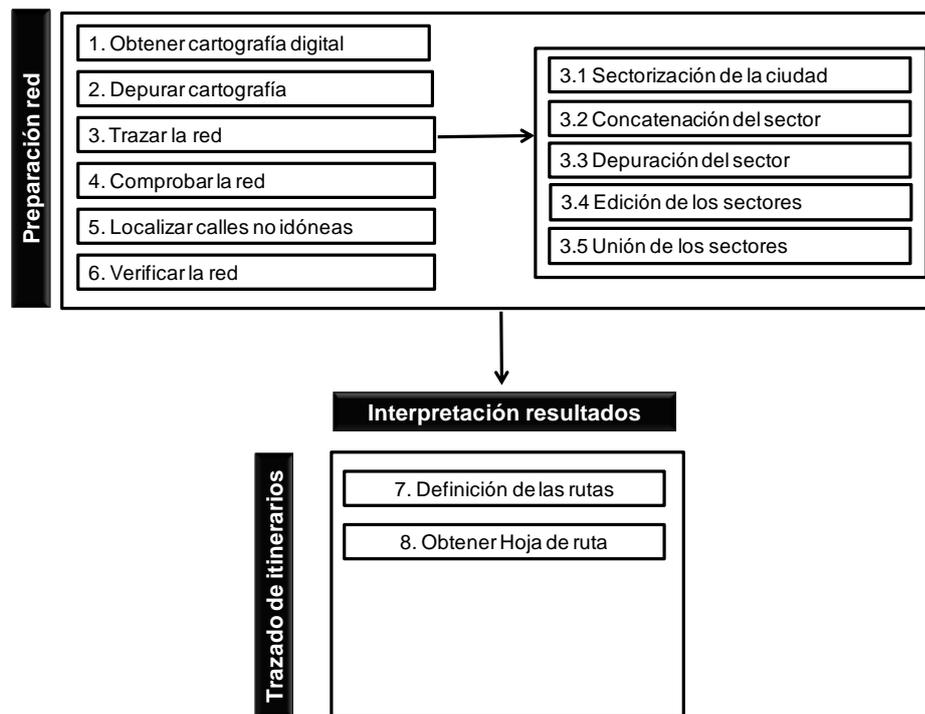
La gestión de residuos producidos por la población es un tema que preocupa a las autoridades de todo el mundo. Según datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012), actualmente en España se estima que cada habitante produce al año una media de 535 kg de residuos mientras que la cifra en Europa no sobrepasa los 502 kg por habitante. A pesar de que en los últimos años han aumentado los índices de reciclaje de España, la cifra sigue estando todavía alejada de la media europea, y de países como Dinamarca, Bélgica, Holanda o Alemania. La organización Ecoembes en su informe anual de 2011 expone que se ha reciclado un 68,3% de los envases, cifra que ha crecido considerablemente respecto a 1997 donde la tasa de reciclaje era del 4,8%. El primer paso para que este proceso de reciclado sea fructífero es que la separación en los hogares se realice de manera correcta. En segundo lugar que los ciudadanos sean conscientes de la importancia de la separación en el hogar y retirada de los productos al contenedor apropiado. Finalmente, es importante realizar un proceso de recogida óptimo por parte de la empresa encargada de la gestión de este tipo de residuos. La optimización de la recogida de residuos urbanos puede sin lugar a dudas reducir los costes de gestión y los impactos negativos sobre el medio ambiente. Algunos autores se han decantado por el uso de algoritmos heurísticos para resolver problemas de gestión como la minimización de un recorrido (Fernández de Córdoba et al., 1998). Este tipo de problemas también se ha abordado mediante el uso de otro tipo de algoritmos como son los algoritmos genéticos. Con el uso de estos algoritmos se ha optimizado la recolección de los diferentes tipos de residuos (vidrio, papel, plástico, materia orgánica) (Bautista y Pereira, 2006). La resolución heurística del problema de la optimización de recursos mediante el método tradicional de los algoritmos heurísticos presenta dos inconvenientes, la falta de precisión y los largos tiempos de ejecución. Por este motivo se ha recurrido en otras ocasiones a la teoría de grafos para esquematizar las áreas urbanas como una red en la cual los nodos representan las intersecciones o los contenedores y las calles modelizan los arcos (Viotti, 2003). También se han utilizado los algoritmos genéticos para minimizar la función de la longitud del trayecto. Otra opción es elaborar herramientas propias y distribuirlas bajo licencia Creative Common License con el objetivo de la difusión libre de conocimiento (Rodríguez, 2006). Una herramienta muy extendida en este tipo de cálculos se realiza con Sistemas de Información Geográfica, concretamente con el uso del programa ArcGis. Estos sistemas se han utilizado habitualmente en estudios de optimización de la recogida de residuos (Zamorano et al., 2009) y de reducción del consumo de combustible. Se caracterizan, entre otras cosas, por la posibilidad de crear mapas para la gestión de residuos urbanos (Sharholy et al., 2007). Estas potentes herramientas informáticas han permitido simplificar el diseño de la gestión de residuos urbanos, facilitando la comparación entre las distintas alternativas y escenarios posibles, y reduciendo de manera importante la dificultad y tiempo necesario para el trazado y análisis de las redes que modelan las vías de circulación de camiones. La utilización de estas herramientas ofrece la posibilidad de obtener modelos de gestión de RU versátiles, permitiendo detectar con facilidad las modificaciones y cambios que éstos necesitan, según evolucionan las pautas de comportamiento de la sociedad (Gallardo et al., 2010)

