

Trabajo Fin de Master

Master Universitario en Ingeniería Industrial

Aplicación al área metropolitana de Huelva de una metodología para la optimización del problema de recogida de residuos orgánicos urbanos.

Autor: Guillermo Hernández Martín

Tutor: José Carlos Molina Gómez

**Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**
Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Master
Master Universitario en Ingeniería Industrial

Aplicación al área metropolitana de Huelva de una metodología para la optimización del problema de recogida de residuos orgánicos urbanos.

Autor:

Guillermo Hernández Martín

Tutor:

José Carlos Molina Gómez

Profesor titular

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Master: Aplicación al área metropolitana de Huelva de una metodología para la optimización del problema de recogida de residuos orgánicos urbanos.

Autor: Guillermo Hernández Martín

Tutor: José Carlos Molina Gómez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Agradezco a mi tutor todo el trabajo realizado en este Trabajo Fin de Máster. A mis maestros y profesores, porque han constituido una parte fundamental de este camino. A mis compañeros o, mejor dicho, a mis amigos, por hacerme más amenas las horas de estudio dentro de la Escuela y también por los instantes fuera de ella.

Por último, y en el lugar más importante, a mi familia y mi mujer, por apoyarme en todos mis proyectos y por sostenerme en los momentos de zozobra. Jamás podré compensar toda la ayuda que me brindáis.

Guillermo Hernández Martín

Sevilla, 2024

La Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo fija la obligatoriedad de la recogida selectiva de biorresiduos o materia orgánica biodegradable para antes del 31 de diciembre de 2023 por parte de los ayuntamientos. Por este motivo, las autoridades municipales requieren la implantación de nuevos contenedores para la recogida selectiva. Dichos contenedores, de color marrón, se sumarán a los contenedores existentes para vidrio, papel y cartón, y envases ligeros.

El objeto del presente estudio es la aplicación de una metodología para la optimización de la recogida de biorresiduos sólidos urbanos, particularizándolo en la ciudad de Huelva. El problema consiste en escoger la ubicación de los nuevos contenedores y el posterior diseño de las rutas de recogida.

Se ha detallado la caracterización de la ciudad, densidad de población, datos de empresas líderes en el sector, y multitud de datos más con el fin de obtener resultados afines a la realidad.

La metodología implementada en este trabajo, persigue mejorar los estudios realizados por empresas del sector, proporcionando un valor añadido en términos de sostenibilidad, al aportar soluciones óptimas y objetivas, que permitan la toma de decisiones sujetas a unas restricciones que pueden ser adaptadas a cada tipología de municipio.

Para poder llevar a cabo todo lo anterior, se han utilizado modelos de programación lineal como herramienta de investigación. En primer lugar, se ha realizado una revisión del estado del arte del problema para poder basar científicamente los modelos de programación lineal de este trabajo final de master. A continuación, se ha desarrollado la metodología basándose en dos problemas diferentes, para los que se han desarrollado modelos de programación lineal. El primer problema se basa en un problema de localización de contenedores, que es definido como un problema multiobjetivo que considera conjuntamente la minimización del número de localizaciones y la distancia máxima a los distritos definidos. El segundo problema consiste en el posterior diseño del trazado de la ruta de los vehículos de recogida.

Para el primer problema, con el fin de dar un mejor servicio a la ciudadanía, se pretende minimizar el número de localizaciones escogidas para la instalación de contenedores, a la vez que se minimiza la máxima distancia recorrida por los ciudadanos a éstos. Aplicado al caso de estudio en la ciudad de Huelva, se resuelve este problema multiobjetivo exponiendo varios escenarios para poder justificar las mejores soluciones. Para el segundo problema, el diseño de las rutas de recogida tendrá en cuenta las características del vehículo y la carga con el fin de reducir el consumo total de carburante.

Finalmente se obtendrán todas las rutas de los diferentes escenarios planteados, obteniendo los costes de explotación y realizando un análisis económico-financiero donde se justifique una solución de manera óptima, que evalúe el consumo de combustible, calidad del servicio prestado al ciudadano y gasto por las administraciones públicas para la adjudicación de ese servicio.

Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council establishes the obligation of selective collection of bio-waste or biodegradable organic matter by municipalities before 31 December 2023. For this reason, municipal authorities require the implementation of new containers for selective collection. These containers, brown in colour, will be added to the existing containers for glass, paper and cardboard, and light packaging.

The object of this study is the application of a methodology for the optimisation of the collection of solid urban bio-waste, particularising it in the city of Huelva. The problem consists of choosing the location of the new containers and the subsequent design of the collection routes.

The characterisation of the city, population density, data from leading companies in the sector, and a multitude of other data have been detailed in order to obtain results in line with reality.

The methodology implemented in this work aims to improve the studies carried out by companies in the sector, providing added value in terms of sustainability, by providing optimal and objective solutions that allow decision-making subject to restrictions that can be adapted to each type of municipality.

In order to carry out all of the above, linear programming models have been used as a research tool. Firstly, a review of the state of the art of the problem has been carried out in order to scientifically base the linear programming models of this master's final project. Next, the methodology has been developed based on two different problems, for which linear programming models have been developed. The first problem is based on a container location problem, which is defined as a multi-objective problem that jointly considers the minimization of the number of locations and the maximum distance to the defined districts. The second problem consists of the subsequent design of the route layout of the collection vehicles.

For the first problem, in order to provide a better service to citizens, the aim is to minimise the number of locations chosen for the installation of containers, while minimising the maximum distance travelled by citizens to these. Applied to the case study in the city of Huelva, this multi-objective problem is solved by presenting several scenarios in order to justify the best solutions. For the second problem, the design of the collection routes will take into account the characteristics of the vehicle and the load in order to reduce total fuel consumption.

Finally, all the routes for the different scenarios proposed will be obtained, obtaining the operating costs and carrying out an economic-financial analysis where an optimal solution is justified, which evaluates fuel consumption, quality of service provided to citizens and expenditure by public administrations for the award of this service.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
1	Introducción
	1
<i>1.1 Contexto y Justificación del proyecto</i>	<i>1</i>
1.1.1. Definición de la Fracción Orgánica	1
1.1.2. Sostenibilidad y Economía circular	2
1.1.3 Procedencia de los residuos y metodología de análisis.	3
1.1.4. La importancia de las campañas de concienciación.	6
1.1.5. Marco legal	8
<i>1.2. Objetivos del trabajo final de máster</i>	<i>9</i>
<i>1.3. Estructura del trabajo final de máster</i>	<i>10</i>
2	Estado del arte
	11
2.1 <i>Introducción</i>	<i>11</i>
2.2 <i>Problema de localización de instalaciones</i>	<i>11</i>
2.2.1 <i>Introducción</i>	<i>11</i>
2.2.2 <i>Clasificación de problemas</i>	<i>11</i>
2.2.3 <i>Metodologías exactas aplicadas al problema SCLP</i>	<i>14</i>
2.3 <i>Problema de diseño de rutas de vehículos para la recogida de residuos</i>	<i>14</i>
2.3.1 <i>Introducción</i>	<i>14</i>
2.3.2 <i>Clasificación de problemas</i>	<i>14</i>
3	Metodología
	18
3.1 <i>Introducción</i>	<i>18</i>
3.2 <i>Modelo de programación lineal para la localización de contenedores de residuos orgánicos en zonas residenciales urbanas</i>	<i>18</i>
3.2.1 <i>Problemas multiobjetivo</i>	<i>18</i>
3.2.2 <i>Formulación del modelo</i>	<i>19</i>
3.2.3 <i>Resolución del problema multiobjetivo mediante el método ϵ-constraint</i>	<i>20</i>
3.3 <i>Modelo de programación lineal para el diseño de rutas de vehículos para la recogida de residuos orgánicos</i>	<i>21</i>
3.3.1 <i>Formulación del modelo</i>	<i>21</i>
4	Caso real de estudio
	23

4.1	<i>Introducción</i>	23
4.2	<i>Resolución del problema multiobjetivo de localización de contenedores</i>	23
4.2.1	Datos del problema.	23
4.2.2	Análisis de las distancias máximas de asignación de distritos a localizaciones	34
4.2.3	Análisis de los resultados obtenidos por el problema multiobjetivo	35
4.3	<i>Resolución del problema de diseño de rutas de vehículos para la recogida del material orgánico</i>	36
4.3.1	Datos del problema	37
4.3.2	Análisis de los resultados obtenidos por el problema multiobjetivo	42
4.3.3	Análisis económico-financiero	44
4.3.4	Conclusiones obtenidas del caso de estudio	46
5		Conclusiones
		50
	Referencias	51
	Anexos	53
	<i>1 Modelo de Programación Lineal Multiobjetivo con método epsilon-constraint</i>	53
	<i>2 Modelo de programación lineal para el diseño de rutas de vehículos para la recogida de residuos orgánicos</i>	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de la fracción resto en Extremadura.	6
Tabla 2. Definición de las variables, vectores, matrices e índices	19
Tabla 3. Definición de las variables, vectores, matrices e índices.	21
Tabla 4 Evolución de la población desde 2000 hasta 2023 (Instituto Nacional de Estadística, 2023)	24
Tabla 5. Producción diaria de residuos de la fracción Resto.	26
Tabla 6. Tabla de datos de producción diaria por distrito.	27
Tabla 7. Producción diaria estimada final de residuos de la fracción orgánica.	28
Tabla 8. Producción diaria de residuos de la fracción orgánica en los distritos estudiados.	28
Tabla 9. Grandes Productores	29
Tabla 10. Datos de Producción media por tipología de gran productor	30
Tabla 11. Producción diaria de la fracción orgánica en Grandes Productores.	30
Tabla 12. Grandes Productores Mixtos	30
Tabla 13. Tabla de Coordenadas de las ubicaciones de contenedores.	33
Tabla 14. Resultados obtenidos de la primera fase del problema multiobjetivo	34
Tabla 15. Resultados obtenidos de la segunda fase del problema multiobjetivo.	35
Tabla 16. Comparación de Escenarios entre Fases	36
Tabla 17. Escenarios y nodos del modelo de programación lineal	37
Tabla 18. Tabla de ubicaciones activadas en cada escenario y su producción.	38
Tabla 19. Datos del vehículo Diesel GNC.	40
Tabla 20. Datos del vehículo Diesel.	41
Tabla 21. Datos de maquinaria	41
Tabla 22. Datos de maquinaria en el sistema internacional de unidades.	41
Tabla 23. Resultados obtenidos del segundo modelo de programación lineal.	42
Tabla 24. Distancia media recorrida por los ciudadanos en función del escenario.	44
Tabla 25. Tabla de costes por ruta.	44
Tabla 26. Análisis económico financiero de los escenarios de vehículos de GNC.	45
Tabla 27. Análisis económico financiero de los escenarios de vehículos Diesel.	45
Tabla 28. Diferencias económicas entre escenarios para un periodo de 10 años.	47
Tabla 29. Solución óptima inicial.	47
Tabla 30. Solución y ruta óptima propuesta.	47
Tabla 31. Ruta definitiva.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Quinto Contenedor o Contenedor Marrón (Lola, 2021)	1
Figura 2. Ejemplo de Economía circular de la comunidad de Madrid (Madrid, 2017)	2
Figura 3. Fracción resto conocida como “Contenedor Gris”.	3
Figura 4. Inicio de la Caracterización	4
Figura 5. Fin de la Caracterización	5
Figura 6. Caracterización de la fracción resto en Extremadura.	6
Figura 7. Campaña informativa de todas las fracciones.	7
Figura 8. Punto Informativo de la Fracción Orgánica.	7
Figura 9. Portada del Plan Integral de Residuos de Andalucía.	9
Figura 10. Ilustración geométrica del problema de ubicación de cobertura del conjunto (Adeleke & Olukanni, 2020)	13
Figura 11. Clasificación y comparación de los problemas de enrutamiento de nodos y arcos (Hui & Ponce, 2015)	15
Figura 12. Documentos relevantes para la recolección de residuos domésticos	16
Figura 13. Documentos relevantes para la recolección de residuos comerciales.	17
Figura 14. Evolución de la población en la ciudad de Huelva.	24
Figura 15. Densidad de población por m ² . (Instituto Nacional de Estadística, 2023)	25
Figura 16. Distritos seleccionados para la implantación.	26
Figura 17. Grandes Productores de Materia Orgánica de la Ciudad de Huelva	29
Figura 18. Ubicación actual de contenedores en la ciudad de Huelva.	31
Figura 19. Isla de Contenedores del modelo C3200 F	31
Figura 20. Modelo C2200F de la Fracción Orgánica	32
Figura 21. Ubicación de todos los contenedores candidatos	32
Figura 22. Representación gráfica de los resultados obtenidos para cada escenario.	34
Figura 23. Representación gráfica de los resultados obtenidos para cada escenario	36
Figura 24. Ubicación de la Planta de Transferencia y Parque de Maquinaria.	38
Figura 25. Vehículo GNC de recogida carga lateral	40
Figura 26. Vehículo diésel de recogida carga lateral	40
Figura 27. Consumo en función de la carga total del vehículo	41
Figura 28. Consumo en función de la carga en litros por cada 100 kilómetros adiciones	42
Figura 29. Comparativo de distancias recorridas en metros	43
Figura 30. Comparativo de consumos de combustible de Diesel (litros) y GNC (m ³)	43
Figura 31. Análisis económico-financiero del GNC para una duración del contrato de 10 años	45
Figura 32. Análisis económico-financiero del diésel para una duración del contrato de 10 años	46
Figura 33. Ruta diseñada	48
Figura 34. Ruta diseñada ampliada	48

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del contenedor marrón es reducir el impacto ambiental produciendo biorresiduos para utilizarlos como fertilizantes o abonos y generadores de energía. Las administraciones públicas animan a los ciudadanos a reciclar los restos de comida (pieles de frutas y verduras, huesos de carne, espinas de pescado, cáscaras de huevo, tapones de corcho, filtros de café...) y servilletas o papel de cocina utilizados. Además, se solicita que las bolsas que se vayan a depositar en este tipo de contenedor sean preferiblemente biocompostables para facilitar la conversión de los residuos en futuros recursos. (Lola, 2021)



Figura 1. Quinto Contenedor o Contenedor Marrón (Lola, 2021)

La procedencia de este nuevo contenedor se basa en la “Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular” (Boletín Oficial del Estado, 2022) establece que las entidades locales cuya población sea superior a 5.000 habitantes implantarán la recogida separada de biorresiduos de origen doméstico (contenedor marrón) antes del 30 de junio de 2022.

1.1 Contexto y Justificación del proyecto

Para poder comprender el contexto y la justificación de este trabajo, vamos a fundamentar la introducción en 7 partes, que serán detallados en los subapartados de esta sección.:

1. Definición de la Fracción Orgánica
2. Sostenibilidad y economía circular
3. Procedencia y metodología de análisis
4. La importancia de las campañas de concienciación
5. Marco Legal
6. Objetivos iniciales del trabajo fin de master
7. Estructura del trabajo final de máster

1.1.1. Definición de la Fracción Orgánica

Lo primero comienza por definir la Fracción Orgánica (FO, FORS: Fracción Orgánica Recogida Separadamente), que está constituida fundamentalmente por:

- Restos de la preparación o manipulación de la comida y elaboración de los productos alimentarios, restos sobrantes de comida, alimentos en mal estado y excedentes alimentarios que no se han comercializados o consumido (separados de su envase o embalaje),
- Fracción Vegetal (FV) en forma de restos vegetales de pequeño tamaño y de tipo no leñoso procedentes de jardinería y poda. Sus características (contenido en agua, densidad, etc.) son parecidas

a los restos de comida y por ello se asimilan a la FO. (Vicepresidenta Tercera del Gobierno, s.f.)

Las dos características principales de la materia orgánica son las siguientes:

- La Fracción Orgánica es inestable debido a su elevado contenido en agua (alrededor del 80% en peso) y en materia orgánica (hidratos de carbono, proteínas y grasas).
- La Fracción Orgánica tiene una densidad elevada pero variable, entre 0,6-0,8 t/m, lo cual hace que pese mucho y ocupe poco espacio, presentando en general una baja compactibilidad. (Vicepresidenta Tercera del Gobierno, s.f.)

Algunas de las necesidades principales que han propiciado la separación de este residuo son las siguientes:

- Reducir el impacto ambiental que generan los residuos no valorizables que acaban en vertedero.
- Promover la economía circular, así como la sostenibilidad a nivel global.
- La obtención de subproductos como los fertilizantes y el aprovechamiento de los gases de la fermentación del residuo conocidos como biogases, para transformarlos en energía eléctrica.

1.1.2. Sostenibilidad y Economía circular

La economía circular es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende.

En la práctica, implica reducir los residuos al mínimo. Cuando un producto llega al final de su vida, sus materiales se mantienen dentro de la economía siempre que sea posible gracias al reciclaje. Estos pueden ser productivamente utilizados una y otra vez, creando así un valor adicional.

En la siguiente imagen puede verse como se pretende fomentar la economía circular en los municipios donde en este caso el residuo de la fracción orgánica juega un papel esencial, ya que, en caso de separarse correctamente, es un residuo que requiere de pocos procesos de pretratamiento hasta que se transforma en subproductos.

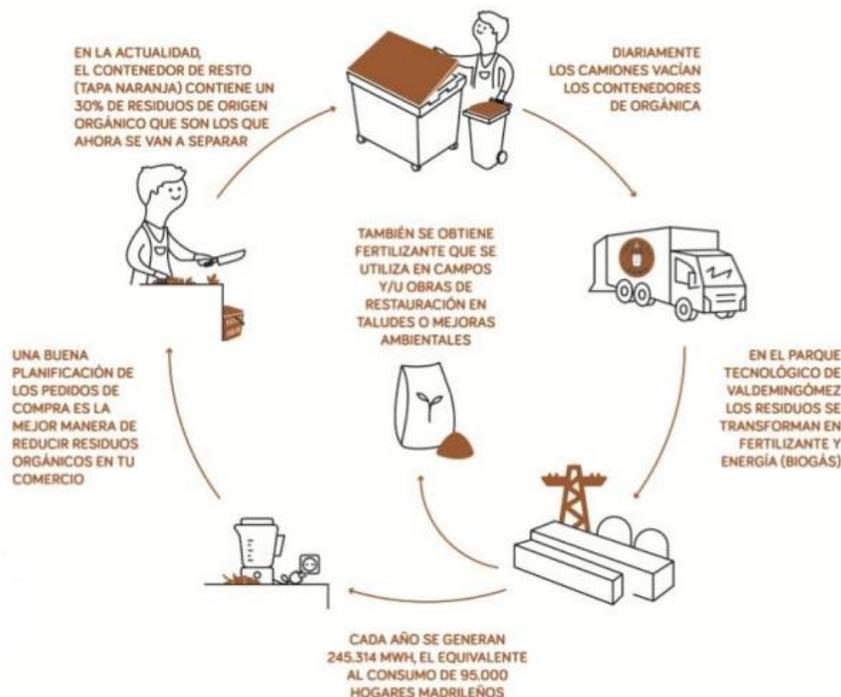


Figura 2. Ejemplo de Economía circular de la comunidad de Madrid (Madrid, 2017)

Las etapas de la economía circular se desarrollan a continuación profundizando las etapas por las que los

residuos atraviesan:

1. El origen de la fracción orgánica se da tanto en hogares como en grandes productores, como pueden ser supermercados, comercios, zonas de restauración, mercados de abastos entre muchos otros.
2. Todos estos residuos son depositados en los contenedores habilitados para ello. En España los contenedores se encuentran repartidos en todas las zonas habitadas con al menos 4 fracciones como son: Resto, Envases Ligeros, Papel/Cartón y Vidrio. Actualmente, el país junto con la unión europea, está sufriendo un cambio constante en muchos municipios a nivel nacional donde ya pueden encontrarse contenedores marrones para la fracción orgánica. Este plan ha ido implantándose de más a menos; es decir; de núcleos de población mayores a menores pudiéndose ver en ciudades como Madrid desde el año 2017.
3. Los servicios de recogida de residuos realizan la función de transportista de cada una de las fracciones. Estas fracciones son llevadas a los gestores autorizados por la autoridad competente, comúnmente suelen ser los ayuntamientos, mancomunidades, diputación u otras entidades las cuales tengan estas competencias. Es posible que cada fracción vaya a diferentes gestores o que todos ellos vayan a un único gestor, cuyas instalaciones comúnmente se denominan “Ecoparques o Plantas de Tratamiento”.
4. Una vez son recepcionadas las toneladas de estos residuos, se pesan y se depositan en un lugar acondicionado para ello esperando a ser pretratadas.
5. Estas toneladas son procesadas por las plantas de tratamiento de residuos donde la primera fase consiste en la separación de “voluminosos” que son elementos que han de ser separados antes de que entren en contacto con las partes principales de la planta pudiendo ocasionar averías, como son la chatarra, elementos que pesen muchos como bloques de hormigón o elementos punzantes o alambres que detengan los movimientos de las cintas.
6. El segundo paso consiste en la separación de la materia orgánica mediante centrifugadoras con orificios de determinado tamaño donde solo cae la materia orgánica, llevándola a una zona específica donde durante al menos 8 semanas el residuo fermenta y va deshidratándose adquiriendo la forma de un compost. Cuando el proceso finaliza su nombre en este momento se conoce como material bioestabilizado.
7. Este material es procesado por una planta de afino donde se filtra para separar todos aquellos materiales que no pudieron ser retirados en procesos anteriores, obteniéndose como producto final lo que se conoce como “compost”.
8. En las fases anteriores, todo el material rechazado se vierte en las celdas de vertido del vertedero, sellándose posteriormente. Durante el proceso de sellado se colocan campanas de extracción de biogás, el cual se conduce hasta unos generadores para producir energía eléctrica.

1.1.3 Procedencia de los residuos y metodología de análisis.

Para poder analizar la procedencia de este tipo de residuos, primero se ha de detallar su origen, “La Fracción Resto”. Esto quiere decir que la totalidad de la fracción orgánica se encuentra en lo que comúnmente se denomina “contenedor gris”.



Figura 3. Fracción resto conocida como “Contenedor Gris”.

La metodología empleada para determinar la composición de la fracción resto se denomina caracterización, la cual consiste en el muestreo del contenido de dicha fracción.

Para que esta sea lo más exacta posible, se han de analizar numerosas muestras, es por ello que se va a detallar un estudio de caracterización de un contrato de una empresa líder en el sector a nivel nacional mostrando datos de un contrato, con el fin de que el presente trabajo fin de master adquiera formas de trabajar que actualmente se utilizan a nivel mundial.

Para poder desarrollar un estudio fiable, se han de realizar multitud de caracterizaciones durante años para poder obtener unos resultados precisos, es por ello, que los datos de las caracterizaciones siguientes han sido tomados **durante 3 años** y se contabilizan **72 caracterizaciones en total**.

El procedimiento comienza consiguiendo una muestra lo más homogénea posible, esto se consigue cuando los vehículos de recogida al entrar en las plantas de tratamiento antes de que se procesen las toneladas de la fracción que transporten, se depositan en una zona habilitada, donde se obtienen los primeros 1.000 Kg.

Estos 1.000 Kg de material serán depositados en una superficie limpia y pavimentada, para proceder a su extendido y homogeneización por medios mecánicos.

Después de esta primera homogeneización, se realizará un primer cuarteo y se tomará el material de dos cuartos opuesto elegidos al azar. Este material se extenderá aparte y se realizará la apertura de las bolsas cerradas.

Sobre esta fracción de material, unos 500 kg, se efectuará una homogeneización y un segundo cuarteo. Posteriormente, se realizará la apertura de las bolsas que aún continúen cerradas y, finalmente, se tomarán 50 kg de cada cuarto y, además, 25 kg de dos cuartos opuestos elegidos al azar.

De esta manera, se obtendrán 250 kg de muestra sobre la que se realizará la separación de materiales. La separación de los materiales se efectuará manualmente sobre una mesa de triaje instalada para tal fin. El peso total de la muestra caracterizada se obtendrá por la suma de pesos de los materiales separados. Para realizar la pesada se dispone de una báscula de precisión adecuadamente verificada/calibrada.

En las siguientes imágenes se muestra cómo llega el material al inicio de la caracterización y como queda al final de la separación.

En la siguiente imagen se puede ver como la primera muestra de 1.000 Kg está totalmente mezclada.



Figura 4. Inicio de la Caracterización

Al final de la caracterización se puede observar cómo los diferentes materiales están separados y agrupados para que puedan ser pesados.

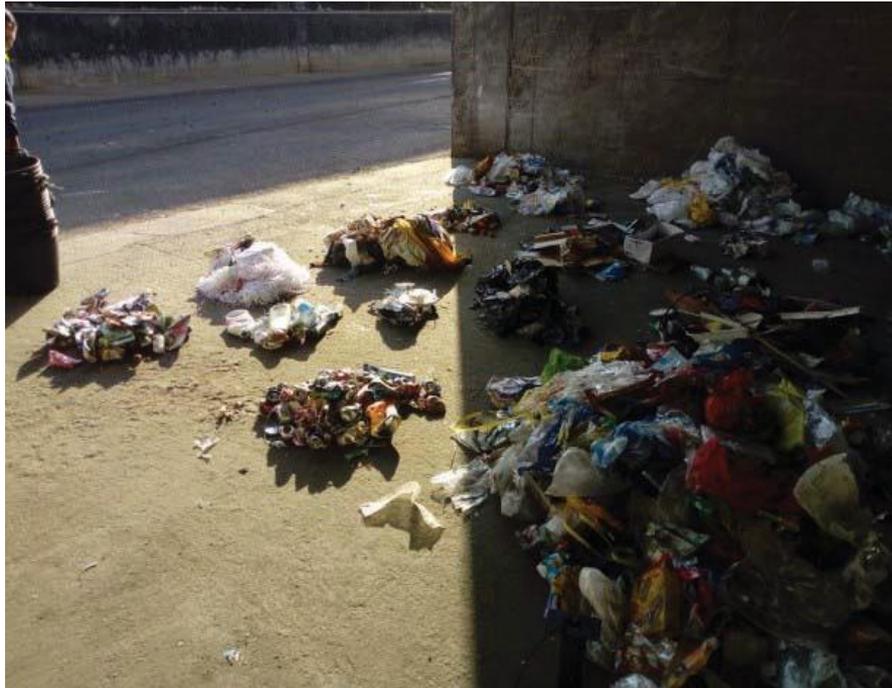


Figura 5. Fin de la Caracterización

Una vez se ha finalizado esta separación se contabilizan las cantidades sobre el total de cada uno de los materiales encontrados para poder identificar los porcentajes de cada tipo de residuo que se encuentran en la fracción resto.

Para este caso los porcentajes más relevantes son la **Materia Orgánica con un 24,04%**, seguido del Papel impreso con un 10,85 %, de los Textiles con un 8,67%, y la Celulosa Sanitaria con 7,48 %.

Cabe destacar que los residuos generados y sus cantidades, dependen de multitud de factores, entre los más importantes destacan:

- La estacionalidad del municipio. Se expone el ejemplo de El Puerto de Santa María municipio en el que residen 90.000, la cual sufre variaciones importantes de habitantes en algunas épocas como verano llegando a picos de 168.000 habitantes.
- Los hábitos de los ciudadanos.
- La industria, comercios y zonas de ocio.

Estos factores, pueden modificar considerablemente los porcentajes mostrados en la caracterización, aunque a nivel nacional los porcentajes de materia orgánica presentes en la fracción resto no difieren más de un 8% entre comunidades autónomas.

Los resultados demuestran la necesidad inminente que han mostrado las administraciones a nivel europeo para implantar una recogida selectiva del residuo que tiene un porcentaje mayor, mediante nuevas normativas. “Por último, mencionar el importante problema derivado de las emisiones de metano procedentes de los numerosos vertederos de RSU que existen en el planeta y que están contribuyendo al aumento de las emisiones de dióxido de carbono, ya que el potencial de calentamiento global de este gas es 28 veces superior al del dióxido de carbono. Esa ha sido la razón de que en la reciente reunión de Glasgow se haya acordado limitar las emisiones de metano por sus efectos perjudiciales sobre el calentamiento del planeta.

Uno de los principales causantes de este problema reside en el desperdicio alimentario; de ahí que las Directivas europeas de residuos establezcan la recogida separada de la fracción orgánica en todos los municipios antes de diciembre de 2023, y este es un enorme reto para nuestra provincia donde no se ha iniciado aún su implantación mediante los contenedores marrones.”

Se muestra mediante la siguiente figura de una manera más ilustrativa la gran diferencia entre la materia orgánica y el resto de residuos contenidos en la fracción resto.

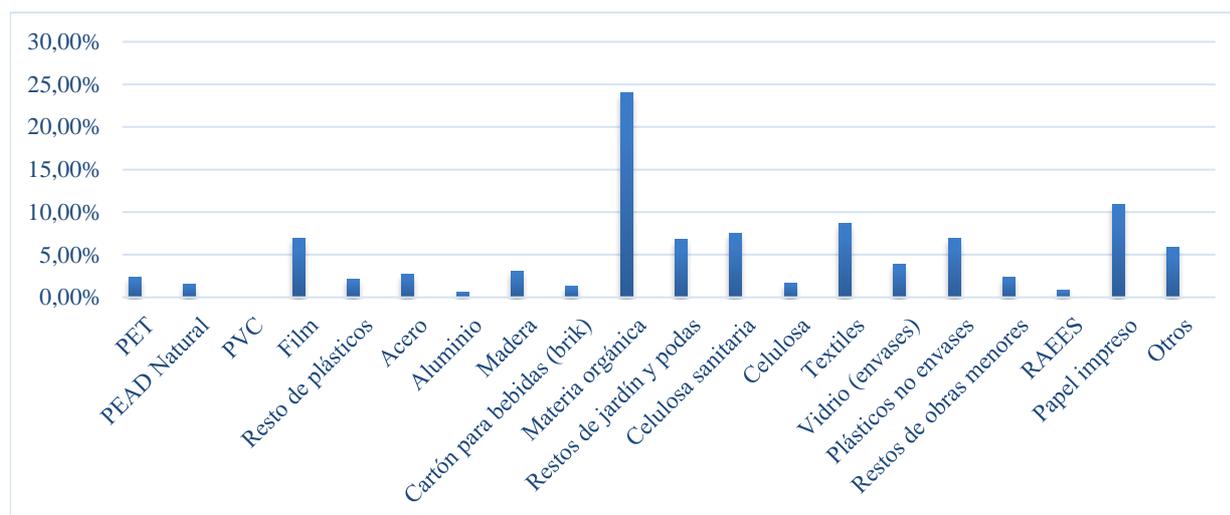


Figura 6. Caracterización de la fracción resto en Extremadura.

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos de todos los materiales encontrados y su porcentaje con respecto al total de los kilogramos analizados.

Tabla 1. Caracterización de la fracción resto en Extremadura.

CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN RESTO	
PET	2,34%
PEAD Natural	1,55%
PVC	0,03%
Film	6,97%
Resto de plásticos	2,16%
Acero	2,69%
Aluminio	0,63%
Madera	3,11%
Cartón para bebidas (brik)	1,34%
Materia orgánica	24,04%
Restos de jardín y podas	6,76%
Celulosa sanitaria	7,48%
Celulosa	1,68%
Textiles	8,67%
Vidrio (envases)	3,85%
Plásticos no envases	6,93%
Restos de obras menores	2,34%
RAEES	0,79%
Papel impreso	10,85%
Otros	5,82%

1.1.4. La importancia de las campañas de concienciación.

La respuesta a la pregunta “¿Cómo realizar una implantación de una nueva recogida selectiva en un municipio?” es clara dentro del sector: Realizando campañas de concienciación.

La participación y colaboración activa de los ciudadanos en la mejora de la calidad de los servicios urbanos, es un elemento indispensable. En este sentido, la complicidad de los ciudadanos y comerciantes sólo se puede

conseguir en base a una buena, permanente y fluida comunicación.

Es por ello que debe de realizarse un “Plan Anual de Campañas Comunicación y Sensibilización”, conteniendo un conjunto de acciones y medidas concretas, centradas en las especificidades y características del municipio encaminadas a conseguir la participación activa de los ciudadanos y comercios, así como para la consecución de los objetivos.

Un ejemplo de un plan anual es el siguiente:

- **Acciones encaminadas a conocer el grado de satisfacción ciudadana**, realizadas a través de cuestionarios y/o encuestas de opinión a la ciudadanía sobre los servicios municipales como es la recogida de residuos o la limpieza viaria.
- **Campaña inicial de lanzamiento del servicio**, de presentación y difusión de los nuevos servicios de recogida de la fracción orgánica.
- **Campaña anual de comunicación y concienciación ciudadana** de carácter general. Por ejemplo, promover una mayor separación de residuos, reducir la generación de residuos, sensibilización sobre el buen uso de los contenedores, etc.



Figura 7. Campaña informativa de todas las fracciones.

- **Acciones de educación ambiental** en escuelas y familias, asociaciones y entidades, reuniones informativas para el ámbito profesional, así como la promoción de eventos relacionados con el medio ambiente, como son la realización de talleres, actividades al aire libre, visitas o reuniones donde se explican los motivos de la separación de este nuevo residuo, su procedencia y economía circular.



Figura 8. Punto Informativo de la Fracción Orgánica.

- **Acciones de comunicación y proximidad.** En medios de comunicación tradicionales y online, RRSS, soportes exteriores, vehículos y material del servicio, folletos, cartelería, puntos de información, etc.

Como cabe esperar, no solo basta con una buena campaña, sino también con una implantación de los servicios de recogida de manera paulatina y comenzando de los núcleos de poblaciones más grandes a más pequeños.

Esto se debe a que, implantando en zonas con mayor densidad de población, pueden obtenerse un mayor número de datos como su composición, impurezas y grado de concienciación de los ciudadanos etc. Estos datos son fundamentales para poder extender el servicio al resto de la ciudad de manera exitosa, antes de que los costes de explotación sean mayores y puedan obtenerse buenos resultados en la recogida desde el primer momento.

1.1.5. Marco legal

Durante las últimas décadas, la industria y el comercio internacional ha evolucionado notablemente, haciendo que cada día sea más accesible cualquier producto en cualquier lugar. Esto directamente deriva en un mayor consumo de materias primas y una sobreproducción en multitud de sectores, por lo que aumenta la cantidad de residuos generados, haciendo que la sostenibilidad y la economía circular sea un problema a nivel mundial, los principales países del mundo así como la unión europea, cada año tomen medidas cada vez más estrictas para una correcta eliminación y recuperación de estos residuos para prolongar la vida útil de los mismos y frenar el impacto medioambiental que supone la sobreproducción.

Es por ello que la Unión Europea, especialmente a en la Directiva europea 2018/581, 30 de mayo de 2018 considera que la gestión de los residuos debe mejorarse y transformarse en una gestión sostenible de las materias con objeto de proteger, preservar y mejorar la calidad del medio ambiente y proteger la salud humana. La gestión también debe garantizar la utilización prudente, eficiente y racional de los recursos naturales y promover los principios de la economía circular. La Directiva 98/2008/CE de residuos ya establecía la obligación de recoger los residuos de forma separada según su tipo y naturaleza.

En la legislación nacional, además de a las normas y leyes vigentes se concretarán las medidas indicadas en el Proyecto de Ley de residuos y suelos contaminados (remitido 18 de mayo de 2021 a las Cortes) revisa la actual Ley 22/2011 de 28 de Julio para cumplir con los nuevos objetivos de residuos establecidos en las directivas de la Unión Europea que conforman el Paquete de Economía Circular. Especialmente en:

- **Prevención en la generación de residuos.** La norma otorga un papel protagonista a la prevención de residuos, con una reducción del peso de los residuos producidos de un 13% en 2025 y un 15% en 2025 respecto a los generados en 2010, que se añaden al objetivo actualmente vigente del 10% de reducción a partir de 2020.
- **Recogida separada y reciclado.** Entre las principales novedades, cabe destacar el establecimiento de un calendario de implantación de nuevas recogidas separadas de residuos para su valorización, además de la ya existente para el papel, los metales, el plástico y el vidrio. Se amplía así la recogida separada a los biorresiduos domésticos (fracción orgánica), a partir de 2022 para entidades locales con más de 5.000 habitantes, **y a partir de 2024 para el resto de municipios**; a los residuos textiles, aceites de cocina usados, residuos domésticos peligrosos y residuos voluminosos a partir de 2025; y a los residuos de construcción y demolición a partir de 2022.

Asimismo, fija objetivos más ambiciosos de preparación para la reutilización y reciclado de residuos municipales: un incremento del 5% cada cinco años hasta alcanzar el 65% en 2035.

Adicionalmente a la legislación nacional, cada comunidad autónoma tiene las competencias para poder legislar de manera más exhaustiva todo lo relativo a los residuos generados en dicha comunidad. Esto hace que a nivel nacional haya unos mínimos que cumplir, pero existirán diferencias entre las comunidades autónomas en algunos puntos.

En el caso de Andalucía, la **legislación autonómica**, además de a las normas y leyes vigentes se concretarán medidas en cumplimiento de la Resolución de 9 de marzo de 2021, de la Secretaría General de Medio Ambiente, Agua y Cambio Climático, por la que se emite y se hace pública la declaración ambiental estratégica del **Plan Integral de Residuos de Andalucía**. (PIREC).



Figura 9. Portada del Plan Integral de Residuos de Andalucía.

A continuación, se resumen los tres programas con mayor impacto en la reducción y separación de residuos que facilitan la recuperación de los mismos:

- **Programa de prevención.** Consta de 19 objetivos específicos y 36 medidas, distribuidas entre los principales flujos de residuos. A señalar:
 - Reducir progresivamente la generación en peso de residuos, partiendo de un porcentaje de reducción del 10% respecto a los generados en 2010 a conseguir en 2020, hasta alcanzar el 15% respecto de lo generado en 2010 en el año 2030
 - Mejorar los niveles de reutilización de los residuos municipales, de modo que en 2030 la preparación para la reutilización alcance el 10% de los residuos municipales generados.
- **Programa de gestión.** El Programa de Gestión consta de 38 objetivos específicos y 98 medidas, distribuidas entre los principales flujos de residuos.
 - Asegurar y mejorar el sistema de recogida separada de los residuos municipales.
 - Garantizar la separación y reciclaje en origen de los bio-residuos, y su recogida de forma separada.
 - Establecer una recogida separada para los residuos textiles y residuos peligrosos de origen doméstico antes de 2025
 - Facilitar la preparación para la reutilización de los RAEE para cumplir con los objetivos mínimos establecidos en el RD 110/2015, de 20 de febrero, y adecuación de los puntos limpios a los requisitos establecidos en este RD.
- **Programa de concienciación.** El Programa de Concienciación, Sensibilización y Comunicación entre otros objetivos se plantean:
 - Fomentar la reducción del consumo de envases desechables
 - Promover la minimización de la generación de RAEE
 - Reducir la presencia de residuos plásticos en las playas
 - Mejorar la recogida selectiva de residuos.

Adicionalmente la **normativa local**, además de a las normas de tráfico y otras, se concretarán medidas en cumplimiento de la Ordenanza para la limpieza y gestión integral de los residuos sólidos urbanos del Excmo. Ayuntamiento de la ciudad de Huelva.

1.2. Objetivos del trabajo final de máster

El principal objetivo del Trabajo Final de Máster (TFM) es como su propio nombre indica la “Aplicación al área metropolitana de Huelva de una metodología para la optimización del problema de recogida de residuos orgánicos urbanos”.

Esta metodología se va a basar en la implantación de un servicio real de recogida de residuos sólidos urbanos, conocido comúnmente como “RSU”.

Los objetivos principales que afectarán a los modelos a diseñar son:

- ➔ Minimización del número de contenedores y ubicaciones que se implanten en la ciudad de Huelva.
- ➔ Minimización de la distancia máxima que ha de recorrer el ciudadano para depositar los residuos en

su contenedor correspondiente.

- Planteamiento de un problema multiobjetivo del que puedan obtenerse resultados de los dos objetivos anteriormente mencionados.
- Diseño de las rutas de recogidas en la que primará la minimización de los consumos de combustibles en base a las distancias, cargas y tipologías de la maquinaria a emplear.
- Cuantificación de las emisiones atmosféricas que los vehículos emiten al realizar los recorridos diseñados.
- Elaboración de un estudio económico financiero que soporte una inversión inicial de compra de vehículos y el gasto en el que se incurre para poder dar servicio durante 10 años para que puedan amortizarse las inversiones.

1.3. Estructura del trabajo final de máster

En este apartado se indicará la estructura que va a tener el trabajo final de máster.

Una vez finalizada la introducción donde se ha desarrollado, la definición de materia orgánica, su procedencia en los residuos conocidos hace unos años y el marco normativo en el que se encuentra actualmente se indicará el contenido de los siguientes capítulos.

En el capítulo 2 (Estado del Arte) se ha realizado una revisión de artículos científicos con la finalidad de realizar una clasificación de los diferentes problemas abordados en este TFM así como una revisión de las metodologías empleadas para su resolución. Cabe destacar que nuestro problema es resuelto en dos fases. Cada una de las fases consiste en la resolución de un problema de optimización para el que se utilizará la herramienta de la programación lineal para su resolución.

En el capítulo 3 (Metodología) se presenta la formulación y explicación de los modelos de programación lineal y técnicas utilizadas para la resolución de los problemas

Por último, en el capítulo 4 (Caso real de estudio) se aplica la metodología expuesta en el capítulo anterior a un caso real de estudio en el área metropolitana de Huelva para la optimización del problema de recogida de residuos orgánicos urbanos.

2 ESTADO DEL ARTE

Tras analizar los artículos científicos que se han elaborado durante los últimos años, se ha extraído esa información para poder hacer uso de ese conocimiento e implantarlo en esta metodología de optimización del problema de recogida de residuos sólido urbanos en la ciudad de Huelva.

2.1 Introducción

En este capítulo se hace una revisión de la literatura de los dos problemas abordados en la metodología para la optimización del problema de recogida de residuos orgánicos urbanos.

Es por ello que en los dos apartados siguientes se desarrollarán respectivamente el problema de localización de instalaciones (FLP, Facility Location Problem) y el problema de enrutamiento de vehículos para la recolección de residuos (WCVRP, Waste Collection Vehicle Routing Problem).

2.2 Problema de localización de instalaciones

2.2.1 Introducción

El problema de localización de instalaciones ha sido estudiado por múltiples universidades y autores en los últimos años debido al exponencial crecimiento de los residuos en el planeta, siendo un problema muy actual ya que la cantidad de residuos que se generan año a año es mayor. Es por ello que se expondrán los diferentes tipos de problemas estudiados, así como su revisión de la literatura.

Los FLP se ocupan de la cuestión de cómo seleccionar, de un conjunto dado de ubicaciones potenciales, un subconjunto rentable de sitios para ubicar nuevas instalaciones o conservar las existentes. Una instalación podría representar cualquier instalación de servicio, como una planta de energía eléctrica, un hospital, una planta de producción de alimentos, un almacén (depósito), una estación de servicio, una oficina gubernamental, o en el caso de este trabajo final de master ubicaciones de contenedores. Los FLP son una clase esencial de problemas en la gestión logística.

2.2.2 Clasificación de problemas

En esta clasificación se expondrán los modelos más importantes en FLP que se han adaptado a problemas relacionados con la gestión de residuos, especialmente la etapa de recolección del sistema.

Uno de los objetivos de este apartado es proporcionar información de primera mano sobre los modelos existentes y los enfoques de solución a la investigación emergente en campos relacionados.

Todos los artículos en los que se ha basado este apartado del estado del arte se obtuvieron de la base de datos de Google Scholar. El periodo de la investigación realizada ha comprendido entre 2006 y 2020 para las aplicaciones de FLP en la gestión de residuos.

Uno de los factores más relevantes en la búsqueda de ubicaciones óptimas para un conjunto de instalaciones, son las distancias de desplazamiento entre los usuarios del servicio. Los usuarios siempre aprecian que la ubicación de las instalaciones no esté demasiado lejos de un punto de servicio. Ogryczak (Ogryczak, 2000) observó que la mayoría de los FLP clásicos se centran en la minimización de la distancia media o la distancia máxima a las instalaciones. De ahora en adelante los usuarios serán denominados clientes al ser aquellos que demandan un servicio.

Los problemas de localización no se clasifican de forma única en la literatura. Pero de manera general se pueden dividir en cuatro clases:

- Modelos analíticos
- Modelos de red

- Modelos continuos
- Modelos discretos.

Los modelos analíticos se basan en suposiciones simples, como los costos fijos de localizar una instalación. Casi no se utilizan para expresar problemas del mundo real. Los modelos de red se encuentran con frecuencia en la planificación del transporte y otras aplicaciones que permiten realizar recorridos por rutas representadas en una red.

Mladenović et al. (Mladenović, Brimberg, Hansen, & Moreno-Pérez, 2007) clasificó los FLP en problemas continuos y discretos. En los modelos continuos, las instalaciones que se van a ubicar se ubican en cualquier lugar del plano elegido y, por lo tanto, se requieren cálculos para determinar las mejores ubicaciones con respecto a las distancias de los puntos de demanda (ubicaciones de los clientes). Además, en los modelos de ubicación continua, los clientes se agrupan (utilizando técnicas apropiadas) y se determina el centroide de cada grupo. Cada centroide se convierte entonces en la mejor ubicación para cada grupo (clúster).

En la mayoría de los casos prácticos reales, las estimaciones en modelos continuos hacen que los modelos discretos se vuelvan factibles. Los modelos discretos manejan la asignación de clientes a un conjunto de puntos de ubicación potenciales (generalmente predeterminados a partir de los resultados del modelo continuo o de una selección aleatoria basada en experiencias pasadas). En otras palabras, el objetivo en un modelo discreto es seleccionar la cantidad requerida de ubicaciones para las instalaciones de un conjunto de ubicaciones conocidas y luego asignar clientes para recibir el servicio de exactamente una de estas instalaciones a un costo mínimo.