En este trabajo se ha utilizado como herramienta de soporte para el estudio de la recogida de envases ligeros el programa informático ArcGis. Concretamente se ha estudiado la recogida de este tipo de residuos en la ciudad de Castellón, ciudad que cuenta con unos 180.000 habitantes. El cálculo de las rutas se ha adaptado a los recursos disponibles en dicho municipio.

## 2. Metodología

Para abordar este estudio, se ha analizado en primer lugar los servicios de enrutamiento libres existentes, analizando sus ventajas y desventajas. Posteriormente, se ha buscado la forma de obtener una buena cartografía de la ciudad para diseñar las rutas. Cabe decir que una gran parte del trabajo ha consistido en la elaboración de esta cartografía, siguiendo el proceso que se muestra en la figura 1.

Figura 1. Preparación de los datos



Con la cartografía preparada se han diseñado varios escenarios de cálculo y se han presentado los resultados encontrados.

### 2.1. Estudio de los servicios de cálculo de rutas existentes.

En primer lugar se intentó analizar el problema a partir de servicios de cálculo de rutas actuales de acceso libre. Para ello, se consultaron tanto aplicaciones de escritorio como servicios web o plataformas de desarrollo de aplicaciones. Algunos ejemplos de servicios estudiados son: European Routing Service, OpenStreetRouting, Open Route Service, PgRouting, Yours, OpenStreetMaps, Gosmore, Josm, MapQuest, Roadee o Ride. Todos estos servicios ofrecen la funcionalidad de enrutamiento, y tanto las aplicaciones de escritorio como los servicios web tienen definidas las interfaces de usuario para insertar datos de forma sencilla.

Los principales problemas que presentan esta serie de aplicaciones han sido básicamente de tres tipos:

- Restricción de paradas: La funcionalidad de enrutado está limitada a un número de paradas finito que puede oscilar entre 10 paradas, como es el caso del European Routing Service utilizado por ArcMap, hasta 40 con PgRouting. En el caso de estudio planteado el número de contenedores muy superior al marcado por estas aplicaciones.

- **Direccionalidad:** Para obtener una ruta correcta, el itinerario obtenido debe respetar la direccionalidad de las mismas y la posibilidad de que sean de doble sentido de las calles.
- **Área restringida:** algunos servicios solamente proporcionan la funcionalidad de enrutado para una zona concreta que puede ser una ciudad o un área más grande como un país. Por ejemplo, Geobase únicamente funciona para localidades de Canadá y Ride restringe su zona de estudio a la ciudad de Portland. En ninguna de la aplicaciones libres existe la posibilidad de analizar el caso de Castellón.

## **2.2. Diseño de la red para Castellón**

Dado que ninguno de los servicios anteriormente mencionados ofrece la posibilidad de estudiar la ciudad de Castellón y dado que la Universidad Jaume I disponen de licencia del programa ArcGIS 10, se ha optado por el uso de este programa y en concreto por el uso de la extensión Network Analyst. La cartografía utilizada ha sido la obtenida a través del Instituto Geográfico Nacional.

Esta cartografía contiene el trazado de las calles en el formato específico del programa que se ha utilizado pero ha necesitado de una adaptación especial como añadir los sentidos de todas las calles de la ciudad, corregir errores de trazado, y en definitiva adaptar el trazado real de la ciudad al actual.

## **2.3. Ubicación de contenedores de envases ligeros**

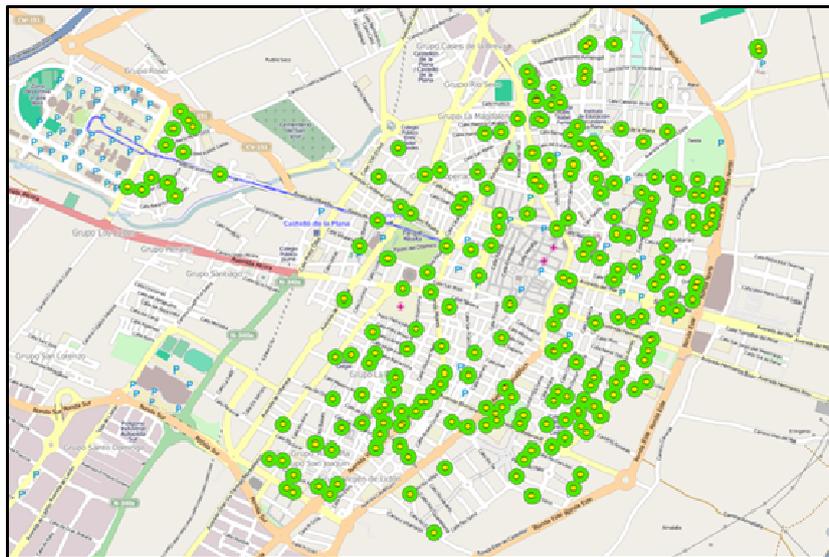
Estudios anteriores (Gallardo et al., 2010) analizaron la influencia de la distancia a recorrer por el usuario hasta el contenedor de envases ligeros en la tasa de separación de dicha fracción. Se observó que a una distancia de 100 m la tasa de separación era de un 13%. Este factor no aumenta mucho al disminuir el radio de acción. Por ejemplo a 50 m de distancia la tasa de separación según estos autores es del 17%. En este trabajo se han representado gráficamente estos radios de acción. En el casco urbano de Castellón se han contabilizado un total de 221 contenedores de envases ligeros, que se han ubicado en la red de calles. La distribución de contenedores con un radio de acción de 150 m se muestra en la figura 2. En ella se aprecia que prácticamente toda la población dispone de un contenedor de envases ligeros a menos de 150 m de distancia de su domicilio. El hueco que se aprecia en el centro de la ciudad corresponde a una plaza y el que se observa en la parte izquierda de la figura corresponde a un barranco que separa la ciudad de la zona universitaria, de reciente creación.

**Figura 2. Buffer de 150 m**



En la figura 3 se han representado la distribución de los contenedores de envases ligeros con un radio de acción de 50 m. En este caso, se observa que muchos hogares quedarían sin tener un contenedor a 50 m de distancia.

**Figura 3. Buffer de 50 m**



## 2.4 Cálculo de rutas

Normalmente las empresas dedicadas a la recogida de residuos sólidos urbanos dividen las ciudades en sectores. Como se ha comentado anteriormente, Castellón dispone de un total de 221 contenedores y la recogida de envases ligeros se estructura en un total de 5 sectores, cada uno de ellos cuenta con menos de 60 contenedores como se muestra en la tabla 1:

**Tabla 1. Número de contenedores por sector**

Sector	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5
Nº contenedores	43	58	51	54	15

El sector 5, es un sector relativamente nuevo de la ciudad, poco habitado y por ello contiene pocos contenedores. Se considera como un sector a parte porque se trata de una zona separada del resto de la ciudad por barreras naturales.

El cálculo de rutas se han planteado tres posibles escenarios:

- Escenario 1: Cálculo de la ruta siguiendo el mismo orden de paradas que el realizado hasta ahora.
- Escenario 2: Cálculo de la ruta manteniendo el primer y último contenedor de la ruta actual dejando que el programa reorganice el orden de recogida del resto de contenedores
- Escenario 3: Cálculo de la ruta óptima que pase por todos los contenedores sin añadir ninguna restricción en las paradas. En este caso, no se le indica ningún orden preestablecido ni los puntos de inicio y fin de la ruta.

En el cálculo de rutas hay dos variables de tiempo que se deberían tener en cuenta como son el tiempo de desplazamiento entre contenedores y el tiempo de parada que tiene en cuenta el tiempo utilizado en la carga y descarga del contenedor. Para calcular el tiempo que se emplea para el recorrido entre contenedores se ha considerado que la velocidad del camión es de 20 km/h. Respecto al tiempo de parada se ha supuesto que es el mismo en todos los casos, con lo cual, no afectaría en la comparación entre itinerarios y no se ha considerado.