Los modelos discretos suelen constar de tres componentes principales: instalaciones que se van a ubicar, un conjunto de ubicaciones y puntos de demanda. Las instalaciones tienen ciertas características, como el número total, el tipo y los costos. Se han identificado dos casos para el número de instalaciones. El primero es el problema de una sola instalación, en el que solo se va a abrir una nueva instalación. El caso más general es el problema de múltiples instalaciones, en el que se establece más de una instalación simultáneamente. Las instalaciones en los problemas de ubicación y asignación también pueden ser de diferentes tipos, como situaciones en las que las instalaciones están diseñadas para proporcionar solo uno o más servicios. Otra consideración importante es la satisfacción de las demandas en estas instalaciones. Esto, a su vez, da lugar a las variantes de FLP no capacitadas y capacitadas. Con base en estas características, se han propuesto en la literatura varios modelos discretos y continuos para varias áreas de aplicación. A continuación, se describen algunos enfoques de solución para FLP con sus posibles algoritmos.

La clasificación seleccionada es la siguiente:

Single Facility Location Problem (SFLP):

El problema de localización de instalaciones únicas (SFLP) pertenece a la clase más sencilla de problemas de ubicación. Implica la ubicación de una nueva instalación única en un plano con la intención de minimizar la suma de distancias (euclidianas o rectilíneas) entre la nueva instalación propuesta y las ubicaciones existentes.

Multi-Facility Location Problem (MFLP):

El problema de localización de múltiples instalaciones se debe ubicar de manera óptima más de una nueva instalación, de modo que cada instalación recién ubicada esté conectada con al menos otra nueva instalación.

Fixed Costs Capacitated Facility Location Problem (FC-CFLP):

En el problema de ubicación de instalaciones con capacidad de costos fijos el objetivo es minimizar los costos fijos asociados a las instalaciones potenciales. El FC-CFLP es un problema de suma mínima porque busca minimizar la suma del costo del flujo entre las instalaciones y los clientes. El costo fijo es un gasto único que varía de un lugar a otro, y que se espera recuperar durante toda la vida útil de la instalación.

Capacitated p-Median Facility Location Problem (CpMFLP):

El problema de localización de instalaciones con capacidad p-mediana es un problema discreto en el que la lista de depósitos potenciales es la misma que la lista de clientes. Los depósitos seleccionados se denominan medianos o concentradores. Donde un problema de p-mediana se define de la siguiente manera.

Considere un gráfico conectado que consta de clientes con distancias de red asociadas entre sí, las nuevas instalaciones p se abrirán para satisfacer las demandas de estos clientes. Un problema de p-mediana ubica

óptimamente las p instalaciones de manera que la suma de las distancias ponderadas en la red entre los clientes y su respectiva instalación más cercana sea la más pequeña. Estos problemas se estudian ampliamente debido a su relevancia para la mayoría de los problemas de la vida real.

Covering Location Problems (SCLP):

Los problemas de Cobertura de localización los clientes pueden recibir servicios de instalaciones potenciales dependiendo de las distancias entre los clientes y las instalaciones. La demanda/solicitud de un cliente solo puede satisfacerse en una instalación siempre que la distancia entre el cliente y la instalación sea igual o menor que un valor predefinido conocido como distancia umbral o radio de cobertura. Hay dos casos de SCLP según el grado de cobertura de las demandas de los clientes. Cuando se cubren todos los puntos de demanda, el problema se denomina SCLP total, y cuando solo se incluyen algunas ubicaciones, el problema es un SCLP parcial.

En la figura siguiente en el lado izquierdo, los puntos de demanda están representados en los nodos de los clientes con las distancias correspondientes entre la instalación de distribución y los clientes. En función de criterios como distancias, cantidades de tiempo, coste el radio de cobertura definirá que clientes han de utilizar una instalación u otra como puede ser un caso más restrictivo en el lado derecho de la figura siguiente.

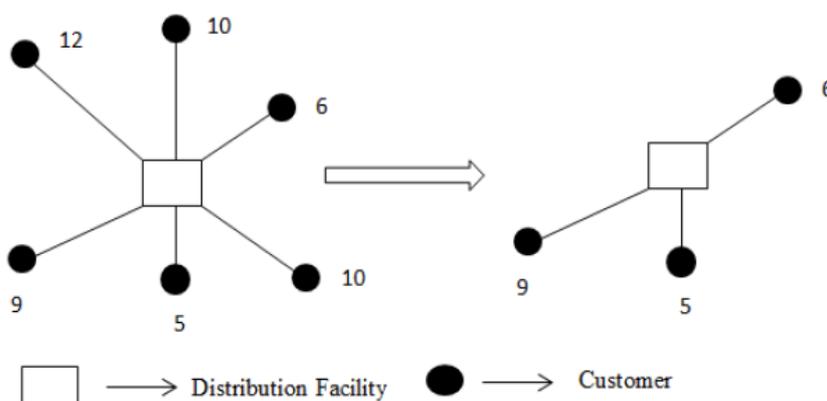


Figura 10. Ilustración geométrica del problema de ubicación de cobertura del conjunto (Adeleke & Olukanni, 2020)

Este problema en concreto es en el que se ha basado el modelo de programación lineal del TFM para ya que se ha de optimizar el problema de la recogida en la ciudad de Huelva aplicado a un problema multiobjetivo. Es por ello que se definirán algunos criterios como la distancia máxima entre el cliente y la instalación para optimizar las posibles soluciones de manera que el problema sea lo más próximo a la realidad. Es por ello que puede decirse que el modelo referencia en nuestro trabajo final de master es el SCLP.

Symmetrical Total Covering Problem (STCP):

El problema de cobertura total simétrica fue formulado por Jans y Degraeve para un problema de lotería. Dos variables x e y son definidas en un conjunto, el cual contiene todos los puntos de demanda x iguales a 1. Si las instalaciones pertenecientes al conjunto cubren al punto la variable tendrá un valor de 0, en caso contrario será 1. Si las instalaciones prestan servicio al cliente en el conjunto la variable tendrá un valor de 0 y 1 en caso contrario.

En términos generales trata de minimizar el coste total de cubrir todos los puntos de demanda.

Maximum Covering Location Problem (MCLP):

El problema de localización de cobertura máxima es un modelo de programación entera parcial y tiene como objetivo maximizar la satisfacción total de demandas en la red con un número máximo limitado de instalaciones.

Undesirable Facility Location Problem (UFLP):

El problema de ubicación de instalaciones no deseadas pertenece a una clase de FLP conocidos como modelos maxisum. A diferencia de los problemas de p-mediana en los que la conveniencia de las instalaciones permite minimizar la función objetivo relacionada con la distancia o el costo; en los modelos maxisum, la preocupación es cómo ubicar las instalaciones lejos de los usuarios previstos.

Branch-and-Bound:

El método de ramificación y acotación (BB) es, con diferencia, el método exacto más utilizado para resolver problemas de optimización NP-hard a gran escala. El algoritmo BB busca en el espacio de la solución factible de un problema dado la mejor solución. Como el número de soluciones posibles crece exponencialmente, solo es posible una búsqueda implícita del espacio de soluciones. Al comienzo del proceso, solo existe un subconjunto del espacio de soluciones y es el espacio de soluciones completo que tiene una solución óptima establecida en 1. A continuación, se genera un conjunto de subconjuntos inexplorados y se representan como nodos en un árbol de búsqueda. A continuación, estos nodos se procesan mediante un algoritmo iterativo con los siguientes componentes: inserción de nodos, estimación de límites y ramificación.

2.2.3 Metodologías exactas aplicadas al problema SCLP

En un SCLP, a diferencia de los problemas de localización clásicos (Drezner 1986, Heragu 1997, Zaferanieh et al. 2008) y sus otras variantes (Lorenna y Senneb 2004, Pacheco y Casado 2005, Ozsoy y Pinar 2006, Eiselt 2007, Teixeira y Antunes 2008) que generalmente no consideran la distancia entre los clientes y las instalaciones de servicio, los clientes pueden recibir servicios de instalaciones potenciales dependiendo de las distancias entre los clientes y las instalaciones. Un cliente puede recibir servicio de una instalación siempre que la distancia entre ellos sea igual o menor que un valor predefinido conocido como distancia umbral o radio de cobertura. Olawale J. Adeleke y M. Montaz Alic, proponen un modelo que se centra en resolver el problema de ubicar islas de contenedores en zonas residenciales y el problema asociado de asignar la producción de residuos de los ciudadanos a estas ubicaciones de contenedores. El problema se formula como el problema de ubicación de cobertura de conjuntos “set covering location problem” (SCLP), una variante del clásico problema de ubicación de isletas de contenedores “facility location problema” (FLP).

Existen dos casos de SCLP dependiendo del grado de cobertura de los puntos de demanda. Cuando todos los puntos de demanda están cubiertos, el problema se llama SCLP total y cuando solo algunos puntos están cubiertos, el problema es un SCLP parcial (Farahani y Hekmatfar 2009). El primer estudio sobre el SCLP que apareció en la literatura fue realizado por Hakimi (1964, 1965). La versión inicial del trabajo de Hakimi, Hakimi (1964), se centró en el problema de localizar el centro de una red, un punto de la red desde el cual la distancia hasta el punto más lejano es mínima. La generalización de este problema, Hakimi (1965), utilizó funciones booleanas para estimar, a partir de un conjunto discreto de centros candidatos, el número mínimo de centros que cubren todos los puntos de demanda dentro de un radio de cobertura específico. La complejidad de esta técnica de solución aumenta a medida que aumenta el tamaño del problema porque es necesario enumerar todas las soluciones factibles.

2.3 Problema de diseño de rutas de vehículos para la recogida de residuos

2.3.1 Introducción

En el apartado anterior los artículos científicos seleccionados han tratado de la optimización en la elección de las ubicaciones de contenedores (llamadas en la literatura científica como instalaciones), pero en este apartado se plantea el problema siguiente, el diseño de las rutas de recogida en base a las ubicaciones previamente seleccionadas. Es por ello que se busca las diferentes maneras en las que los científicos han abordado estos problemas para que sienten las bases del modelo a diseñar posteriormente, buscando como resolver el problema del diseño de rutas de vehículos de recogida.

2.3.2 Clasificación de problemas

En esencia, el problema de diseño de rutas de vehículos para la recolección de residuos (WCVRP, Waste Collection Vehicle Routing Problem) es una variante del problema de enrutamiento de vehículos (VRP, Vehicle Routing Problem) En nuestra metodología, una vez se haya decidido el lugar de la implantación de los

contenedores, se ha de resolver un problema WCVRP para el diseño de las rutas de vehículos para realizar la recogida de residuos.

Todos los artículos en los que se ha basado este apartado del estado del arte se obtuvieron de la base de datos de Google Scholar. El periodo de la investigación realizada ha comprendido entre 2006 y 2020 para las aplicaciones del WCVRP.

El WCVRP consiste, por lo general, en el diseño de rutas de una flota de vehículos ubicados en el depósito para recoger residuos de un conjunto de puntos de recolección con demandas conocidas. Los vehículos deben viajar hasta un vertedero para depositar los residuos antes de regresar vacíos al depósito.

En la literatura, la recolección de residuos se divide en tres categorías: recolección de residuos residenciales, comerciales y contenedores (Benjamin & Beasley, 2013) que pueden ser formulados mediante problemas de enrutamiento de nodos (NRP, Node Routing Problems) y problemas de enrutamiento de arcos (ARP, Arc Routing Problems).

Los problemas de recolección de residuos residenciales son frecuentemente formulados como ARP, en los que los vehículos recolectores recorren completamente las calles y no se necesita la ubicación exacta de cada punto de recolección en la calle. Por otro lado, los problemas de recolección comercial y de omisión se formulan típicamente como NRPs. Dado que considerar cada punto de recolección por separado proporciona un modelo más detallado en los cálculos, se ha adoptado este enfoque en este TFM.

En la figura 10 se puede observar estas dos clasificaciones en los problemas VRP, los dos tipos de problemas de enrutamiento, así como sus objetivos, componentes principales, soluciones y tipos de problemas encontrados.

Types	Node Routing Problems	Arc Routing Problems
Objectives	distribution/collection of goods (point to point)	distribution/collection of goods or materials along the arcs (edges) of a road network
Main components	<ul style="list-style-type: none"> • Vehicles • Depots • Drivers • Road Network 	<ul style="list-style-type: none"> • Vehicles • Depots • Drivers • Road Network
Solutions	<p>A set of routes performed by a fleet of vehicles such that:</p> <ul style="list-style-type: none"> • each route starts and ends at vehicles' depots • the customers' requirements are satisfied • the operational constraints are fulfilled • the global transportation cost is minimized 	<p>A set of routes performed a fleet of vehicles such that:</p> <ul style="list-style-type: none"> • each route starts and ends at vehicles' depots • the requests for service associated with arcs or edges are satisfied • the operational constraints are fulfilled • the global transportation cost is minimized
Types	<ul style="list-style-type: none"> • Traveling Salesman Problem (TSP) • Traveling Salesman Problem with Backhauls (TSPB) • Traveling Salesman Problem with Time Windows (TSPTW) • Multiple Traveling Salesman Problem (MTSP) • Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) • Distance Constrained Vehicle Routing Problem (DCVRP) • Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB) • Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) • Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (VRPPD) 	<p>All arcs (edges) must be served:</p> <ul style="list-style-type: none"> • the Chinese Postman Problem (CPP) <p>Only a subset of arcs (edges) must be served:</p> <ul style="list-style-type: none"> • the Rural Chinese Postman Problem (RCPP) • the Windy Chinese Postman Problem • the Stacker Crane Problem

Figura 11. Clasificación y comparación de los problemas de enrutamiento de nodos y arcos (Hui & Ponce, 2015)

Se analiza a continuación todas las tipologías de problemas de enrutamiento de nodos encontradas y se indica el modelo seguido en este trabajo para el diseño de la metodología.

La recogida de residuos domiciliarios en una ciudad ha sido estudiada por muchos científicos, según (Golden, Assad, & Wasil, 2002) la recolección residencial implica la recolección de residuos domésticos a lo largo de

una red de calles. Por este motivo, se resuelve como un problema de enrutamiento de arcos.

(Kim, Kim, & Sahoo, 2006) definieron la recolección de residuos residenciales de la siguiente manera:

La recolección de residuos residenciales generalmente implica el servicio a domicilios particulares. El número de hogares a los que puede prestar servicio una ruta residencial varía ampliamente, desde 150 a 1.300 hogares por día. La frecuencia del servicio por semana variará en función del clima, la geografía, la competencia y el precio del servicio.

Los documentos más relevantes para la recogida de residuos domésticos se incluyen en la siguiente Figura.

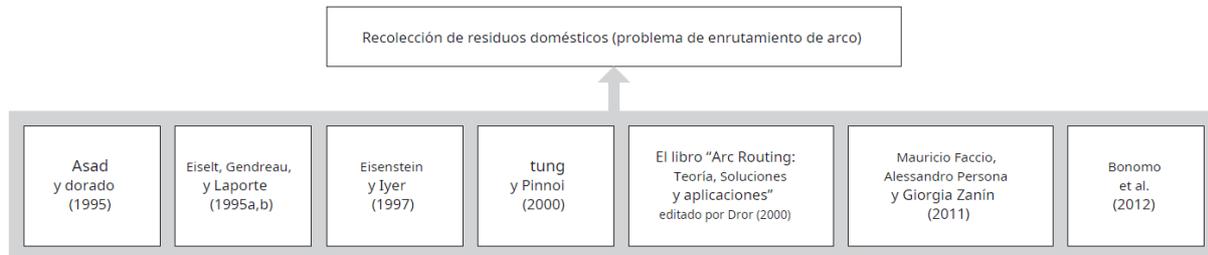


Figura 12. Documentos relevantes para la recolección de residuos domésticos
(problema de enrutamiento de arco)

Los residuos domésticos se depositan frente a las viviendas en bolsas de basura o pequeños contenedores. Los vehículos de recogida recogerán todos los residuos domésticos a lo largo de las calles que tengan.

Por lo tanto, los investigadores suelen resolver este problema como un problema de enrutamiento de arco donde no se necesita la ubicación exacta de cada cliente. Naturalmente, la recolección de residuos domésticos se describe como un problema de enrutamiento de arco (ARP), ya que normalmente los residuos deben recolectarse de todas las casas de una calle.

(Assad y Golden, 1995) revisaron la metodología básica sobre el enrutamiento de arco genérico y describieron áreas de aplicación del enrutamiento de arco, como servicios de saneamiento y operaciones de entrega postal. Estas áreas de problemas de aplicación resueltos por técnicas de enrutamiento de arco se proporcionan en este libro. En el mismo año, (Eiselt H, Gendreau M, Laporte G. et al. 1994 & 1995) se escribieron dos artículos (parte I y parte II) para revisar los métodos algorítmicos que se utilizan para resolver el problema de aplicación del enrutamiento de arco: el problema del cartero. En la primera mitad de la parte II del artículo sobre el problema del enrutamiento de arco, se describen los resultados algorítmicos para el problema del cartero chino (CPP); en la segunda mitad, se considera el problema del cartero rural y se establecen sus contenidos relevantes. (Eisenstein e Iyer 1997) utilizan un proceso de decisión de Markov para proporcionar un algoritmo de programación dinámica.

Tomando los camiones de basura en Chicago como ejemplo, Eisenstein e Iyer proporcionan el modelo de rutas flexibles para mejorar el cronograma de los camiones, y se reduce la capacidad del 12%-16% para un conjunto de cinco salas piloto. En 2000, en el libro denominado "Arc Routing: Theory, Solutions and Applications", editado por Dror y se incluye un exhaustivo estado del arte de los problemas de enrutamiento de arco, y se presenta una serie de aplicaciones relevantes para la teoría de enrutamiento de arco para problemas de la vida real. Tung y Pinnoi (2000) toman los distritos urbanos de Hanoi en Vietnam como ejemplo, y modifican la heurística de inserción secuencial de Solomon combinando la fase de Or-opt y 2-opt juntas para construir un procedimiento de ruta heurística. Tung y Pinnoi resuelven un problema de enrutamiento y programación de vehículos del mundo real restringido por múltiples ventanas de tiempo y tiempos mínimos entre llegadas para cada sitio, así como la capacidad limitada de vehículos y horas de funcionamiento con una mejora tanto en el costo total como en el número de vehículos utilizados. (Faccio et al. en 2011) presentan un modelo innovador de enrutamiento de vehículos con una aplicación en una ciudad italiana de aproximadamente 100.000 habitantes. Los resultados muestran que el modelo aporta una mejora económica y factible en términos de alimentos perecederos, integrando la trazabilidad en tiempo real presentada.

Datos de capacidad con las condiciones físicas de los elementos transportados. En 2012, Bonomo propusieron un método que utiliza técnicas de investigación de operaciones para optimizar las rutas de los vehículos de

recolección de residuos que dan servicio a los contenedores. También analizaron el ejemplo de una recolección de residuos domiciliarios en Buenos Aires. La aplicación del método propuesto por Bonomo permite ahorrar más de US\$200.000 por año con menos impactos negativos para Buenos Aires.

De la misma manera que hay estudios de la recogida de residuos domiciliarios se ha estudiado en profundidad la recogida de residuos comerciales. Según Golden (Golden, Assad, & Wasil, 2002), la recolección de residuos comerciales implica la recolección de desechos comerciales de grandes contenedores en ubicaciones comerciales. Estos se consideran problemas de enrutamiento de nodos.

Kim definieron la recolección de residuos comerciales de la siguiente manera (Kim, Kim, & Sahoo, 2006):

La recolección de residuos comerciales implica el servicio a clientes como centros comerciales, restaurantes y pequeños edificios de oficinas. Cada ruta comercial de WM (Waste Management) puede dar servicio a entre 60 y 400 clientes, con dos o tres viajes de eliminación a vertederos cada día. Dependiendo de la base de clientes, el mismo conductor puede visitar al mismo cliente varias veces en una semana. El programa de servicio semanal es bastante estático, ya que la mayoría de los clientes no cambian la frecuencia del servicio con frecuencia.

La Figura siguiente incluye los documentos más relevantes para la recogida de residuos comerciales.

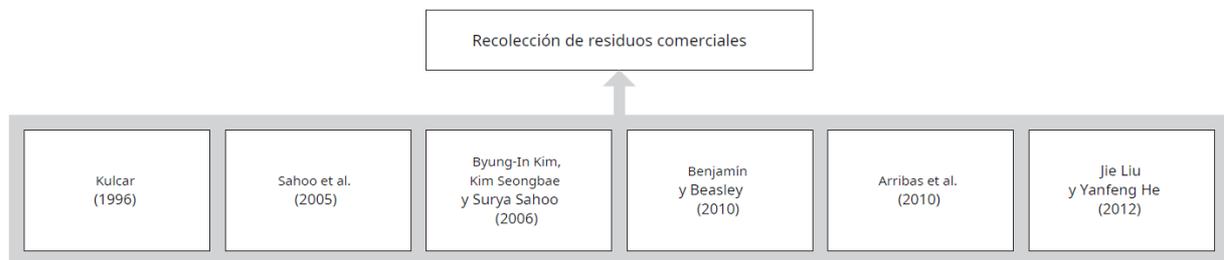


Figura 13. Documentos relevantes para la recolección de residuos comerciales.

En 1996, algunos investigadores comenzaron a investigar el problema de las rutas de los vehículos de recolección de residuos comerciales. Kulcar (1996) utilizó un método de investigación de operaciones con ingeniería de sistemas para estudiar un conjunto de puntos para las rutas de recolección en lugar de los arcos que forman las calles. Sahoo et al. (2005) propusieron un método heurístico utilizando métodos de agrupamiento y un sistema de información geográfica (GIS). Su método propuesto se aplicó a una empresa de recolección de residuos real, que es el proveedor líder de servicios integrales de gestión de residuos en América del Norte, y ha dado como resultado costos operativos significativamente reducidos (ahorrando \$18 millones desde marzo de 2003 hasta fines de 2003).

Kim et al. (2006) extendieron el algoritmo de inserción de Solomon (Solomon, 1987) para desarrollar un algoritmo de construcción de rutas, que se enfoca principalmente en el sector comercial.

Los problemas de ruteo de vehículos de recolección de residuos con ventanas de tiempo (VRPTW) asumiendo múltiples viajes de eliminación y pausas para el almuerzo de los conductores. Los algoritmos propuestos han resuelto con éxito los problemas de recolección de residuos de la vida real en Waste Management, Inc.

Benjamin y Beasley (2010) presentaron enfoques metaheurísticos que brindan mejores soluciones que los estudios anteriores, con el fin de resolver el problema de recolección de residuos que involucra múltiples instalaciones de eliminación. Arribas et al. (2010) utilizan programación entera y optimización en un entorno SIG para diseñar un sistema de recolección de residuos sólidos urbanos. También se incluye un estudio de caso sobre la Municipalidad de Santiago en Chile. En 2012, Liu y He (2012) se centran principalmente en el problema de recolección diaria de residuos comerciales y proponen un enfoque de sistema de colonias de hormigas múltiples basado en agrupamiento para abordar los problemas de ruteo de vehículos de recolección de residuos con ventanas de tiempo e instalaciones intermedias (WCVRPTW-IF).

3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En este capítulo se detallarán los dos modelos de programación lineal desarrollados para la optimización del problema de recogida de residuos orgánicos urbanos. Ambos tienen una base científica procedente del estado del arte y en cada modelo se hace referencia al tipo de problema encontrado en la comunidad científica.

3.2 Modelo de programación lineal para la localización de contenedores de residuos orgánicos en zonas residenciales urbanas

3.2.1 Problemas multiobjetivo

Hoy en día existen muchos problemas que tienen multitud de criterios a tener en cuenta, los cuales pueden llegar a entrar en conflicto unos con otros. Estos problemas son reconocidos como problemas multiobjetivo, es decir, no poseen un único criterio medible por el cual pueda declararse que una solución sea completamente satisfactoria. Es posible que algunos criterios entren en conflictos unos con otros y hacen que no sea posible obtener una solución que los optimice a todos al mismo tiempo. Es por ello que la solución ha de seguir la línea de pensamiento del decisor.

En este capítulo se introducen los aspectos más relevantes de los problemas multiobjetivo. Para una revisión más detallada sobre el tema y sobre las diferentes técnicas de resolución de este tipo de problemas, se propone la lectura del artículo de Marler y Arora (2004). (Marler & Arora, 2004)

3.2.1.1 Definición

Los problemas de optimización multiobjetivo (POM) pueden formularse de la siguiente manera:

$$POM = \left\{ \begin{array}{l} \min F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ \text{s. a. } x \in X \end{array} \right\} \quad (3.2.1.-0)$$

Donde:

- $n \geq 2$ es el número de funciones objetivo.
- $X = (x_1, x_2, \dots, x_r)$ es el vector de variables de decisión.
- X es el espacio de soluciones factibles. X es definido habitualmente como el conjunto de restricciones $\{x | g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \text{ y } h_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, e\}$.
- $F(x)$ es el vector objetivo.
- $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, con $y_i = f_i(x)$, es el valor de una solución en el espacio de soluciones factibles.

3.2.1.2 Optimalidad de Pareto

Sin ningún tipo de información sobre las preferencias del decisor y con igualdad de importancia en los objetivos, no se puede decir que una solución es mejor que otra si no la domina. La solución a un problema de optimización multiobjetivo (POM) es el conjunto de soluciones no dominadas llamadas conjunto de Pareto, que cumplen la propiedad de Optimalidad de Pareto (Pareto, 1906):

Definición: Un punto, $x^* \in X$ es óptimo de Pareto si no existe otro punto, $x \in X$, tal que $F(x) \leq F(x^*)$, y $F_i(x) < F_i(x^*)$ al menos en una función.

Esta definición dice que x^* es un óptimo de Pareto si no existe ningún vector factible $x \in X$, que decremente algún criterio sin causar un incremento simultáneo en al menos otro criterio.

3.2.2 Formulación del modelo

El problema multiobjetivo planteado es el siguiente:

Sea un grafo G formado por vértices (V) y arcos (A) ($G(V,A)$) que representa la red del problema. El conjunto $V = S \cup C$, donde $S = (1, \dots, N_s)$ es el conjunto de puntos de recogida y $C = (1, \dots, N_c)$ el conjunto de clientes que generan desperdicios. Por otra parte el conjunto $A = S \times C$ es el conjunto de arcos que representan el flujo de desperdicio desde los clientes a los puntos de recogida.

Tal y como se ha podido ver en el estado del arte, pero adaptándolo al problema planteado esto es un SCLP ya que los ciudadanos y grandes productores pueden utilizar contenedores potenciales dependiendo de las distancias entre los usuarios y contenedores. La demanda/solicitud de un usuario solo puede satisfacerse en un contenedor siempre que la distancia entre el usuario y contenedor sea igual o menor que un valor predefinido conocido como distancia máxima permitida. Además, en este problema los grandes productores (clientes), serán representados como puntos de recolección.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado en el apartado anterior a continuación se desarrolla la formulación del modelo de programación lineal.

Tabla 2. Definición de las variables, vectores, matrices e índices

Referencia	Descripción
i	Índice del conjunto Clientes
j	Índice de localizaciones de recogida
D_i	Demanda del cliente i
w	Capacidad máxima de llenado de un contenedor
n_j	Número máximo de contenedores en la localización j
d_{ij}	Distancias entre el cliente i y la localización j
π	Distancia máxima permitida entre los Cliente y su localización
N_{Cont}	Número de contenedores máximos a instalar en la campaña
x_j	Variable binaria que indica la activación de una localización de contenedores
z_j	Variable entera que indica el número de contenedores colocados en cada ubicación j
β_{ij}	Variable binaria que indica la asociación entre un cliente (i) a una ubicación (j)

El problema a resolver es un problema multiobjetivo en el que se pretende la minimización simultánea del número de localizaciones activas y la minimización de la distancia media recorrida por los clientes a los puntos de recolección asociados. Como se observa, son objetivos contrapuestos ya que el aumento de uno de ellos provoca la disminución del otro y viceversa.

La función multiobjetivo del problema se representa en la ecuación 3.1.2-0 donde $F_1(X)$ y $F_2(X)$ representan respectivamente la minimización del número de localizaciones activas (Ecuación 3.1.2-1) y la minimización de la distancia media recorrida por los clientes a las localizaciones asociadas. (ecuación 3.1.2-2).

La función objetivo del modelo, minimiza el número de localizaciones activas.

$$MIN = \{F_1(X), F_2(X)\} \quad (3.1.2.-0)$$

$$F_1(X) = \sum_{j=1}^{N_s} X_j \quad (3.1.2.-1)$$

$$F_2(X) = \sum_{i=1}^{Nc} \sum_{j=1}^{Ns} \left(\frac{d_{ij} \cdot \beta_{ij}}{Nc} \right) \quad (3.1.2.-2)$$

Las restricciones del modelo son las siguientes:

- Restricción 1: Cada cliente solo puede ser asignado a una ubicación de contenedores. (Ecuación 3.1.2.-3).

$$\sum_{j=1}^{Ns} \beta_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, Nc \quad (3.1.2.-3)$$

- Restricción 2: El número total de contenedores asignados en cada ubicación no puede exceder el máximo número de contenedores totales establecido. (Ecuación 3.1.2.-4)

$$\sum_{i=1}^{56} Z_j = 40 \quad (3.1.2.-4)$$

- Restricción 3: Evita que se asigne demanda a una localización que no se haya instalado contenedores. Además, obliga a la implantación de un número de contenedores necesarios para satisfacer la demanda en cada punto de recolección.

$$\sum_{i=1}^{Nc} D_i \cdot \beta_{ij} \leq w \cdot Z_j \quad \forall j = 1, \dots, Ns \quad (3.1.2.-5)$$

- Restricción 4: Restringe que se implanten más contenedores a una ubicación que los máximos permitidos. Además, si una localización no es activada, no se instalarán contenedores.

$$Z_j \leq n_j \cdot X_j \quad \forall j = 1, \dots, Ns \quad (3.1.2.-6)$$

- Restricción 5: Garantiza que la distancia entre los clientes y las ubicaciones asignadas, no exceden de la distancia máxima permitida.

$$\sum_{j=1}^{Ns} \beta_{ij} \cdot d_{ij} \leq \pi \quad \forall i = 1, \dots, Nc \quad (3.1.2.-7)$$

- Restricción 6: Esta restricción hace que no pueda asignarse un productor a una ubicación de contenedores si esta no tiene contenedores al no estar asignada a ningún productor.

$$\sum_{i=1}^{Nc} \beta_{ij} \leq X_j \cdot Nc \quad \forall j = 1, \dots, Ns \quad (3.1.2.-8)$$

3.2.3 Resolución del problema multiobjetivo mediante el método ϵ -constraint

La idea del método ϵ -constraint es la de minimizar una función objetivo, considerando a los demás objetivos (1,...,NObj) como restricciones que deben satisfacerse dentro de unos ciertos niveles. La variación de dichos niveles hará que podamos obtener soluciones no dominadas a nuestro problema, pudiendo definir el Frente de Pareto. La aplicación del Método ϵ -constraint viene representada en la ecuación 3.2.3.-0.

$$\begin{aligned} MIN &= \{F_1(X)\} \\ F_l(X) &\leq \epsilon_l \quad l = 1, 2, \dots, NObj \end{aligned} \quad (3.2.3.-0)$$

3.3 Modelo de programación lineal para el diseño de rutas de vehículos para la recogida de residuos orgánicos

3.3.1 Formulación del modelo

Se ha de diseñar un modelo de programación lineal que diseñe las rutas a realizar minimizando los costes de combustible totales.

Una vez se hayan decidido las localizaciones para la instalación de contenedores. La siguiente fase del problema consiste en el diseño de las rutas de recogida de residuos de la fracción orgánica, que partiendo de un depósito o garaje recorrerán los puntos de recolección (contenedores), llevarán el material a una planta de tratamiento de compost y volverán al depósito. Por tanto, se dispondrá de un grafo $G=(V,A)$ formado por un número de localizaciones de contenedores (Num_loc), cada una con una carga de residuos D_j , el depósito (nodo 0) y la planta de tratamiento (nodo $N+1$). Para la recogida de residuos, se disponen de 1 vehículo este con capacidad V y un consumo de combustible CC (litros/Km). Se conoce el coste del combustible (p) y la matriz de distancias (d_{ij}) del problema.

En el resto de apartados de este capítulo se expondrán todos los cálculos y justificaciones necesarias para definir los dos modelos planeados en la introducción.

3.3.1.1 Problema y datos necesarios para su diseño.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado en los apartados anteriores a continuación se desarrolla el modelo de programación lineal.

Tabla 3. Definición de las variables, vectores, matrices e índices.

Símbolo	Descripción
i, j	Índice de localizaciones
P_j	Demanda de residuos orgánicos a recoger en la localización j
V	Capacidad máxima de carga del vehículo
d_{ij}	Matriz de distancias entre los vértices del grafo (ubicaciones activas, planta y parque de maquinaria)
d_{med}	Densidad media de la producción diaria de residuos
C_{med}	Consumo medio de combustible del vehículo en vacío
C_{carga}	Consumo de combustible del vehículo en función de la carga y la distancia recorrida
x_{ij}	Variable binaria que indica si el vehículo viaja del nodo i al j
f_{ij}	Variable que representa la Carga transportada por el vehículo, del nodo i al j

La función objetivo del modelo, minimiza el combustible consumido en función de la carga recogida en cada ubicación.

$$MIN \sum_{i=0}^{N+1} \sum_{j=0; i \neq j}^{N+1} (C_{med} \cdot d_{ij} \cdot x_{ij} + (f_{ij} \cdot d_{med} \cdot C_{carga} \cdot d_{ij})) \quad (3.3.1.1.-0)$$

Las restricciones de asignación que complementan el modelo son los siguientes:

- Restricción 1: El vehículo de recogida ha de salir a prestar el servicio.

$$\sum_{j=1}^{Num_loc} x_{0j} = 1 \quad (3.3.1.1.-1)$$

- Restricción 2: Si un vehículo sale del parque de maquinaria, tras llegar a la planta ha de volver al parque de maquinaria.

$$\sum_{j=1}^{Num_loc} x_{0j} = \sum_{j=1}^{Num_loc} x_{j,N+1} = x_{N+1,0} \quad (3.3.1.1.-2)$$

- Restricción 3: Cada contenedor se visita exactamente una vez cada vez que el vehículo de recogida realice la ruta.

$$\sum_{i=0; i \neq j}^{Num_loc} x_{ij} = 1 \quad \forall j = 1..Num_loc \quad (3.3.1.1.-3)$$

- Restricción 4: Cada vez que la ruta llegue a una ubicación de contenedores, esta ha de ser el origen hasta llegar a la siguiente ubicación de contenedores, denominándose conservación de flujo.

$$\sum_{i=0; i \neq j}^{Num_loc} x_{ij} = \sum_{i=1; i \neq j}^{N+1} x_{jik} \quad \forall j = 1..Num_loc \quad (3.3.1.1.-4)$$

- Restricción 5: Esto permite que no se exceda la carga máxima del vehículo en ningún momento de la ruta.

$$\sum_{i=0}^{Num_loc} \sum_{j=1; j \neq i}^{Num_loc} P_j \cdot x_{ij} \leq V \quad (3.3.1.1.-5)$$

- Restricción 6: Estas son las relaciones entre variables del problema donde la carga transportada no excederá la máxima permitida por el vehículo. Además, si el vehículo no recorre un arco (i,j), el valor de la carga transportada por el vehículo en dicho arco será nula y viceversa.

$$f_{ij} \leq x_{ij} \cdot V_k \quad i = 0..Num_loc ; j = 1..Num_loc \quad (3.3.1.1.-6)$$

$$P_i \cdot x_{ij} \leq f_{ij} \quad i = 1..Num_loc ; j = 1..Num_loc \quad (3.3.1.1.-7)$$

- Restricción 7: Balance de carga en cada localización de contenedores. La carga que transporta el vehículo en un arco (i,j) más la demanda del nodo de destino j es igual a la carga con la que el vehículo partirá desde ese nodo hacia otro destino..

$$\sum_{i=0; i \neq j}^{Num_loc} f_{ij} + P_j = \sum_{i=1; i \neq j}^{N+1} f_{ji} \quad \forall j = 1..Num_loc \quad (3.3.1.1.-8)$$

- Restricción 8: El vehículo sale descargado del parque de maquinaria en el momento que inicia la ruta.

$$\sum_{j=1}^{Num_loc} f_{0j} = 0 \quad (3.3.1.1.-9)$$

4 CASO REAL DE ESTUDIO

En primer lugar, se estudiarán las variables que afectan a la realización de los servicios, de cuyo estudio se obtienen los datos necesarios con los que se podrá calcular, de manera justificada, el número y tipo de equipos necesarios para realizar el servicio de recogida y transporte de residuos de la fracción orgánica de la forma más eficiente posible mediante un modelo de programación lineal que optimiza el diseño de las rutas de recogida.

Es decir, se aporta el estudio, justificación y diseño de manera detallada de la propuesta para llevar a cabo dicho modelo.

4.1 Introducción

La metodología propuesta en este TFM consiste en la resolución de dos problemas diferenciados mediante técnicas de programación lineal. El primer modelo de programación lineal resuelve un problema multiobjetivo con la finalidad de obtener la localización de contenedores de residuos orgánicos en zonas residenciales urbanas. A continuación, una vez ubicados los contenedores, un segundo modelo de programación lineal diseñará las rutas de vehículos para la recogida de residuos orgánicos.

En este capítulo se va a utilizar la herramienta *Optimisation Modelling Software for linear Programming* LINGO para resolver ambos modelos con el posterior análisis de todos los resultados obtenidos.

4.2 Resolución del problema multiobjetivo de localización de contenedores

4.2.1 Datos del problema.

En los subapartados siguientes se desarrollan todos los datos necesarios que requiere el modelo de programación lineal para la localización de contenedores de residuos orgánicos en zonas residenciales urbanas de la ciudad de Huelva.

Los siguientes subapartados son los siguientes:

- Análisis de la población: Dado que la producción de residuos está directamente ligada al número de personas, industrias, comercios y muchos otros factores que se sitúan en una zona.
- Distritos seleccionados y su producción diaria: Donde se analizan en profundidad los distritos estudiados (Ubicación y Producción diaria).
- Grandes Productores y su producción diaria: Donde se analizan en profundidad los grandes productores (Ubicación y Producción diaria).
- Contenerización (Cantidad de contenedores totales por ubicación y su capacidad).

4.2.1.1 Análisis de la población

La generación de residuos, como parte fundamental para establecer la carga de trabajo de diseño para el servicio de recogida, se encuentra directamente relacionada con el número de habitantes presentes en el municipio de la ciudad elegida, en este caso Huelva capital, así como con el nivel de actividad, turístico, comercial e industrial del mismo.

A continuación, se analiza la evolución de la población del municipio en los últimos años, para lo cual, se ha recurrido a los datos de población publicados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) (Tabla 4). La evolución de la población en los últimos años, por núcleo urbano y la totalidad del municipio, es necesaria para analizar la producción de residuos a lo largo del tiempo.



Figura 14. Evolución de la población en la ciudad de Huelva.

La figura 14 muestra como la población de la ciudad de Huelva está en regresión continuada durante los últimos 10 años, donde cada año hay un menor número de habitantes en el municipio a excepción del 2020 y 2023 pero sin llegar a frenar esta tendencia.

Tabla 4 Evolución de la población desde 2000 hasta 2023 (Instituto Nacional de Estadística, 2023)

Evolución de la población desde 2000 hasta 2023			
Año	Hombres	Mujeres	Población
2023	68.375	74.157	142.532
2022	68.050	73.804	141.854
2021	68.393	74.145	142.538
2020	69.043	74.794	143.837
2019	69.003	74.660	143.663
2018	69.336	74.922	144.258
2017	69.800	75.315	145.115
2016	69.868	75.600	145.468
2015	70.283	76.035	146.318
2014	70.740	76.472	147.212
2013	71.413	76.688	148.101
2012	71.652	76.916	148.568
2011	72.032	76.886	148.918
2010	72.236	77.074	149.310
2009	71.983	76.823	148.806
2008	71.789	76.238	148.027
2007	70.843	75.330	146.173
2006	70.688	75.075	145.763
2005	70.442	74.708	145.150
2004	69.884	74.485	144.369
2003	70.126	74.705	144.831
2002	68.042	72.820	140.862
2001	68.222	73.112	141.334
2000	68.076	72.907	140.983

4.2.1.2 Distritos seleccionados y estimación de su producción diaria

La cantidad de residuos generados en un municipio es directamente proporcional al número de habitantes que residan. Dado que la implantación de esta fracción se centrará en los núcleos de población más habitados, en la figura 15 se muestra un mapa de la densidad de población de la ciudad de Huelva donde pueden verse diferentes zonas desde que las que viven alrededor de 16 habitantes por cada 1.000 m² a más de 49 habitantes por cada 1.000 m².

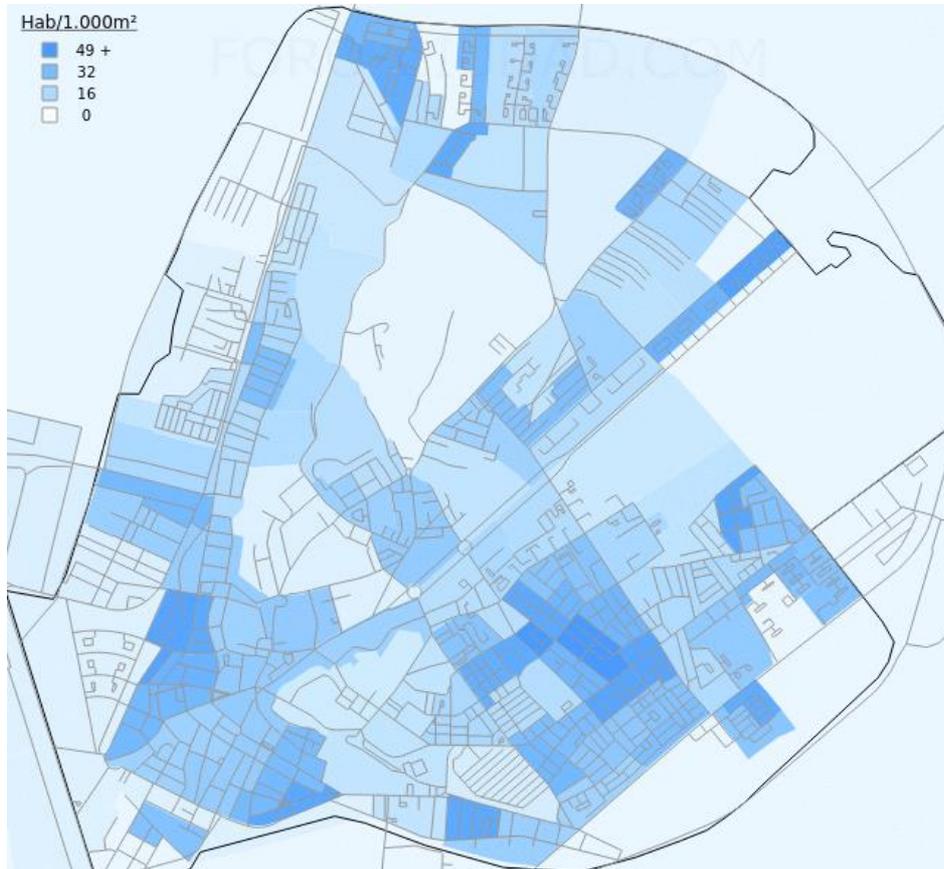


Figura 15. Densidad de población por m². (Instituto Nacional de Estadística, 2023)

Esta información es esencial para el inicio del estudio, debido a que se pretende dar servicio a todas las zonas más habitadas, es por ello que se ha de realizar una preselección de estas zonas teniendo en cuenta lo siguiente:

- Posibilidad realizarse un servicio de recogida abarcando las zonas más habitadas.
- Las ubicaciones de contenedores propuestas han de tener el mismo tipo de contenedor para que no haya camiones de diferentes tipologías en una primera implantación.
- Que se abarque la ciudad completa para que la ciudadanía pueda ir tomando consciencia de esta separación de residuos.
- No podrán tomarse en cuenta para esta primera etapa zonas cerradas al tránsito de vehículos donde no se permita la circulación de los vehículos de recogida.

Una vez todos estos factores han sido tomados en cuenta, se seleccionan 41 distritos de la ciudad con una densidad de población media de 49 habitantes por cada 1.000 m².

En la figura 16 se muestran los distritos seleccionados, los cuales cumplen con los criterios anteriormente mencionados.



Figura 16. Distritos seleccionados para la implantación.

Tal y como se ha desarrollado en la introducción, la materia orgánica procede de la fracción resto, conocida como contenedor gris. A continuación, se van a exponer los datos facilitados por una empresa líder en el sector del último estudio realizado en la ciudad de Huelva donde hace unos años prestaba servicio.

Tabla 5. Producción diaria de residuos de la fracción Resto.

Producción diaria de la Fracción Resto	
Habitantes de la ciudad de Huelva	142.532
Producción Media (Kg / Hab y Día)	1,05
Producción Diaria Estimada (Kg)	149.659

El dato de producción media en Kilogramos generados por habitante y por día es relativamente bajo en comparación con datos que puedan aparecer en otras fuentes, pero hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Los datos facilitados son datos empíricos de más de 10 años de experiencia en el municipio como contratista.
- La producción media por habitante, no tiene en cuenta los grandes productores, lo que permite poder realizar una recogida selectiva mucho más personalizada.