Finalmente, se ha analizado una posible reestructuración de los sectores en los que se divide la ciudad de Castellón en base a los recursos disponibles que en este caso y según la información disponible es de tres camiones de recogida de envases ligeros. En este caso se plantean 4 situaciones diferentes. El primer caso planteado es el correspondiente a dividir la ciudad en tantos sectores como camiones disponibles, de manera que se realice un único desplazamiento por camión. Posteriormente se ha dividido la ciudad en 4, 5 y 6 sectores de manera que un camión realizaría dos viajes, tres viajes y en el último caso cada camión realizaría dos viajes.

### **3. Resultados**

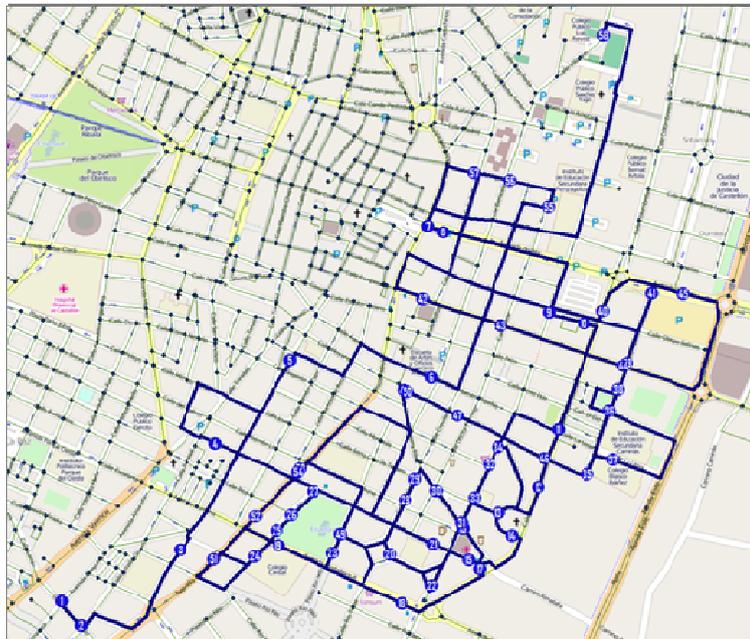
En los sectores 3, 4 y 5, se han realizado cálculos en base a los tres posibles escenarios planteados anteriormente, ya que de ellos se dispone cierta información de partida. En el resto de sectores, en los que simplemente se conoce la ubicación de los contenedores, se ha calculado únicamente el escenario 3. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2. En esta tabla no se ha contabilizado el tiempo que emplean los camiones para realizar las paradas puesto que es un tiempo que se asume para todos igual y por tanto las diferencias de tiempo entre unas rutas u otras serían las mismas.

**Tabla 2. Longitudes y tiempos calculados por sectores**

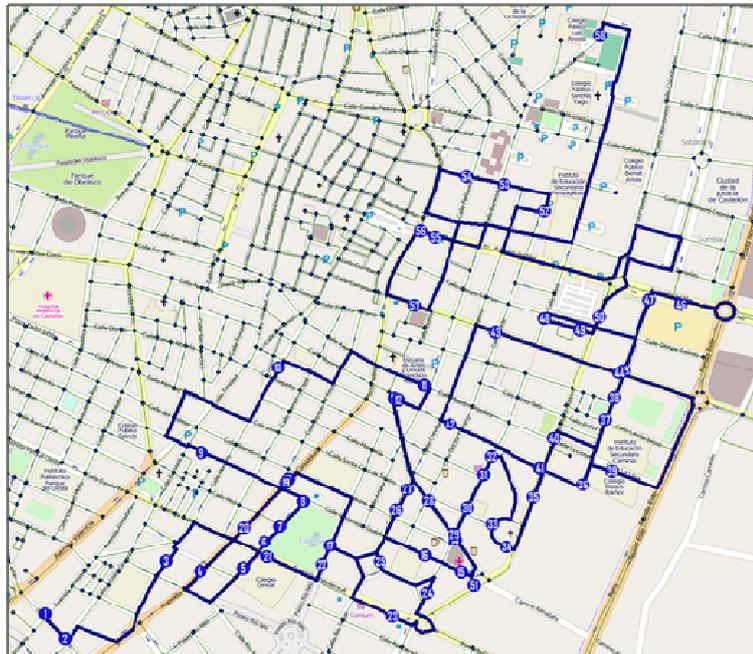
	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	km	Tiempo desplazamiento	km	Tiempo desplazamiento	km	Tiempo desplazamiento
Sector 1					12,3	27 min
Sector 2	22,3	1h 7 min	14,2	43 min	14	42 min
Sector 3	25,6	1h 17 min	17,8	53 min	16,1	48 min
Sector 4	23,5	1h 11 min	17,9	54 min	17,6	53 min
Sector 5					3,5	11 min