A nivel nacional una vez se ha obtenido la producción de resto, se calcula entorno a un 20% en función de la caracterización y tipología de la ciudad para la obtención de los datos de producción media de la fracción orgánica. Es difícilmente calculable un dato preciso de la producción de este residuo debido a que dependerá de muchos factores como la concienciación de la ciudadanía, la cultura de la zona, la cantidad de turismo, su temporalidad, el porcentaje de impurezas etc.

Este residuo, bien separado por los ciudadanos, no debe de contener impropios al ser fácilmente reciclable, por lo que se considerará el dato base de la caracterización de la introducción, donde se establece que un 24,04% de los residuos de la fracción resto son de materia orgánica aprovechable cuyo origen es doméstico. Los impropios se les denomina a todos aquellos residuos que no son materia orgánica, pero que han sido igualmente depositados en el contenedor.

El objetivo de este apartado es elaborar la tabla 6, en la que se incluyen las coordenadas de cada uno de los distritos ya que estas serán localizaciones de referencia para futuros cálculos.

Tabla 6. Tabla de datos de producción diaria por distrito.

Distrito	Latitud	Longitud	Área (m²)	Habitantes	Prod. (Kg)	Prod. (m³)
Distrito 1	37,2830006	-6,9446015	16.160	792	110,3	0,4
Distrito 2	37,2827554	-6,9455712	9.923	486	67,8	0,2
Distrito 3	37,2827364	-6,9438971	7.850	385	53,6	0,2
Distrito 4	37,2814032	-6,9436831	23.967	1.174	163,6	0,6
Distrito 5	37,2814118	-6,9405759	17.140	840	117,0	0,4
Distrito 6	37,2827008	-6,9401559	13.344	654	91,1	0,3
Distrito 7	37,2748049	-6,9269064	27.272	1.336	186,2	0,6
Distrito 8	37,272871	-6,9295555	19.580	959	133,7	0,5
Distrito 9	37,2711418	-6,9319688	22.182	1.087	151,4	0,5
Distrito 10	37,2693459	-6,934424	24.329	1.192	166,1	0,6
Distrito 11	37,2679362	-6,9364188	11.442	561	78,1	0,3
Distrito 12	37,2691796	-6,9361664	16.214	794	110,7	0,4
Distrito 13	37,2702868	-6,9359041	23.631	1.158	161,3	0,6
Distrito 14	37,2658223	-6,9273936	41.824	2.049	285,6	1,0
Distrito 15	37,2645002	-6,9265274	29.637	1.452	202,4	0,7
Distrito 16	37,2575326	-6,9272728	44.606	2.186	304,6	1,1
Distrito 17	37,2591379	-6,932225	23.859	1.169	162,9	0,6
Distrito 18	37,2598019	-6,9340265	19.022	932	129,9	0,4
Distrito 19	37,2602183	-6,9323777	8.572	420	58,5	0,2
Distrito 20	37,2609797	-6,9330191	16.831	825	114,9	0,4
Distrito 21	37,2615959	-6,9341606	14.989	734	102,3	0,4
Distrito 22	37,2606436	-6,9351324	17.326	849	118,3	0,4
Distrito 23	37,2616287	-6,9360554	24.981	1.224	170,6	0,6
Distrito 24	37,2624225	-6,9371237	33.542	1.644	229,0	0,8
Distrito 25	37,26388	-6,9422119	32.530	1.594	222,1	0,8
Distrito 26	37,265454	-6,9429012	33.463	1.640	228,5	0,8
Distrito 27	37,2638524	-6,9440479	8.703	426	59,4	0,2
Distrito 28	37,2695942	-6,9502731	29.613	1.451	202,2	0,7
Distrito 29	37,2714752	-6,9496044	32.096	1.573	219,1	0,8
Distrito 30	37,2662665	-6,953885	17.754	870	121,2	0,4
Distrito 31	37,266634	-6,9558992	24.930	1.222	170,2	0,6
Distrito 32	37,25359	-6,9404708	39.820	1.951	271,9	0,9
Distrito 33	37,2547102	-6,9479189	19.490	955	133,1	0,5
Distrito 34	37,2540886	-6,9503665	30.968	1.517	211,4	0,7
Distrito 35	37,2535444	-6,953357	26.065	1.277	178,0	0,6
Distrito 36	37,2541313	-6,9546478	11.363	557	77,6	0,3
Distrito 37	37,2570146	-6,9558838	25.036	1.227	170,9	0,6
Distrito 38	37,2582514	-6,9543753	33.588	1.646	229,3	0,8
Distrito 39	37,2590954	-6,9532937	14.554	713	99,4	0,3
Distrito 40	37,2594775	-6,9546898	12.158	596	83,0	0,3
Distrito 41	37,26119	-6,953975	33.232	1.628	226,9	0,8
TOTALES			933.588	45.745,8	6.374,2	22,0

Cabe destacar que los datos origen son de la provincia de Extremadura y se han de adaptar a la tipología de la ciudad de Huelva. Para ello hay que incorporar un porcentaje de ponderación de reducción o ampliación en

función de cada caso. Para la ciudad de Huelva, debido a las caracterizaciones de la fracción resto en la zona, se considera un incremento de un 6% de la materia orgánica sobre el porcentaje ya calculado debido a los siguientes factores:

- Alta temporalidad debido su situación cerca de la playa.
- Industria alimenticia por sus productos frescos del mar.

El número total de habitantes de la ciudad de Huelva, la producción media diaria de este residuo por habitante y día y la total estimada en kilogramos son mostradas en la tabla 7.

Tabla 7. Producción diaria estimada final de residuos de la fracción orgánica.

Situación Resultante Fracción Orgánica en la ciudad	
Habitantes	142.532
Producción Media (Kg / Hab y Día)	0,27
Producción Diaria Estimada (Kg)	19.860

Las empresas del sector han realizado un estudio donde estiman que, durante el primer año, cerca del 48% de la población no recicla la materia orgánica, por lo que para garantizar un diseño óptimo del problema de recogida en la fase de la implantación se tendrá en cuenta para la estimación de la producción diaria de esta fracción. Esta última estimación se debe a la falta de concienciación ciudadana al no haberse implantado aun la recogida selectiva de la fracción orgánica, teniendo que realizarse fuertes inversiones en campañas de concienciación para que la totalidad de los ciudadanos reciclen esta fracción en el contenedor correspondiente.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, esta producción diaria corresponde con la totalidad del municipio, abarcando una dimensión territorial de 8.712.042,2 m², aunque para ser precisos, dado que los distritos se han dimensionado en zonas habitadas, se han seleccionado de dicha dimensión únicamente las zonas habitadas las cuales son 3.382.121 m². Dado que los distritos analizados en las zonas más pobladas corresponden con 933.587,9 m², que con una densidad de población de 49 habitantes por cada 1.000 m² se calcula que residen un total de 45.746 habitantes. Esto hace que la producción diaria de residuos generados en los distritos donde se va a implantar la recogida selectiva de esta fracción sea de **6.374,2 Kilogramos totales al día.** (Tabla 8)

Tabla 8. Producción diaria de residuos de la fracción orgánica en los distritos estudiados.

Fracción Orgánica generada en la zona de estudio durante la implantación	
Habitantes	45.746
Producción Media (Kg / Hab y Día)	0,14
Producción Diaria Estimada (Kg)	6.374,2

En la tabla 6 se muestran todos y cada uno de los datos anteriormente citados de manera desglosada por distrito, indicando el área que abarca cada uno, su número de habitantes y su producción diaria tanto en Kg como en m³. Las unidades de la producción en futuras ocasiones se tratarán en metros cúbicos. La densidad de la materia orgánica domestica tiene una densidad de **290 Kg/m³** y la capacidad de los contenedores se mide en metros cúbicos al igual que la capacidad del vehículo recolector, por lo que en función de la casuística que se trate se hablará en dichas unidades.

4.2.1.3 Grandes Productores y su producción diaria

En una ciudad, los residuos domésticos generados diariamente componen una gran parte de la totalidad, no obstante, tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, los datos proporcionados no tienen en cuenta los grandes productores. Es por ello que se ha realizado un análisis de todos los grandes productores de la ciudad donde se genera un alto porcentaje de la materia orgánica. Esto es una práctica habitual e incluso en algunas ciudades existen recogidas destinadas únicas y exclusivamente a los grandes productores, pero dependen de los municipios en los que se presta servicio, los pliegos de condiciones y las ofertas presentadas por los contratistas, aunque si el servicio es municipal dependerán estas decisiones directamente del ayuntamiento o empresa municipal.

En la siguiente tabla se pueden ver todas las zonas estudiadas y los grandes productores según su tipología tenidos en cuenta en cada zona al igual que con los distritos, se han incluido las coordenadas de cada uno de los grandes productores ya que estas serán localizaciones de referencia para futuros cálculos.

Tabla 9. Grandes Productores

Gran Productor Estudiado	Tipo	Latitud	Longitud
C.C Holea Huelva	Mixto	37,271819532	-6,919505026
C.C. Marismas del Polvorín	Supermercado	37,259526074	-6,924470012
Puerto - Lonja de Huelva	Mercado de Abastos	37,260897832	-6,962169212
Mercadona Av. Doratrices	Supermercado	37,264101396	-6,942841805
Mercadona Av. de Andalucía	Supermercado	37,271923876	-6,928758853
C.C. Aquelón	Mixto	37,261747903	-6,961137583
Z.C. Av. de Andalucía - Aldi	Zona de Restauración	37,266105291	-6,938719723
Zona de Restauración C. Pablo Rada	Zona de Restauración	37,259345569	-6,948739098
Z.C. Av. de las Fuerzas Armadas 1	Mixto	37,264814658	-6,923060489
Z.C. Av. de las Fuerzas Armadas 2	Zona de Restauración	37,266119179	-6,921084218
Z.C. Av. Alcalde Federico Molina Orta	Mixto	37,259403728	-6,932884398
Z.C. Av. de Cristóbal Colón	Mixto	37,270301725	-6,950726568
El Corte Inglés	Supermercado	37,255767283	-6,942561743
Hospital Univers. Juan Ramón Jiménez	Hospitales	37,279765842	-6,927266958
Hospital Costa de la Luz	Hospitales	37,267200964	-6,953765348

En la figura 17 se muestran su localización y sectorización.



Figura 17. Grandes Productores de Materia Orgánica de la Ciudad de Huelva

La complejidad que adquiere el problema de la recogida debido a los grandes productores reside en su dispersión, ya que tiene sentido que los supermercados y centros comerciales estén lejos unos de otros para que puedan dar servicio a todas las zonas de la ciudad, incrementando los kilómetros a recorrer por los vehículos de recogida.

Los residuos generados medios han sido proporcionados del departamento de estudios de una empresa líder en el sector, cuyos datos provienen de la experiencia de todos sus contratos a nivel nacional proporcionando los datos de producción de residuos para los grandes productores que aparecen mostrados en la tabla 10.

Tabla 10. Datos de Producción media por tipología de gran productor

Promedio Fracción Orgánica - G.P./Und.		Capacidad
Tipo	Kg	m ³
Supermercado	56	0,1
Mercado de Abastos	413	0,8
Zona de Restauración	69	0,1
Hospitales	441	0,8

Como se ha mencionado anteriormente la densidad de la fracción orgánica doméstica tiene una densidad de 290 Kg/m³, pero en este caso aumenta hasta los **540 Kg/m³**, esto se debe a que se genera mayor cantidad de residuos y al almacenarlos, estos al tener un alto contenido de agua pesan mucho y se van compactando a medida que se depositan en los cubos de basura. Al mismo tiempo la materia orgánica generada en un hogar es más variada; es decir; puede contener desde la piel de una manzana hasta el sobrante de un plato de lentejas, sin embargo, en un restaurante es posible que haya medio kilogramo de harina sobrante u otros productos que se desechen que hagan que la densidad del conjunto aumente.

Las empresas del sector han realizado un estudio donde estiman que, durante el primer año, cerca del 25% de las empresas no reciclan este residuo al seguir habiendo una gran presencia de materia orgánica en las caracterizaciones de la fracción resto, por lo que para garantizar un diseño óptimo del problema de recogida en la fase de la implantación se tendrá en cuenta para la estimación de la producción diaria de esta fracción. En la tabla 11 se muestra las tipologías de Grandes Productores y su producción diaria de la fracción orgánica.

Tabla 11. Producción diaria de la fracción orgánica en Grandes Productores.

Gran Productor	Tipo	Und.	Prod. (Kg)	Prod. (m ³)
C.C Holea Huelva – Carrefour y 10 Restaurantes	Mixto	11	558,9	1,0
C.C. Marismas del Polvorín – Mercadona, Día y Supeco	Supermercado	3	126,3	0,2
Puerto (Mercado de Bastastos) - Lonja de Huelva	Mercado	1	310,1	0,6
Mercadona Av. Doratrices	Supermercado	1	42,1	0,1
Mercadona Av. de Andalucía	Supermercado	1	42,1	0,1
C.C. Aquelón - Mercadona & 4 Restaurantes	Mixto	4	248,8	0,5
Z.C. Av. de Andalucía - Aldi	Restauración	1	42,1	0,1
Zona de Restauración C. Pablo Rada	Restauración	17	878,5	1,6
Z.C. Av. de las Fuerzas Armadas - Lidl & Burger King	Mixto	2	93,8	0,2
Z.C. Av. de las Fuerzas Armadas - Sup. Carmela	Restauración	1	42,1	0,1
Z.C. Av. Alcalde Federico Molina Orta	Mixto	6	300,5	0,6
Z.C. Av. de Cristóbal Colón	Mixto	7	342,6	0,6
El Corte Inglés	Supermercado	1	42,1	0,1
Hospital Universitario Juan Ramón Jiménez	Hospitales	1	330,7	0,6
Hospital Costa de la Luz	Hospitales	1	330,7	0,6
TOTALES			3.731,5	6,9

Los mixtos combinan supermercados con zonas de restauración y se definen como centros comerciales (C.C.) y zonas urbanas comerciales (Z.C.), los cuales se detallan en la tabla 12:

Tabla 12. Grandes Productores Mixtos

Gran Productor	Restauración	Supermercados
C.C Holea Huelva - Carrefour y 10 Restaurantes	10	1
C.C. Aquelón - Mercadona & 4 Restaurantes	4	1
Z.C. Av. de las Fuerzas Armadas - Lidl & Burger King	1	1
Z.C. Av. Alcalde Federico Molina Orta	5	1
Z.C. Av. de Cristóbal Colón	5	2

4.2.1.4 Contenerización

Este capítulo es una de las piezas fundamentales para obtener mejores resultados ya que, en función de la tipología de contenedor elegida se recogerá con un tipo específico de vehículo, se podrá realizar el servicio con mayor o menor personal y se adaptará mejor a las circunstancias actuales del municipio.

El estudio se basa en la ciudad de Huelva capital, en esta ciudad los contenedores de todas las fracciones son de la marca Contener Modelo C3200 F con 3.200 Litros de capacidad o 3,2 m³. La imagen de la figura 18 a sido tomada en la Avenida de Andalucía nº 30, de la ciudad de Huelva.



Figura 18. Ubicación actual de contenedores en la ciudad de Huelva.

Este modelo ha sido localizado en el catálogo del fabricante mostrándose en la figura 19.



Figura 19. Isla de Contenedores del modelo C3200 F

Este modelo es conocido como “Carga Lateral Asimétrico”, ya que los vehículos de recogida que se utilizan los cargan por el lateral y la apertura de su tapa es asimétrica, siendo la zona por la que se depositan los residuos mucho más pequeña que la zona por donde vierten al camión cuando son recogidos, esta última característica permite un vaciado más rápido y eficiente aunque tiene otros inconvenientes como un mayor desgaste de los elementos móviles de la tapa al ser más grande las zonas de apertura.

Analizando los artículos científicos (Adeleke & Olukanni, 2020) y (Ghiani, Laganà, Manni, & Triki, 2012) en ambos se trata de la importancia de las ubicaciones candidatas y en la realidad las empresas del sector en las implantaciones de la fracción orgánica no están creando nuevas ubicaciones de contenedores, sino que se está apostando incrementar el número de fracciones a recoger en ubicaciones ya establecidas. Es aquí donde reside la importancia del “SCLP”, considerando la distancia entre los ciudadanos y las islas de contenedores. Es por ello que los contenedores del estudio se ubicarán en las existentes islas de contenedores repartidas por toda la ciudad siendo todas ellas candidatas.

Dado que el contenedor seleccionado ha de cumplir con todo lo dicho anteriormente se propone la implantación del modelo C2200F de Contenur, mostrando en la figura 20 sus especificaciones.



Figura 20. Modelo C2200F de la Fracción Orgánica

Una vez el contenedor ha sido definido, se localizan todas las ubicaciones de contenedores ya existentes en la ciudad por donde pueda circular un vehículo de carga lateral de grandes dimensiones, teniendo capacidad suficiente y que puedan dar servicio a los distritos previamente dimensionados, teniendo al menos cada uno de ellos una ubicación de contenedores a una distancia factible para el ciudadano.

La siguiente figura muestra todas y cada una de las ubicaciones de contenedores existentes que pueden ser candidatas para incorporar los contenedores propuestos. Se han definido 40 ubicaciones en total, como pueden verse en la siguiente imagen de la figura 21.



Figura 21. Ubicación de todos los contenedores candidatos

Una vez todas las ubicaciones candidatas de contenedores han sido localizadas, se extrae su latitud y longitud para posteriormente poder realizar los cálculos de las distancias entre ellos, mostrándose dicha información en

la tabla 13:

Tabla 13. Tabla de Coordenadas de las ubicaciones de contenedores.

Nº	Nombre	Latitud	Longitud
1	Ubicación 1	37,2831239	-6,9448178
2	Ubicación 2	37,281482	-6,943796
3	Ubicación 3	37,2818387	-6,9401704
4	Ubicación 4	37,2790207	-6,9258687
5	Ubicación 5	37,2721653	-6,9195586
6	Ubicación 6	37,2743854	-6,9267125
7	Ubicación 7	37,2722404	-6,9297605
8	Ubicación 8	37,2706567	-6,9320251
9	Ubicación 9	37,2691846	-6,9339975
10	Ubicación 10	37,2699162	-6,935599
11	Ubicación 11	37,2673387	-6,9375035
12	Ubicación 12	37,2667581	-6,9206769
13	Ubicación 13	37,2649901	-6,9235373
14	Ubicación 14	37,2648171	-6,9263736
15	Ubicación 15	37,2654946	-6,9273038
16	Ubicación 16	37,2596642	-6,9237787
17	Ubicación 17	37,2571622	-6,9267009
18	Ubicación 18	37,2596283	-6,9327826
19	Ubicación 19	37,2607078	-6,9341873
20	Ubicación 20	37,2609896	-6,9358794
21	Ubicación 21	37,2620227	-6,936629
22	Ubicación 22	37,2641098	-6,943061
23	Ubicación 23	37,2657305	-6,9429682
24	Ubicación 24	37,2593161	-6,9485517
25	Ubicación 25	37,2552721	-6,9429604
26	Ubicación 26	37,254337	-6,9405729
27	Ubicación 27	37,254235	-6,9472852
28	Ubicación 28	37,2535263	-6,9506729
29	Ubicación 29	37,2533008	-6,9529966
30	Ubicación 30	37,2538794	-6,9544613
31	Ubicación 31	37,257318	-6,9564827
32	Ubicación 32	37,258682	-6,9541029
33	Ubicación 33	37,2590342	-6,9554741
34	Ubicación 34	37,2614428	-6,9537018
35	Ubicación 35	37,262308	-6,9610659
36	Ubicación 36	37,2605902	-6,9617002
37	Ubicación 37	37,2664163	-6,9559906
38	Ubicación 38	37,2667535	-6,9535909
39	Ubicación 39	37,2697652	-6,9509199
40	Ubicación 40	37,2716746	-6,9500056

Una vez todas las ubicaciones han sido definidas, para que el modelo de programación lineal pueda tomar decisiones de optimización se establece que el **número máximo de contenedores** de esta fracción, por cada una de las ubicaciones sea de **3 unidades**.

4.2.2 Análisis de las distancias máximas de asignación de distritos a localizaciones

En este apartado se encuentran los primeros resultados del modelo de programación lineal para la localización de contenedores de residuos orgánicos en zonas residenciales urbanas.

Como resultado del problema, cada distrito analizado se relacionará con una ubicación activa de contenedores, por lo que en una primera fase se va a analizar la distancia máxima permitida entre ellas.

Para poder obtener un número de escenarios lo suficientemente grande para poder hacer un análisis, se ha modificado la distancia máxima permitida, desde los 180 a los 360 metros, con variaciones de 20 metros dando como resultado diez escenarios posibles. El problema se ha resuelto mediante el método del épsilon-constraints en el que en cada ejecución se ha obtenido la información del nº de localizaciones activas y de la distancia media recorrida por el conjunto de clientes y grandes productores. La tabla 14 recoge los resultados obtenidos de la experimentación que son representados en la figura 22.

Tabla 14. Resultados obtenidos de la primera fase del problema multiobjetivo

Escenarios de la Primera Fase Problema Multiobjetivo					
F.O.	Escenario	Dist. Max	Dist. Media	Nº Ubicac.	Nº de Cont.
F.O. Minimización de Ubicaciones	Escenario 1	180	77,28	33	33
	Escenario 2	200	86,64	32	32
	Escenario 3	220	93,08	30	30
	Escenario 4	240	118,95	26	26
	Escenario 5	260	121,38	24	24
	Escenario 6	280	133,88	23	24
	Escenario 7	300	134,49	23	24
	Escenario 8	320	134,49	23	24
	Escenario 9	340	143,32	20	22
	Escenario 10	360	169,5	17	19

Tal y como puede verse en la figura 22, la distancia media recorrida por los productores hasta las ubicaciones de contenedores, se puede ajustar de forma directamente proporcional a la distancia máxima permitida; En el caso de que la distancia máxima del problema aumentara, se pueden concentrar mayores cantidades de residuos en una misma ubicación, reduciendo el número de ubicaciones totales activas de contenedores y al mismo tiempo, el número de contenedores totales implantados al aprovecharse de mejor manera su capacidad.

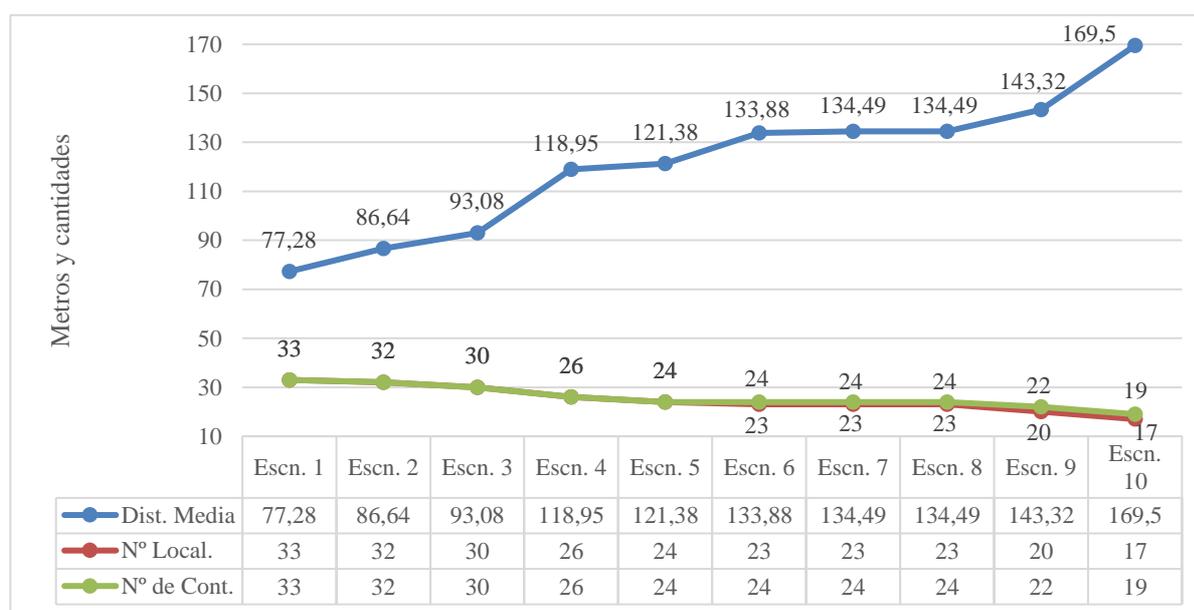


Figura 22. Representación gráfica de los resultados obtenidos para cada escenario.

Las conclusiones de esta primera fase son las siguientes:

A partir de 23 ubicaciones de contenedores el modelo requiere de aumentar la distancia que recorren los ciudadanos demasiado para poder reducir en al menos 2 unidades el número total de ubicaciones activadas, pudiéndose ver como desde el escenario 6 en adelante, para reducir en 3 unidades de localizaciones y 2 unidades de contenedores se ha de aumentar la distancia media recorrida desde 121,38 metros hasta 143,32 metros, haciendo que no merezca la pena todos los resultados obtenidos del escenario 5 en adelante. Además, se observa que las soluciones obtenidas para los escenarios 7 y 8 son dominadas ya que no producen un decremento en el número de localizaciones activas, presentando incrementos en las distancias máximas permitidas.

No obstante, la distancia máxima permitida se ha establecido como puede verse en la tabla 15, en **260 metros**, un escenario que pertenece a una solución no dominada del Frente de Pareto. El escenario 6 tiene una ubicación de contenedores menos y mejora el modelo planteado, ya que el número de ubicaciones de contenedores activas es objeto de minimización de la función objetivo, pero se sobrepasan los 130 metros de distancia media recorrida por los ciudadanos. Esto se debe a que el decisor ha de tener en cuenta todo lo anterior conforme a los contratos de empresas del sector en la actualidad, donde la distancia máxima permitida por los ayuntamientos no suele exceder de los 220 metros y la distancia media recorrida no excede los 130 metros. Para este estudio se ha querido ampliar el número de escenario posibles para contemplar mayor número de soluciones óptimas, aunque se ha determinado que una distancia mayor a 260 metros no es factible para una fase de implantación, donde los ciudadanos aún tienen que concienciarse de incluir en su rutina diaria la separación selectiva de este nuevo residuo y lo mismo ocurre con la distancia media recorrida la cual no debe superar el umbral de 130 metros, por lo que se concluye que los resultados obtenidos van en consonancia con los resultados que están obteniendo las empresas del sector.

4.2.3 Análisis de los resultados obtenidos por el problema multiobjetivo

Los resultados obtenidos del modelo de programación lineal con la primera función objetivo nos permiten continuar al acotar la distancia máxima permitida. A continuación, se va a resolver el problema multiobjetivo que minimiza la distancia media recorrida y el número de localizaciones mediante el método épsilon-constraint. Para ello, partiremos del valor de 24 ubicaciones activas (valor mínimo de localizaciones calculado en el apartado anterior) y calculamos el Frente de Pareto del problema restringiendo el valor del número de localizaciones activas hasta llegar a las 33, creando 10 escenarios. Para cada ejecución del modelo, se calcula la solución con el valor óptimo de la distancia media recorrida que cumpla con la distancia máxima permitida de 260 metros.

Tabla 15. Resultados obtenidos de la segunda fase del problema multiobjetivo.

Escenarios de la Segunda Fase Problema Multiobjetivo					
F.O.	Escenario	Dist. Max	Dist. Media	Nº Ubicac.	Nº de Cont.
F.O. Min Dist. Media	Escenario 1	260	105,26	24	26
	Escenario 2		100,65	25	27
	Escenario 3		96,16	26	26
	Escenario 4		92,54	27	27
	Escenario 5		89,31	28	28
	Escenario 6		86,08	29	29
	Escenario 7		82,88	30	30
	Escenario 8		79,74	31	31
	Escenario 9		76,67	32	32
	Escenario 10		73,61	33	33

Tal y como puede verse en la Tabla 15 o en la figura 23, a medida que aumenta el número de localizaciones activas, las distancias medias recorridas por los ciudadanos mejoran considerablemente en todos y cada uno de los escenarios.

Esto fundamenta de nuevo la teoría anteriormente mencionada del problema multiobjetivo y la conflictividad entre todos los criterios del problema, aunque en este caso la repercusión negativa es significativamente baja.

En la tabla 15 se ha marcado en verde los tres escenarios que posteriormente serán analizados en el estudio. Los escenarios comprenden las soluciones ideales para cada función objetivo, es decir las soluciones que presentan un menor número de localizaciones y distancia media recorrida, y otro escenario intermedio.

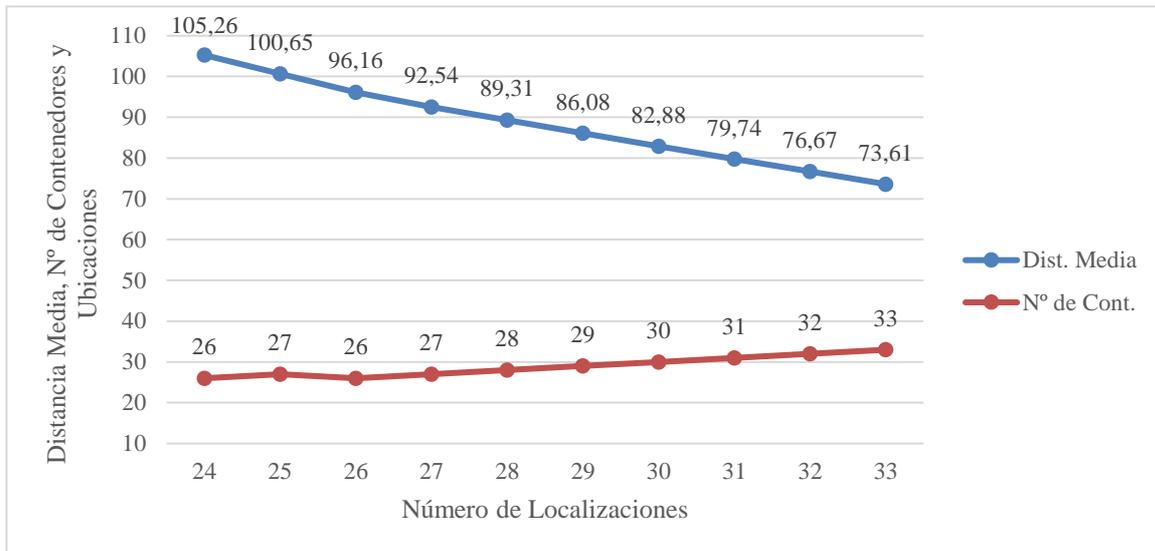


Figura 23. Representación gráfica de los resultados obtenidos para cada escenario

Las conclusiones de esta segunda fase son las siguientes:

Todas y cada una de las soluciones obtenidas, en la práctica actual que desarrollan las empresas del sector son factibles a nivel técnico.

Analizando en profundidad el gráfico mostrado, muestra coherencia técnica ya que el aumento del número de ubicaciones de contenedores conlleva una disminución de la distancia media recorrida por los ciudadanos al haber más puntos disponibles en la vía pública. Por el contrario, y comparándolo con la primera fase del problema multiobjetivo se muestran las pequeñas diferencias entre escenarios en la tabla 16:

Tabla 16. Comparación de Escenarios entre Fases

Comparación de Escenarios entre Fases					
Fase	Escenario	Dist. Max	Dist. Media	Nº Ubicac.	Nº de Cont.
Fase 1	Escenario 5	260	121,38	24	24
Fase 2	Escenario 1	260	105,26	24	26

La tabla 16 realiza una comparación de las soluciones obtenidas entre fases. Se puede ver como el escenario 5 de la primera fase, en la que se minimizaba la distancia máxima permitida, tiene menor número de contenedores que el escenario 1 de la segunda fase, en la que minimizamos la distancia media recorrida. Esto es debido a que en la primera fase se minimizaba la distancia máxima y no la distancia media recorrida; por lo que la solución encontrada en el escenario 1 de la segunda fase es una solución alternativa para el primer problema con un mayor uso de contenedores y por tanto, menor distancia media recorrida. , Por tanto, la solución encontrada en la segunda fase reduce la distancia media recorrida sin suponer un incremento sustancial en las inversiones a realizar ni en las distancias recorridas por los vehículos de recogida.

En el siguiente paso de la metodología, se utilizarán las soluciones obtenidas en los escenarios 1, 5 y 10 de la segunda fase como inputs del segundo modelo de programación lineal, con la finalidad de diseñar las rutas de recogida de residuos minimizando los costes de combustible, pudiendo obtener así un amplio abanico de posibilidades en el trabajo final de master.

Al igual que para el problema de localización, se ha utilizado la herramienta LINGO para resolver el modelo de programación lineal utilizado en este problema.

4.3 Resolución del problema de diseño de rutas de vehículos para la recogida del material orgánico

4.3.1 Datos del problema

En los subapartados siguientes se desarrollan todos los datos necesarios que requiere el modelo de programación lineal para el diseño de rutas de vehículos para la recogida de residuos orgánicos en la ciudad de Huelva

Las ubicaciones de contenedores que se utilizarán en este modelo corresponden con los tres escenarios procedentes del primer modelo de programación lineal como resultado del problema multiobjetivo.

Por lo que se enumeran los siguientes datos de partida necesarios:

- Ubicación de la planta de tratamiento y el depósito.
- Distancias entre todas las ubicaciones de contenedores, planta y depósito.
- Producción de residuos depositada en cada una de las ubicaciones de contenedores seleccionados de cada escenario.
- Capacidad de almacenamiento del vehículo de recogida.
- Consumo de combustible en función de la carga en cada momento.
- Coste del combustible.

Este modelo se basa en el problema de enrutamiento de vehículos para la recogida de residuos con capacidad limitada WCVRP del estado del arte, el cual, adaptándolo al caso del TFM consiste en una flota de un solo vehículo con capacidad uniforme que tiene que satisfacer la demanda de los ciudadanos y grandes productores a través de un conjunto de rutas que empiezan en un depósito y termina en un vertedero con el menor costo posible.

Antes de desarrollar el modelo de programación lineal, al igual que el primer modelo diseñado, cuenta con varios escenarios descritos en la tabla 17. Hay que tener en cuenta que los índices “i” y “j” utilizados en este modelo al ser nodos de la ruta que se defina, han de contener al parque de maquinaria y a la planta de tratamiento, haciendo que se incremente en dos unidades el rango de sus valores, siendo el nodo 0 el parque de maquinaria y el nodo “N+1” la planta de tratamiento.

Estos escenarios provienen del modelo de programación lineal anterior donde se establecieron 3 escenarios. En este segundo modelo, cada escenario se evaluará con los vehículos propuestos, uno de GNC y otro de Diesel, teniendo en total seis escenarios que proporcionarán cada uno un resultado el cual se analizará en apartados posteriores.

En la tabla 17 se pueden ver todos los escenarios propuestos para este modelo, así como los vehículos utilizados para cada uno de ellos, las ubicaciones de contenedores que se tendrán en cuenta y el número de nodos totales sobre los cuales se diseñará la ruta.

Tabla 17. Escenarios y nodos del modelo de programación lineal

Nodos de cada ruta			
Escenario	Vehículo	Ubicaciones	Nodos
Escenario 1	GNC	24	26
	Diesel		
Escenario 5	GNC	28	30
	Diesel		
Escenario 10	GNC	33	35
	Diesel		

Teniendo en cuenta todo lo anterior los siguientes subapartados son los siguientes:

- Ubicación de la planta de tratamiento y depósito: Se definirán los puntos de partida, vaciado y final de

las rutas que han de cumplirse en cualquier ocasión.

- Matriz de distancias: Se establecen las distancias entre todas las ubicaciones de contenedores, la planta de transferencia y parque de maquinaria.
- Datos de maquinaria y combustibles: Donde se analizan en profundidad la maquinaria analizada, consumos, costes de mantenimiento entre otros datos.

4.3.1.1 Ubicación de la planta de tratamiento y depósito

Las ubicaciones de la planta de transferencia donde se llevan los residuos y el depósito o parque de maquinaria se muestran en la figura 24.



Figura 24. Ubicación de la Planta de Transferencia y Parque de Maquinaria.

4.3.1.2 Matriz de distancias

Las distancias entre todas las ubicaciones de contenedores, la planta de transferencia y parque de maquinaria han sido calculadas tal y como se ha realizado en el modelo anterior, siendo las ubicaciones activas de cada escenario para este segundo modelo las mostradas en la tabla 18:

Tabla 18. Tabla de ubicaciones activadas en cada escenario y su producción.

Ubicaciones Activadas								
Escenario 1			Escenario 5			Escenario 10		
Ubic.	Activa	Produc.	Ubic.	Activa	Produc.	Ubic.	Activa	Produc.
1	SI	1,4	1	SI	0,8	1	SI	0,8
2	NO	0	2	SI	0,6	2	SI	0,6
3	SI	0,7	3	SI	0,7	3	SI	0,7
4	SI	0,6	4	SI	0,6	4	SI	0,6
5	SI	1	5	SI	1	5	SI	1
6	SI	0,6	6	SI	0,6	6	SI	0,6

7	SI	1,1	7	SI	1,1	7	SI	0,6
8	NO	0	8	NO	0	8	SI	0,5
9	NO	0	9	NO	0	9	NO	0
10	SI	1,6	10	SI	1,6	10	SI	1,6
11	SI	0,4	11	SI	0,4	11	SI	0,4
12	NO	0	12	NO	0	12	SI	0,1
13	SI	0,3	13	SI	0,3	13	SI	0,2
14	NO	0	14	NO	0	14	NO	0
15	SI	1,7	15	SI	1,7	15	SI	1,7
16	SI	0,2	16	SI	0,2	16	SI	0,2
17	SI	1,1	17	SI	1,1	17	SI	1,1
18	SI	2,2	18	SI	1,4	18	SI	1,4
19	NO	0	19	SI	1,6	19	SI	1,6
20	SI	2,2	20	NO	0	20	NO	0
21	NO	0	21	SI	1,4	21	SI	1,4
22	SI	1,9	22	SI	1,9	22	SI	1,9
23	NO	0	23	NO	0	23	NO	0
24	SI	1,6	24	SI	1,6	24	SI	1,6
25	NO	0	25	NO	0	25	SI	0,1
26	SI	1	26	SI	1	26	SI	0,9
27	SI	0,5	27	SI	0,5	27	SI	0,5
28	NO	0	28	SI	0,7	28	SI	0,7
29	SI	1,6	29	NO	0	29	NO	0
30	NO	0	30	SI	0,9	30	SI	0,9
31	NO	0	31	NO	0	31	SI	0,6
32	SI	2	32	SI	2	32	SI	1,4
33	NO	0	33	NO	0	33	NO	0
34	SI	0,8	34	SI	0,8	34	SI	0,8
35	NO	0	35	NO	0	35	NO	0
36	SI	1,1	36	SI	1,1	36	SI	1,1
37	NO	0	37	NO	0	37	SI	0,6
38	SI	1,6	38	SI	1,6	38	SI	1
39	SI	2,1	39	SI	1,3	39	SI	1,3
40	NO	0	40	SI	0,8	40	SI	0,8
TOTAL	24	29,3	TOTAL	28	29,3	TOTAL	33	29,3

La producción de residuos depositada en cada una de las ubicaciones de contenedores, viene dada por el modelo de programación lineal anterior, que se consigue realizando un vector mediante la fórmula 4.3.1.2-0.

$$\sum_{i=1}^{56} \beta_{ij} \cdot D_i = P_j \quad \forall j = 1, \dots, 40 \quad (4.3.1.2-0)$$

Donde P_j es es vector que contiene las cantidades de residuos depositadas en cada una de las ubicaciones de contenedores, cuya suma total ha de ser la misma para todos los escenarios ya que independientemente de como de optimizado esté el sistema de recogida de residuos la cantidad generada diariamente no varía.

Cabe destacar que, en el modelo, para el cálculo de las rutas de recogida, en las matrices de distancias el número total de localizaciones son 42, siendo el número 0 el parque de maquinaria y el número 41 la planta de transferencia, por lo tanto, el vector P_j ha de tener 42 producciones para que el programa pueda ser compilado y obtener resultados, dándole valor de 0 a las producciones 0 y 41 ya que en ambos lugares no se producen residuos a tener en cuenta.

4.3.1.3 Datos de maquinaria y combustibles

Dado que se pretende conseguir resultados reales, los vehículos que se expondrán en este apartado son utilizados a día de hoy por una empresa líder en el sector de un contrato del cual es adjudicatario.

Hoy en día no solo se busca la eficiencia, sino también diferentes fuentes de combustibles fósiles menos contaminantes o energías renovables para el buen funcionamiento de los servicios municipales. Es por ello que se analizarán dos tipos de vehículos, uno de combustible diésel y otro de gas natural comprimido, del mismo tamaño y utilizados para el mismo servicio en la misma ciudad.

Para poder desarrollar el modelo de manera idónea, el consumo de combustible ha de estar presente en la función objetivo. Es por ello que se han analizado los datos de estos vehículos con al menos 100.000 kilómetros de muestra para garantizar así una máxima precisión en los cálculos.

En la figura 25 puede verse el vehículo GNC que se incluirá en el modelo.



Figura 25. Vehículo GNC de recogida carga lateral

En la tabla 19 se muestran los datos de combustible y kilómetros contabilizados durante 2.048 jornadas trabajadas en el contrato.

Tabla 19. Datos del vehículo Diesel GNC.

Vehículo	Jornadas	Km	Combustible (L)	Combustible		Reparaciones y Mantenimientos	
				L / Km	€ / Km	€ / Jornada	€ / Km
GNC	2.048	261.126	122.084	0,468	0,397	34,75 €	0,273 €

Siendo el precio medio del GNC 0,85 € y los precios de reparaciones y mantenimiento la suma de todo el material y mano de obra invertido en el vehículo en los 261.126 kilómetros realizados.

En la figura 26 puede verse el vehículo diésel que se incluirá en el modelo.



Figura 26. Vehículo diésel de recogida carga lateral

En la tabla 20 se muestran los datos de combustible y kilómetros contabilizados durante 918 jornadas trabajadas en el contrato.

Tabla 20. Datos del vehículo Diesel.

Vehículo	Jornadas	Km	Combustible (L)	Combustible		Reparaciones y Mantenimientos	
				L / Km	€ / Km	€ / Jornada	€ / Km
Diesel	918	102.832	44.072	0,429	0,514	21,96 €	0,196 €

Siendo el precio medio del diésel 1,2 € y los precios de reparaciones y mantenimiento la suma de todo el material y mano de obra invertido en el vehículo en los 102.832 kilómetros realizados.

Estos son los consumos reales medios de estos vehículos, pero para poder incluirlos en la función objetivo y optimizar el consumo de combustible, este ha de estar supeditado a la carga; es decir; que mientras más cargado esté más combustible consumo. Es por ello que se ha solicitado al departamento de maquinaria de servicios centrales estos datos y por cuestiones de confidencialidad los cálculos no pueden ser mostrados, pero si los consumos reales en función de la carga máxima y su carga en vacío. Esto permite obtener una ecuación para cada uno e incluirla en la función objetivo.

En la tabla 21 se muestran los datos de la maquinaria, así como su consumo cada 100 kilómetros y los límites de capacidad por kilogramos de cada camión.

Tabla 21. Datos de maquinaria

Vehículo	Consumo L / Km			L Cada 100 Km		Pesajes		Capacidad
	L / Km Medio	L / Km Carg.	L / Km Vac.	L - Cargado	L - Vacío	Cargado	Vacío	Kg
GNC	0,468	0,534	0,429	53,43	42,86	27.000	16.775	10.225
Diesel	0,429	0,490	0,393	48,98	39,29	27.000	16.200	10.800

Todos los datos calculados e introducidos en el modelo, han sido convertidos al sistema internacional de unidades, cambiando los datos del consumo de litros por kilómetro a litros por metro.

Tabla 22. Datos de maquinaria en el sistema internacional de unidades.

Vehículo	Consumo L / m		
	L / m Medio	L / m Carg.	L / m Vac.
GNC	0,000468	0,000534	0,000429
Diesel	0,000429	0,000490	0,000393

A continuación, se elabora una gráfica mostrada en la figura 27 con las ecuaciones del consumo de combustible en base a los datos de maquinaria facilitados suponiendo una relación lineal:

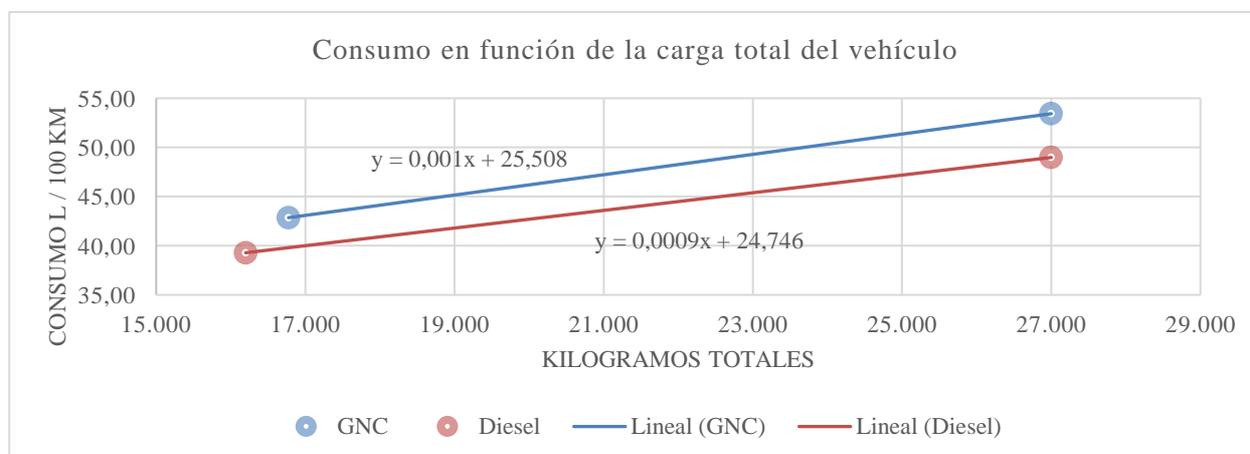


Figura 27. Consumo en función de la carga total del vehículo

Esta gráfica muestra el consumo del vehículo en función de la carga total. Lo interesante es el cálculo de las

ecuaciones que muestran el consumo de combustible en función de la carga adicional, esto se consigue para cada vehículo quitando el peso en vacío o tara del vehículo.