Para cada uno de los escenarios de los diferentes sectores, se ha dibujado la ruta sobre el mapa que seguiría el camión de recogida. A modo de ejemplo se muestra en la figura 4 el resultado de cálculo para el sector 2 siguiendo el mismo orden de paradas que el que se sigue normalmente. En la figura 5, se ha representado la ruta seguida por el camión en el sector 2, teniendo como punto inicial y final el mismo que en el escenario 1 pero modificando el orden del resto de paradas. En último lugar se muestra en la figura 6, la ruta óptima del camión de recogida suponiendo que pasa por todos los contenedores pero no se indica preferencia de contenedor de inicio y contenedor de fin de ruta.

**Figura 4. Ruta del sector 2, escenario 1**



**Figura 5. Ruta del sector 2, escenario 2**



**Figura 6. Ruta del sector 2, escenario 3**



En la figura 7 se muestra la ruta óptima de recogida calculada para un sector nuevo de la ciudad del cual no se tienen datos de referencia. A parte de las restricciones de giros y sentidos de las calles común en todos los casos, la restricción marcada en este caso es que la ruta pase por todos los contenedores existentes en este sector.

**Figura 7. Ruta óptima de recogida del sector 5**



Otra de las tareas realizadas en este estudio ha sido intentar reorganizar la recogida de los contenedores de envases en función de los recursos disponibles en esta población. La ciudad cuenta con un total de 221 contenedores, y tres camiones de recogida. Por tanto, se han realizado divisiones de la ciudad en tres sectores, cuatro, cinco y seis sectores. En el caso de dividir la ciudad en tres sectores, se supone que cada camión realizaría una única ruta que contendría una elevada cantidad de contenedores tal como muestra la tabla 3.

**Tabla 3. División de la ciudad en tres sectores**

	Camión 1	Camión 2	Camión 3
Nº contenedores	72	74	75
km	23,2	23,7	30
Tiempo desplazamiento	1h 10min	1h 11min	1h 30min

En el caso de dividir la ciudad en 4 sectores, un camión realizaría la recogida de dos sectores. El número de contenedores por sector disminuye así como la distancia recorrida por cada uno de ellos como muestra la tabla 4.

**Tabla 4. División de la ciudad en 4 sectores**

	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4
Nº contenedores	53	56	56	56
km	17,2	18	22	27
Tiempo desplazamiento	54 min	54 min	1 h 6 min	1 h 22 min

La tabla 5 muestra la siguiente división realizada que corresponde a considerar cinco sectores. En este caso, dos camiones recogerían un sector, descargarían en la planta de tratamiento y volverían a recoger los residuos de envases de otro sector.

**Tabla 5. División de la ciudad en 5 sectores**

	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5
Nº contenedores	41	45	45	45	45
km	14,3	17	17,1	18,7	24
Tiempo desplazamiento	43 min	51 min	52 min	56 min	1 h 13 min

Finalmente, en la tabla 6 se presenta el caso de dividir la ciudad en 6 sectores. Cada camión debería en este caso realizar la recogida de dos sectores.

**Tabla 6. División de la ciudad en 6 sectores**

	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5	Camión 6
Nº contenedores	37	36	37	37	37	37
km	13	13,2	17	16,2	19,2	22,1
Tiempo desplazamiento	39 min	40 min	51 min	49 min	58 min	1 h 7 min

#### 4. Conclusiones

Los contenedores de envases ligeros de la ciudad de Castellón, distribuidos por toda la ciudad, cubrirían las necesidades de los ciudadanos si se considera que el radio de acción de 150 m es un radio eficiente. Sin embargo, si se considera una distancia menor, de 50 m, quedarían muchas viviendas sin cubrir. Esto es especialmente importante ya que uno de los factores que hace que aumente el nivel y calidad de la separación en fracciones es la cercanía a un contenedor.