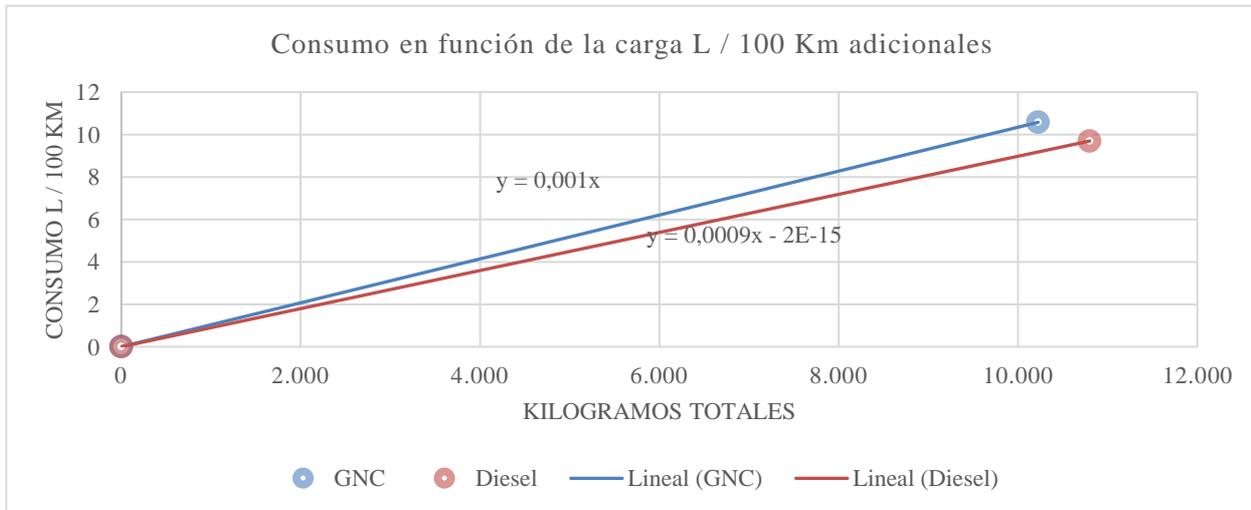


Figura 28. Consumo en función de la carga en litros por cada 100 kilómetros adicionales

Tal y como ha podido observarse en los cálculos de las producciones diarias de residuos, los residuos domésticos y los procedentes de grandes productores, tienen diferentes densidades. Para que el programa pueda mostrar resultados en tiempos de procesamiento de datos razonables, se ha determinado una densidad media de los residuos, teniendo en cuenta la suma total de los residuos generados y la densidad de cada una de las partes de manera proporcional al total de residuos generados obteniendo una densidad media de 382 Kg/m³. Estas ecuaciones en el modelo se denominarán C_{carga}.

4.3.2 Análisis de los resultados obtenidos por el problema multiobjetivo

En este apartado se encuentran los primeros resultados de la programación lineal para el diseño de rutas de vehículos para la recogida de residuos orgánicos en la ciudad de Huelva.

Se han de calcular los tres escenarios para cada una de las tipologías de vehículos para ello en el programa LINGO, se han utilizado al menos 16 horas de compilación por cada escenario, debido a la funcionalidad del programa llega un momento en el encuentra una solución con una diferencia del objetivo del programa menor al 10% en el que por muchas más horas de compilación los resultados apenas mejoran. Se ha establecido un límite de 16 horas de compilación por cada escenario y por cada tipología de vehículo para poder obtener resultados muy cercanos a la realidad y a la mejor solución óptima posible con márgenes de error muy pequeños.

Los resultados obtenidos del modelo se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Resultados obtenidos del segundo modelo de programación lineal.

Resultados Obtenidos						
Función Objetivo	Escenario	Tipología Vehículo	Número Ubicaciones	Dist. Recorrida (m)	Consumo (L)	GAP (%)
Función Objetivo Min Combustible	Escenario 1	GNC	24	26.488	12,79	9,9%
		Diesel		26.583	11,67	9,3%
	Escenario 5	GNC	28	26.656	12,83	9,0%
		Diesel		26.631	11,70	9,9%
	Escenario 10	GNC	33	27.277	13,29	9,8%
		Diesel		27.236	11,96	9,9%

Se observa que a medida que los escenarios, incluyen mayor número de ubicaciones de contenedores la

distancia recorrida aumenta y al mismo tiempo el consumo de combustible.

En la figura 29 puede verse la evolución de los metros recorridos por escenario y tipo de vehículo.

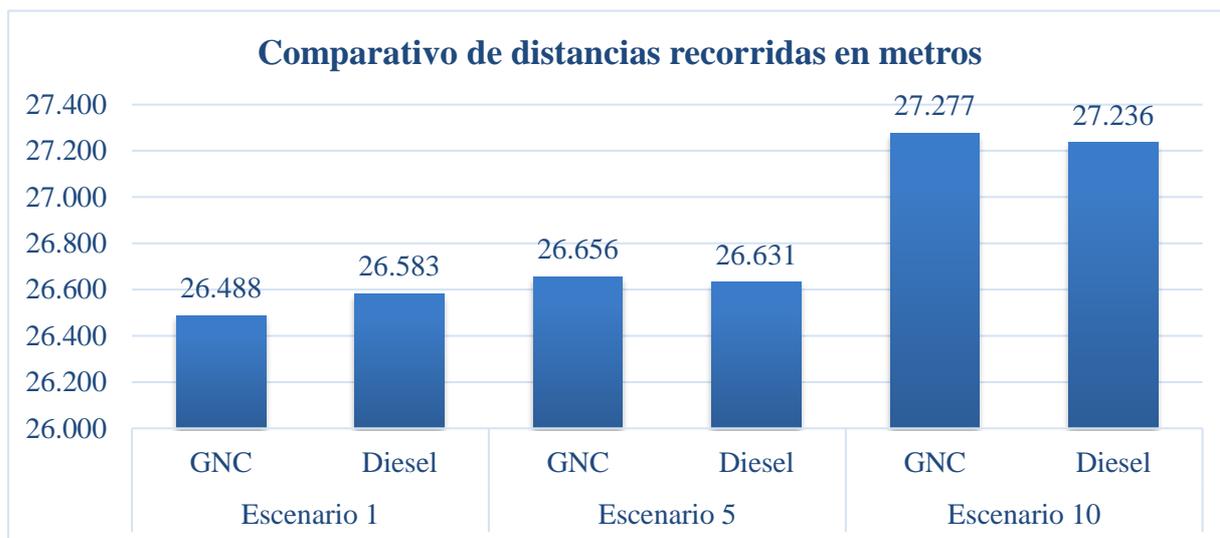


Figura 29. Comparativo de distancias recorridas en metros

En la figura 30 puede verse la evolución del combustible consumido en cada escenario y por cada tipo de vehículo.

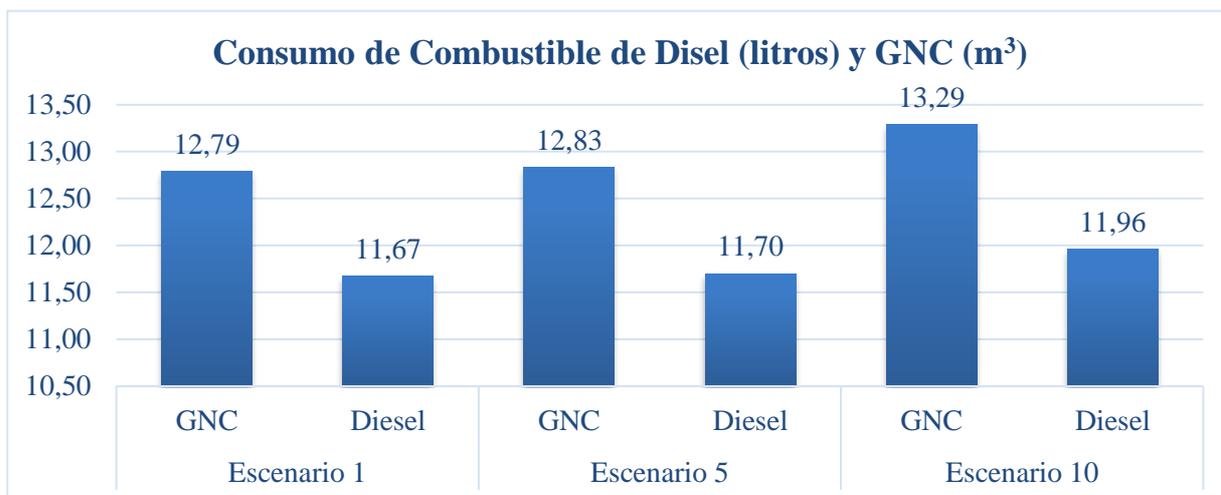


Figura 30. Comparativo de consumos de combustible de Diesel (litros) y GNC (m³)

De estos resultados se obtiene el siguiente análisis:

1. Las diferencias de distancias entre las tipologías de vehículos en cada escenario son mínimas, teniendo diferencias máximas de 95 metros y mínimas de 25. Esto se debe al factor consumo por carga transportada, al introducir en la función objetivo las ecuaciones de consumo de los vehículos en función de la carga transportada, hace que haya algunas diferencias.
2. El consumo de combustible es proporcional a la distancia recorrida y se aprecian diferencias entre los distintos tipos de combustibles.
3. La distancia media recorrida por los ciudadanos es independiente de la ruta seguida por los vehículos de recogida, por lo que al ser independiente de los resultados del modelo han de tenerse en cuenta en el análisis de la solución óptima. Se muestran estas distancias en la tabla 24:

Tabla 24. Distancia media recorrida por los ciudadanos en función del escenario.

Distancia Media de los ciudadanos por escenario				
Escenario	Dist. Max	Dist. Media	Nº Local.	Nº de Cont.
Escenario 1	260	105,26	24	26
Escenario 5		89,31	28	28
Escenario 10		73,61	33	33

4.3.3 Análisis económico-financiero

Para poder evaluar de manera real, tal y como las empresas del sector lo desarrollan en sus propuestas económicas a la hora de presentar una oferta para una licitación pública se realiza un análisis económico financiero de la maquinaria para una elección óptima.

Dado que los vehículos de recogida tienen un coste elevado, los contratos de servicios de este tipo de maquinaria por norma general están alrededor de diez años de contrato para poder amortizar las inversiones durante todo el tiempo de ejecución de los servicios.

Primero se procede a calcular el coste anual de explotación para el cual se han de tener en cuenta los siguientes costes adicionales al combustible:

- Reparaciones y mantenimientos
- ITV programadas
- Seguro del vehículo
- Impuestos de circulación

Todos estos conceptos se encuentran incluidos en el coste de “Mantenimiento y Reparaciones” para simplificar los cálculos. Este importe ha sido detallado en el apartado 3.5.1.3. para cada vehículo y en la tabla siguiente se muestra ya calculado con los kilómetros realizados por cada vehículo en cada ruta.

El coste por jornada, se calcula multiplicando el consumo de combustible por ruta por el precio y sumándole el coste en reparaciones y mantenimiento por ruta.

Tabla 25. Tabla de costes por ruta.

Cálculo de los costes de maquinaria por ruta y anuales						
F.O.	Escenario	Vehículo	Combustible €	Mant. Y Rep. €	€/ Ruta	€/ Anual
Min Combust	Escenario 1	GNC	10,87 €	7,22 €	18,09 €	6.602,93 €
		Diesel	14,00 €	5,21 €	19,22 €	7.013,77 €
	Escenario 5	GNC	10,91 €	7,26 €	18,17 €	6.632,05 €
		Diesel	14,04 €	5,22 €	19,26 €	7.030,34 €
	Escenario 10	GNC	11,30 €	7,43 €	18,73 €	6.836,53 €
		Diesel	14,35 €	5,34 €	19,69 €	7.187,52 €

Una vez obtenido el coste anual, Se necesitan saber los siguientes conceptos para realizar este análisis de manera completa:

1. Coste anual de Explotación: Obtenido en la tabla anterior en función del combustible consumido por ruta y los costes de reparaciones y mantenimientos.
2. Duración del contrato de explotación: Que se establecerá en diez años para tener un periodo de amortización estándar
3. Coste de adquisición de la maquinaria: El coste de adquisición de la maquinaria se utilizarán precios reales de vehículos que actualmente prestan servicios en contratos en España, por cuestiones de confidencialidad estos precios corresponden a los precios de mercado del ejercicio de 2023.
4. Beneficio industrial de la empresa adjudicataria que se establecerá en un 2% de los costes de explotación.

5. Gastos generales: Que suponen los costes de estructura como departamentos de calidad, prevención sostenibilidad, recursos humanos, dirección, informáticos, proyectos, maquinaria etc. Estos se establecerán en un 6,5%.
6. El coste de financiación: Las empresas necesitan financiarse para asumir los costes iniciales de adquisición de medios para prestar los servicios ofertados, lo que supone un coste en la contabilidad.
7. Pago de impuestos como el IVA establecido en un 10% para estos servicios.

Todos estos conceptos han sido desarrollados en los análisis económicos financieros de todos los escenarios y vehículos que se muestran en la tabla 26:

Tabla 26. Análisis económico financiero de los escenarios de vehículos de GNC.

Análisis Económico-Financiero GNC			
Concepto	Escenario 1	Escenario 5	Escenario 10
	GNC	GNC	GNC
Compra Maquinaria	268.743,00 €	268.743,00 €	268.743,00 €
Coste Explotación € para 10 años	66.029,25 €	66.320,47 €	68.365,34 €
Beneficio Industrial 2%	6.695,45 €	6.701,27 €	6.742,17 €
Gastos Generales 6,5%	21.760,20 €	21.779,13 €	21.912,04 €
Financiación 4,5%	15.064,75 €	15.077,86 €	15.169,88 €
IVA 10%	37.829,26 €	37.862,17 €	38.093,24 €
TOTAL	416.121,91 €	416.483,89 €	419.025,67 €

En la figura 31 se muestra un gráfico con todos los conceptos del estudio económico.

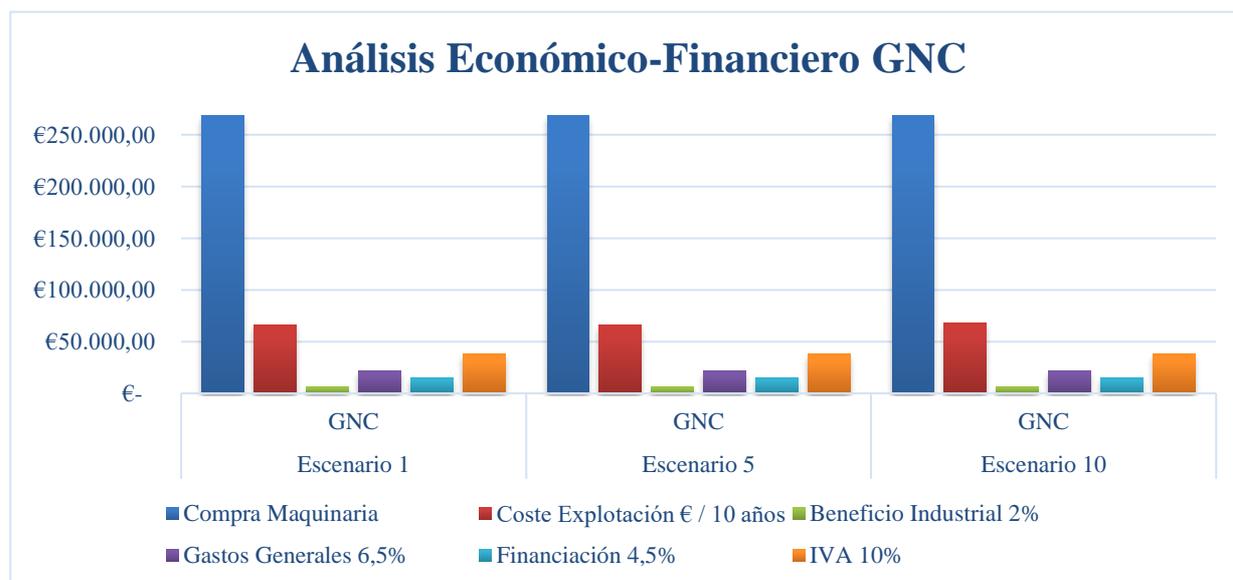


Figura 31. Análisis económico-financiero del GNC para una duración del contrato de 10 años

Tabla 27. Análisis económico financiero de los escenarios de vehículos Diesel.

Análisis Económico-Financiero Diesel			
Concepto	Escenario 1	Escenario 5	Escenario 10
	Diesel	Diesel	Diesel
Compra Maquinaria	215.082,00 €	215.082,00 €	215.082,00 €
Coste Explotación € para 10 años	70.137,67 €	70.303,42 €	71.875,17 €
Beneficio Industrial 2%	5.704,39 €	5.707,71 €	5.739,14 €
Gastos Generales 6,5%	18.539,28 €	18.550,05 €	18.652,22 €
Financiación 4,5%	12.834,89 €	12.842,34 €	12.913,07 €
IVA 10%	32.229,82 €	32.248,55 €	32.426,16 €
TOTAL	354.528,05 €	354.734,08 €	356.687,76 €

En la figura 32 se muestra un gráfico con todos los conceptos del estudio económico.

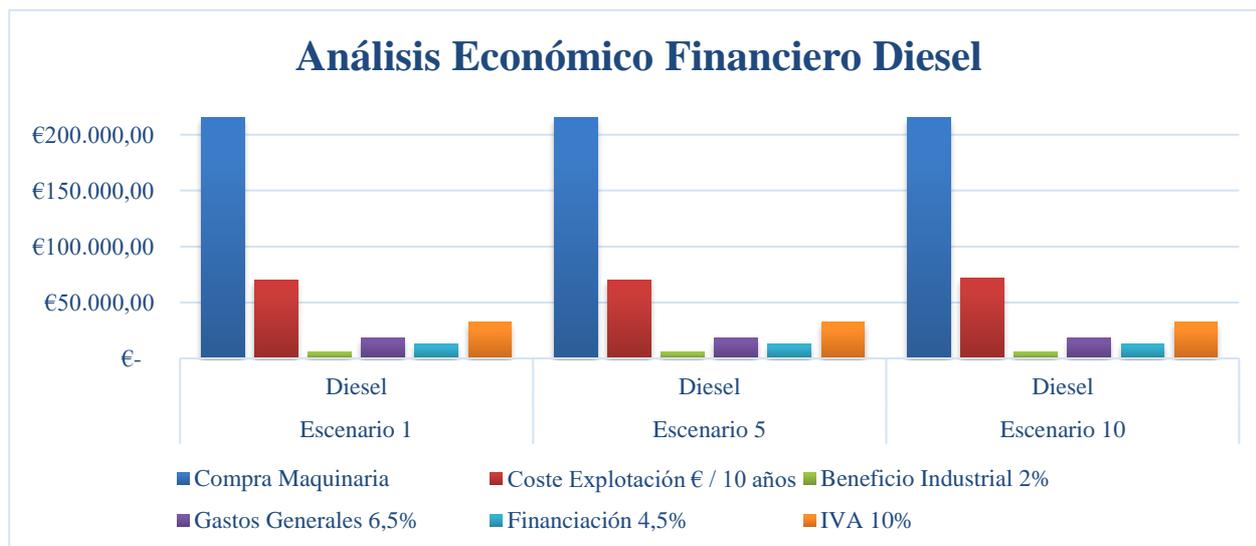


Figura 32. Análisis económico-financiero del diésel para una duración del contrato de 10 años

4.3.4 Conclusiones obtenidas del caso de estudio

Del estudio se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Los costes aumentan conforme las rutas tienen más kilómetros, pudiéndose observar cómo las diferencias económicas entre los escenarios uno y cinco son mínimas y comenzando a verse una diferencia importante entre los escenarios cinco y diez.
2. La repercusión económica en la selección del tipo de vehículo es significativa, ya que hay una diferencia de 53.661,00 € a la hora de la adquisición de la maquinaria, cuyo coste incrementa al aplicarle los porcentajes de beneficio industrial, gastos generales, financiación e IVA, incrementando esta diferencia en otros 12.342,03 € a los diez años, haciendo un total de 66.003,03 € adicionales si se opta por un vehículo GNC.
3. Los costes de explotación son mayores en el diésel que en el GNC ya que los precios del combustible diésel son más elevados, pero de media (entre escenarios) hay una diferencia anual de 3.867,06 € cuyo coste a diez años supone 4.756,49 € más que el GNC. Hay que tener en cuenta que el coste de reparación y mantenimiento de un vehículo GNC es 0,076€ mayor que el coste de uno diésel, por lo que se concluye que la diferencia total de estos costes de explotación reside en el precio del litro de combustible.
4. Si hacemos balance entre los dos puntos anteriores de costes de explotación y adquisición de la maquinaria las diferencias medias entre la elección de un tipo de vehículo u otro son de 61.893,86 € en diez años, por lo que la elección final entre un tipo de vehículo u otro vendrá condicionada por los pliegos de condiciones, su puntuación en los criterios por juicios de valor y lo que el ayuntamiento de Huelva necesite. Teniendo en cuenta las nuevas zonas de bajas emisiones que se están estableciendo en España, está siendo cada vez más habitual el uso de vehículo GNC al tener la etiqueta ECO, como pueden verse como ejemplo en contratos como Madrid, Badajoz o El Puerto de Santa María.
5. Un aspecto importante a tener en cuenta es la distancia media recorrida por los ciudadanos independientemente del vehículo, pudiéndose ver estas distancias en la tabla 26.

Se observa una diferencia de 15,95 metros entre el escenario 1 y 5 siendo el escenario 5 en el que menos distancia recorren los ciudadanos y una diferencia de 15,7 metros entre el escenario 5 y el escenario 10, siendo el escenario 10 donde menos distancia recorren los ciudadanos.

Para poder proponer una solución a los problemas planteados se muestra en la tabla 28 las diferencias económicas entre los escenarios estudiados para el periodo de 10 años estudiado. Cabe destacar que se ha

tomado como escenario referencia el número uno para la tipología de vehículo diésel al ser el más económico y el resto de resultados económicos de cada escenario son la diferencia entre su valor y el escenario más económico en las diferencias globales. En las diferencias entre mismos combustibles se parte del más económico del diésel y más económico del GNC por escenario.