Los esfuerzos de este estudio se han dedicado principalmente a desarrollar una cartografía adecuada para el cálculo de rutas de recogida de los contenedores de envases de la ciudad de Castellón. Los principales servicios libres para el cálculo de rutas no han sido útiles ya que en el caso de estudio existen una gran cantidad de paradas a realizar durante la ruta. La cartografía facilitada por el Instituto Nacional Geográfico Nacional ha sido de gran ayuda para obtener el trazado de calles aunque se ha tenido que completar y en algunos casos modificar. El obtener una cartografía de la ciudad detallada y completa es fundamental para obtener datos fiables.

El análisis realizado necesita completarse con otro tipo de datos como la ubicación de semáforos, ya que este tipo de dispositivos pueden hacer variar el tiempo de recorrido. En cualquier caso, con los datos que se han podido recopilar hasta la fecha se ha observado que comparando los escenarios 1, 2 y 3 para los sectores de los cuales se dispone información sobre el recorrido actual, es posible disminuir la distancia recorrida y el tiempo utilizado en la ruta de recogida de envases ligeros calculada con el programa ArcGis. La diferencia de tiempo de recorrido entre los escenarios 2 y 3 no es significativa pero sí lo es respecto a la del escenario 1.

Se ha podido realizar una simulación de una posible reorganización de la recogida considerando la limitación de recursos disponibles como son el número de camiones. En el caso de estudio, a partir de tres camiones de recogida se han planteado varias posibilidades, dividiendo la ciudad por sectores. Evidentemente, a mayor sectorización de la ciudad, menor es el número de contenedores a recoger y menor la distancia recorrida en cada sector, aunque se necesitaría a partir de la división en cuatro sectores de más de un viaje ciudad-planta de tratamiento de un camión.

Como futuros estudios, se plantea profundizar en el cálculo de estas rutas analizando factores muy importantes como la densidad de población por sectores, la frecuencia y horarios de recogida. El análisis de la densidad de población por sectores ayudará a realizar una distribución óptima de los contenedores que ayude a mejorar el proceso de recogida separada.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias a la concesión del Proyecto de Investigación "Comparación de métodos para el diseño de redes de recogida selectiva de RSU. Aplicación a un sector de Castellón de la Plana" dentro del Plan de Promoción de la Investigación de la Universitat Jaume I en colaboración con Fundació Caixa Castelló-Bancaixa y la Unviersitat Jaume I de 2011.

## 5. Referencias

- Bautista J, Pereira J. (2006) Modeling the problem of locating collection areas for urban waste management. An application to the metropolitan area of Barcelona. *Omega* 34, 617-629.
- Carlos M., Gallardo A., Colomer F.J. (2011) Comparación de métodos de optimización de rutas en la recogida de residuos sólidos urbanos (RSU) aplicado a Castellón de la Plana). IV Simposio Internacional de Residuos Sólidos. Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos. México D.F.
- Ecoembes. El reciclado de envases en Europa. Informe Eurostat datos 2009.
- Fernández de Córdoba P., García Raffi L.M., Sanchis J.M. (1998) *Computers Operational Research*. Vol 25, No 12, pp 1097-1106.
- Gallardo A, Bovea M.D, Colomer F.J., Prades M., Carlos M. (2010) Comparison of different collection systems for sorted household waste in Spain. *Waste Management* 30. 430–2439.
- Gallardo A., Bernad D., Bovea M.D., Colomer F.J., Carlos M. (2010) Diseño de una herramienta SIG para la recogida selectiva de residuos urbanos. Aplicación a Castellón de la Plana. XIV International Congress on Project Engineering. Madrid
- Instituto Geográfico Nacional. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> (2012)
- Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente: Perfil Ambiental de España 2011. Informe basado en indicadores.(2012).
- European Routing Service. <http://www.arcgis.com/home/item.htm> (2012)
- Rodríguez A. Grafos: Herramienta informática para el aprendizaje y resolución de problemas reales de teoría de grafos. (2006). X Congreso de Ingeniería de Organización.
- Sharholly M., Ahmad K., Vaishya R.C., Gupta R.D. (2000) Muncipal solid waste characteristics and management in Allahabad, India. *Waste management* 27, 490-6.
- Viotti P., Poletini A., Pomi R., Innocenti C. (2003) Genetic algorithms as a promising tool for optimisation of the MSW collection routes. *Waste Management and Research*. 21;292.

Zamorano M., Molero E., Grindlay A., Rodríguez M.L., Hurtado A., Calvo F.J. (2009) A planning scenario for the application of geographical information systems in municipal waste collection: A cases of Churriana de la Vega (Granada, Spain) Resources, Conservation and Recycling 54, 123-133.