Tabla 28. Diferencias económicas entre escenarios para un periodo de 10 años.

Diferencias Económicas Global			Diferencias entre mismos Combustibles		
Escenario	Vehículo	Coste Adicional	Vehículo	Escenario	Coste Adicional
Escenario 1	GNC	61.593,86 €	Diesel	Escenario 1	- €
	Diesel	- €		Escenario 5	206,03 €
Escenario 5	GNC	61.955,84 €		Escenario 10	2.159,70 €
	Diesel	206,03 €	GNC	Escenario 1	- €
Escenario 10	GNC	64.497,62 €		Escenario 5	361,98 €
	Diesel	2.159,70 €		Escenario 10	2.903,76 €

Si observamos la tabla izquierda, las diferencias totales son muy grandes por lo explicado en el punto número cuatro de las conclusiones, por el contrario, en la tabla derecha las diferencias entre escenarios de cada tipología de vehículo son muy pequeñas.

Conclusiones finales:

El escenario número diez no puede ser una solución óptima al problema ya que el incremento en los costes es muy elevado y las rutas diseñadas tienen mayor distancia, siendo más contaminantes y menos eficientes para realizar el mismo fin.

Las diferencias económicas y medioambientales que se asumen al escoger el escenario número cinco en lugar del número uno, merecen la pena al reducir considerablemente la distancia media recorrida por los ciudadanos y grandes productores para depositar los residuos en las ubicaciones de contenedores seleccionadas. Esta decisión viene condicionada con la experiencia de las compañías del sector, donde el incremento de las distancias recorridas por los ciudadanos incrementa un mal uso y por consiguiente un mayor consumo de combustible y mayor número de emisiones, al necesitar complementariamente a los servicios de recogida vehículos de repaso, limpiezas viarias adicionales y reclamaciones de los servicios de limpieza al necesitar hidro limpiezas o baldeos de las zonas donde se ha derramado lixiviado al depositarse la basura en lugares no acondicionados para ello.

Es por ello que la solución más óptima en términos económicos, medioambientales y del buen funcionamiento de los servicios municipales de limpieza de la ciudad de Huelva es el escenario número 5, detallado en la tabla 29.

Tabla 29. Solución óptima inicial.

Solución óptima inicial					
Escenario	Vehículo	Ubicaciones	Nodos	Dist. Recorrida	Consumo L
Escenario 5	GNC	28	30	26.656	12,83
	Diesel	28	30	26.631	11,70

Tal y como puede observarse las distancias recorridas entre ambos vehículos son casi idénticas, habiendo una diferencia mínima de 25 metros entre una y otra. Esta diferencia se debe como se ha explicado con anterioridad al tiempo de compilación del programa para encontrar una solución óptima. Los programas han sido compilados al menos durante 16 horas, por lo que la ruta finalmente seleccionada es la recorrida por el vehículo diésel de un total de 26.631 metros.

Tabla 30. Solución y ruta óptima propuesta.

Solución óptima					
Escenario	Vehículo	Ubicaciones	Nodos	Dist. Recorrida	Consumo L
Escenario 5	GNC	28	30	26.631	12,83
	Diesel	28	30		11,70

La decisión entre una tipología de vehículo u otra, depende de multitud de factores como los pliegos de condiciones, su puntuación en los criterios por juicios de valor y lo que el ayuntamiento de Huelva y su ciudad

necesite, pero dado este escenario la tipología de vehículo que ha de ser seleccionado, en términos medioambientales es un vehículo GNC y en términos económicos un vehículo diésel.

Para que pueda verse de una manera más gráfica la ruta diseñada es la que se muestra en la figura 33:



Figura 33. Ruta diseñada

Se muestra de nuevo en la figura 34 la ruta con mayor campo de visión para que pueda verse como el inicio y el final de la ruta es el parque de maquinaria, pasando previamente por la planta de transferencia.

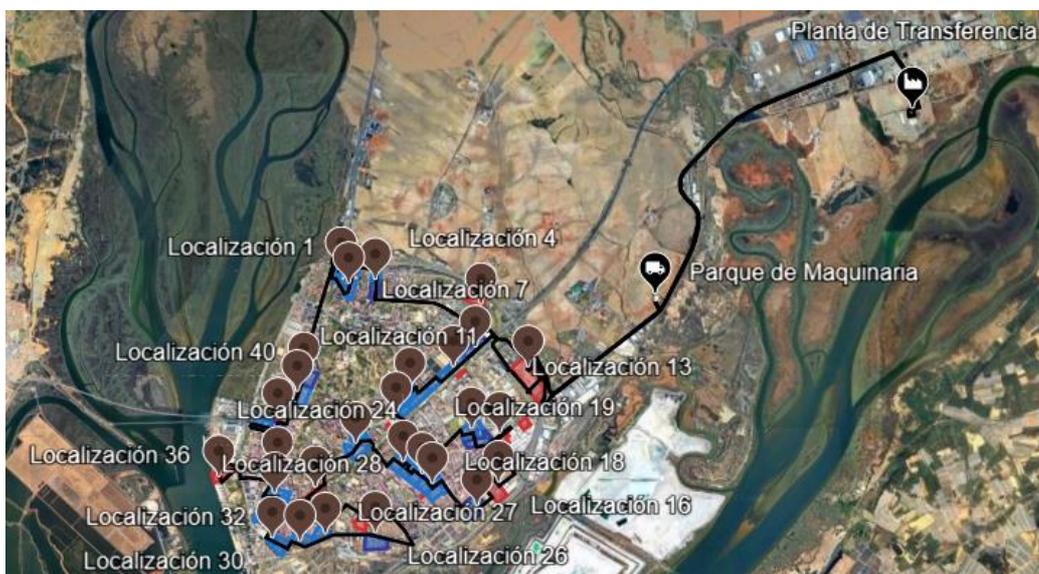


Figura 34. Ruta diseñada ampliada

Se muestra en la tabla 31 a modo resumen la ruta final diseñada con la secuencia de cada nodo, obtenida mediante el modelo de programación lineal.

Tabla 31. Ruta definitiva.

INICIO	
Nodos de la Ruta	Nº Nodo
Parque de Maquinaria	1
Localización 4	2
Localización 3	3
Localización 2	4
Localización 1	5
Localización 40	6
Localización 39	7
Localización 38	8
Localización 36	9
Localización 34	10
Localización 32	11
Localización 30	12
Localización 28	13
Localización 27	14
Localización 26	15
Localización 24	16
Localización 22	17
Localización 21	18
Localización 19	19
Localización 18	20
Localización 17	21
Localización 16	22
Localización 13	23
Localización 15	24
Localización 11	25
Localización 10	26
Localización 7	27
Localización 6	28
Localización 5	29
Planta de Transferencia	30
Parque de Maquinaria	1
FIN	

5 CONCLUSIONES

En este capítulo se expondrá la finalidad de este trabajo final de master para la aplicación al área metropolitana de Huelva de una metodología para la optimización del problema de recogida de residuos orgánicos urbanos.

La base de todo el estudio radica en la realidad del mismo, las caracterizaciones de los residuos, como de la ciudad, densidad de población, datos de maquinaria, es decir, todos los datos del estudio son reales y válidos para una implantación de esta recogida de manera eficaz y competitiva en el mercado, para luchar por una licitación en la ciudad de Huelva capital. Contar con los conocimientos de una empresa líder en el sector, así como su metodología y poder casarla con la literatura científica, sin duda alguna es de la mejor manera posible que se puede describir este estudio.

Cada uno de los capítulos desarrollados están basados en la experiencia del sector desde el problema multiobjetivo, en el que se decide para la primera función objetivo del modelo de programación lineal evaluar los diferentes escenarios hasta conseguir el dato que mejor represente la distancia máxima permitida entre una vivienda o gran productor hasta el contenedor que le presta servicio. Esto se debe, a que la basura es un residuo que no se le presta gran atención porque no se ve, debido a la falta de concienciación de la ciudadanía, nadie quiere tener un contenedor cerca de casa por los olores, pero nadie quiere tenerlo lejos para no andar mucho para ir a tirar la basura, lo que supone sin lugar a duda un gran dilema y un gran reto. Es por todo ello que la segunda función objetivo persigue la minimización de la distancia media recorrida para garantizar que todos los usuarios reduzcan su distancia con el contenedor que les presta servicio. Esto podría verse como que las empresas quieren que los ciudadanos tengan mejor servicio pero sucede todo lo contrario, se busca que se ensucie menos ya que en caso de que los ciudadanos hagan un mal uso dejando la basura fuera del contenedor, en una papeleras, en la acera o donde sea, conlleva un gasto de recursos y por tanto un coste, ya que o viene el camión de prerecogida que es un peón con un vehículo auxiliar recogiendo las bolsas fuera del contenedor o el peón de limpieza tiene que ir quitando las bolsas de basura de las papeleras al estar llenas por un mal uso, lo que supone pérdidas económicas al tener que cumplir una oferta y un pliego de condiciones.

El segundo modelo de programación lineal, tiene una ventaja científica con respecto a lo que se está haciendo a nivel nacional debido a que el diseño de la ruta tiene en cuenta las características de la maquinaria dentro de su función objetivo haciendo que el diseño reduzca, el combustible en función de la ruta seguida, cabe destacar que la guinda del estudio sería poder contar con las distancias reales entre cada punto y no en línea recta como se ha realizado pero para ello se necesitaría meses a tiempo completo para solo poder calcular alguna de las tablas de distancias. Los servicios centrales de empresas líderes en el sector no han conseguido desarrollar una tecnología que les permita realizar el trazado de las rutas de recogida teniendo en cuenta el combustible, esto tiene mucho más trasfondo, ya que para poder diseñar estas rutas se necesitan licencias de empresas dedicadas a sistemas de posicionamiento global o GPS como Garmin o TomTom que valen mucho dinero que llegan a considerar hasta las pendientes de las calles, sentidos de circulación, tráfico en función de la hora a la que se presta servicio entre multitud de datos que solo pagando podrían obtenerse, y no es rentable. La pregunta podría residir en porque no se hace y se obtiene la mejor ruta posible, la respuesta no es científica, sino política. Los políticos a nivel municipal desean poder ofrecer los mejores servicios a los ciudadanos, es por ello que hay requerimientos de la ciudadanía que dificultan las rutas, ya sea porque una señora mayor necesita un contenedor al lado de su casa por tener movilidad reducida o cualquier otra cuestión. Todos estos pequeños detalles surgen en el transcurso de una concesión que como bien se ha podido ver en el análisis económico-financiero para poder amortizar dichas cantidades es habitual ver contratos de más de 10 años, si hubiese que pagar a estas empresas de posicionamiento global cada vez que hay un requerimiento municipal para modificar las rutas no daría el presupuesto y por tanto no sería rentable.

La palabra rentabilidad define sin lugar a dudas la confección de un diseño de rutas como el que presenta este estudio. Sin tener un pliego de condiciones técnico ni administrativo que nos indiquen las cantidades que el Excmo. Ayuntamiento de Huelva estaría dispuesto a invertir para esta implantación propuesta como este trabajo final de master, se puede decir que los datos expuestos van en la línea del sector hasta el más mínimo detalle caracterizando este estudio un estudio real y válido en el mercado.

REFERENCIAS

- Adeleke, O. J., & Olukanni, D. O. (2020). Facility location problems: Models, techniques, and applications in waste management. *International Journal of Production Research*, 1-10. doi:10.3390/recycling5020010
- Benjamin, A. M., & Beasley, J. E. (2013). Metaheuristics for the waste collection vehicle routing problem with time windows, driver rest period and multiple disposal facilities. *Computers & operations research Volumen 37*, 2270-2280. doi:10.1016/j.cor.2010.03.019
- Boletín Oficial del Estado. (2022). BOE-A-2022-5809 Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. *Boletín Oficial del Estado*, 1-136. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5809>
- Cheikhrouhou, O., & Khoufi, I. (2021). A comprehensive survey on the Multiple Traveling Salesman Problem: Applications, approaches and taxonomy. *Computer Science Review*, Volume 40. doi:10.1016/j.cosrev.2021.100369
- Escobar Zuluaga, A., & Ballesteros Silva, P. P. (2016). Revisión del estado del arte del problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega (VRPPD). *Universidad Tecnológica de Pereira*, 1-15. doi:<https://doi.org/10.14482/inde.33.2.6368>
- Ghaziri, H., & Osman, I. H. (2003). A neural network algorithm for the traveling salesman problem with backhauls. *Computers & Industrial Engineering*, 267-281. doi:10.1016/s0360-8352(02)00179-1
- Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., & Triki, C. (2012). Capacitated location of collection sites in an urban waste management system. *Waste Management*, 1291-1296. doi:10.1016/j.wasman.2012.02.009
- Goetschalckx, M., & Jacobs-Blecha, C. (1989). The vehicle routing problem with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 39-51. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90057-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90057-X)
- Golden, B. L., Assad, A. A., & Wasil, E. A. (2002). The Vehicle Routing Problem. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 245-286. doi:10.1137/1.9780898718515.ch10
- Hui, H., & Ponce, E. (2015). Waste Collection Vehicle Routing Problem: Literature Review. *Promet - Traffic&Transportation*, 345-358. doi:<https://doi.org/10.7307/ptt.v27i4.1616>
- Instituto Nacional de Estadística. (01 de 01 de 2023). *INE*. Obtenido de <https://www.forociedad.com/huelva/huelva/habitantes.html>
- Johnson, D. S. (2005). Local optimization and the Traveling Salesman Problem. *Lecture Notes in Computer Science*, 446-461. doi:10.1007/bfb0032050
- Kim, B.-I., Kim, S., & Sahoo, S. (2006). Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Computers & operations research*, 3624-3642. doi:10.1016/j.cor.2005.02.045
- Lola, P. (25 de 11 de 2021). *Centro de Gestión de Residuos*. Recuperado el 27 de 05 de 24, de Planta Lola: <https://plantalola.com/el-contenedor-marron-como-nueva-forma-de-reciclar/>
- López-Ibáñez, M., & Blum, C. (2010). Beam-ACO for the travelling salesman problem with time windows. *Computers & operations research*, 1570-1583. doi:10.1016/j.cor.2009.11.015
- Madrid, A. d. (2017). Comienza la recogida selectiva de materia orgánica. *Diario de Madrid*, 1-1. Obtenido de <https://diario.madrid.es/blog/notas-de-prensa/comienza-la-recogida-selectiva-de-materia-organica/>
- Maghfiroh, R. &. (2023). Implementasi algoritma branch and bound pada distance constrained capacited vehicle routing problem (DCVRP). *Jurnal MIPA Dan Pembelajarannya*, 2, 1-7. doi:<https://doi.org/10.17977/um067v2i8p%25p>
- Marler, T., & Arora, J. (01 de 04 de 2004). Survey of Multi-Objective Optimization Methods for Engineering. *Struct Multidisc Optim* 26, 369-395. doi:10.1007/s00158-003-0368-6
- Mladenovic, N., Brimberg, J., Hansen, P., & Moreno-Perez, J. (2007). The p-median problem: A survey of

- metaheuristic approaches. *European Journal of Operational Research*, 927-939. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.034>
- Ogryczak, W. (2000). Inequality measures and equitable approaches to location problems. *European Journal of Operational Research*, 374-391. doi:10.1016/s0377-2217(99)00240-4
- Orrego Cardozo, J. P., Ospina Toro, D., & Mirledy Toro Ocampo, E. (2016). Solución al Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad Limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística. *Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia*, 225-233. Obtenido de <https://ojs2.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/9013/9581>
- Piqueras, V. Y. (2002). *Universidad Politecnica de Valencia*. Obtenido de <https://personales.upv.es/vyepesp/Presentaciones/PresentacionTesis.pdf>
- Vicepresidenta Tercera del Gobierno. (s.f.). *Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico*. Recuperado el 27 de 05 de 24, de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/fracciones/biorresiduos.html>
- Vicepresidenta Tercera del Gobierno. (s.f.). *Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico*. Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/biorresiduos/biorresiduos-que-caracteristicas-tienen.html#:~:text=Tiene%20una%20densidad%20bastante%20elevada,en%20general%20una%20baja%20compactabilida>

ANEXOS

1 Modelo de Programación Lineal Multiobjetivo con método epsilon-constraint

MODEL:

```
!*****;  
!*Localización de contenedores de residuos biodegradables.  
TFM- Curso 2023-24. Minimizando la distancia media recorrida por los  
ciudadanos.  
!Modelo de Programación Lineal Multiobjetivo con método epsilon-constraint.  
*****  
  
*****;
```

SETS:

```
distritos/1..56/:Demanda,distancias_asignadas;  
  
localizaciones/1..40/:X,Z,numero_maximo,demandalocalizacion;  
  
dist_loc(distritos,localizaciones):beta,distancias;
```

ENDSETS

DATA:

distancias=

2568.3	2402.9	2141.1	978.9	38.7	698.7	908.7	1115.4	1315.4	
1439.8	1668.8	572.3	839.0	987.8	985.3	1403.5	1749.8		
1793.9	1793.0	1884.1	1866.3	2253.9	2183.8				
2922.3	2773.8	2693.5	3141.2	3427.2	3609.0				
3680.9	3648.0	3392.3	3486.1	3238.7	3826.8				
3937.2	3284.0	3068.4	2789.2	2698.9					
3182.3	2980.7	2843.5	2171.2	1471.1	1664.2	1489.3			
1406.7	1365.4	1518.1	1444.0	871.4	613.2	612.0	709.5		
63.1	328.7	735.8	870.0	1022.8	1111.3	1722.4	1776.5		
2131.4	1703.4	1537.5	2103.2	2413.1	2617.9				
2727.6	2843.8	2624.2	2744.4	2595.8	3253.4				
3297.0	2892.8	2699.5	2602.9	2632.7					
2909.5	2807.5	3035.0	3792.0	3973.4	3477.6	3133.0			
2879.8	2657.9	2556.2	2297.3	3729.2	3448.9				
3197.6	3127.5	3400.3	3166.3	2604.5	2476.5				
2326.6	2263.7	1728.3	1782.2	1217.9	1811.5				
2045.8	1511.3	1306.6	1171.6	1036.5	641.7	755.2			
627.7	751.8	184.7	53.8	821.9	1000.1	1401.1	1610.8		
2122.4	1934.5	1986.4	2237.8	2247.0	1828.9	1469.4			
1203.1	965.4	910.4	593.9	1983.6	1711.2	1459.5	1383.7		
1757.7	1623.5	1019.7	853.8	706.7	596.4	19.4	181.5	733.8	
981.8	1104.2	1165.4	1364.9	1500.0	1532.8	1423.5			
1164.6	1251.9	1005.5	1625.0	1714.0	1191.7				
995.9	952.7	1054.0							
1889.4	1702.9	1495.0	829.5	814.5	328.2	95.4	321.5	554.7	645.1
926.7	917.3	898.9	817.9	726.4	1432.7	1651.5	1412.8	1336.5	
1369.4	1302.7	1535.2	1433.6	2243.5	2237.8				
2217.5	2560.6	2818.9	2981.4	3033.1	2942.3				

	2682.9	2764.7	2496.0	3052.3	3175.8	2486.3		
	2271.3	1975.6	1880.2					
2781.2	2677.6	2903.9	3664.5	3857.4	3354.8	3011.8		
	2760.1	2540.1	2435.7	2181.9	3623.6	3346.9		
	3095.3	3023.0	3314.3	3090.0	2520.4	2387.9		
	2236.9	2169.2	1621.1	1667.8	1146.2	1762.5		
	1997.9	1483.5	1301.4	1183.8	1055.8	642.1	709.8	
	585.0	658.9	62.6	138.0	690.6	869.4	1269.8	1479.4
1967.8	1767.8	1754.2	1831.8	1824.5	1405.9	1045.9		
	779.2	540.2	505.8	174.3	1598.3	1349.3	1101.9	1012.5
	1503.7	1456.1	891.5	721.9	621.9	490.2	443.6	378.3
	1261.7	1318.8	1522.1	1753.7	1903.6	1946.5		
	1850.9	1592.1	1678.3	1423.6	2022.1	2124.1		
	1528.7	1318.0	1153.8	1175.1				
2666.7	2500.0	2613.5	2980.3	2949.6	2568.3	2208.3		
	1941.6	1702.6	1653.4	1333.6	2616.6	2316.9		
	2070.7	2016.4	2209.3	1965.5	1412.5	1296.7		
	1152.7	1112.3	730.2	874.6	16.9	683.2	912.4	582.7
	791.1	721.5	480.4	597.1	497.3	1139.6	1155.4	1014.9
	1174.6	1375.5						928.9
2802.0	2607.9	2423.9	1599.1	874.1	1112.2	1016.5		
	1025.3	1083.0	1246.1	1308.6	302.0	46.5	293.2	383.0
	576.2	909.9	1035.8	1085.4	1211.5	1240.2	1771.7	
	1764.6	2337.3	2056.1	1938.9	2445.4	2747.2		
	2942.5	3033.4	3073.0	2830.5	2939.7	2737.4		
	3374.8	3451.6	2919.5	2710.3	2526.0	2503.4		
2825.8	2637.6	2430.5	1495.8	685.7	1045.4	1026.0		
	1091.7	1192.5	1352.0	1459.3	79.7	250.8	490.0	554.8
	756.3	1113.1	1262.0	1306.4	1428.2	1449.1	1957.6	
	1937.1	2545.8	2281.0	2165.9	2668.9	2969.5		
	3163.5	3252.3	3282.0	3036.8	3143.7	2933.0		
	3563.5	3646.5	3089.1	2877.4	2671.1	2632.7		
2841.1	2638.0	2576.6	2267.9	1845.1	1753.1	1453.9		
	1253.6	1092.0	1193.4	972.4	1354.9	1034.5	833.3	
	838.2	806.4	601.3	26.5	185.3	318.4	441.2	1041.6
	1003.1	883.4	1398.1	1704.6	1905.0	2006.0	1136.3	1386.6
	1879.6	1999.6	1856.2	2514.8	2553.6	2188.4		
	2006.4	1968.4	2038.9					
1518.6	1386.2	1586.8	2403.7	2765.7	2172.9	1867.7		
	1655.3	1485.5	1339.3	1215.6	2688.1	2477.4		
	2239.6	2140.5	2662.0	2579.8	1982.4	1811.1		
	1672.9	1550.4	966.5	854.2	1236.6	1807.0	1989.7	
	1812.3	1865.4	1901.1	1855.7	1531.0	1326.2		
	1321.5	1019.6	1275.6	1452.3	635.3	468.9	62.1	165.4
3048.5	2861.4	2906.7	2977.9	2732.9	2500.6	2153.7		
	1900.2	1673.4	1689.6	1362.3	2290.1	1971.4		
	1750.7	1730.1	1717.9	1412.3	966.1	922.6	828.8	871.5
	928.7	1108.4	660.9	65.4	237.2	451.4	759.9	963.4
	1071.6	1199.1	1170.6	1791.9	1776.7	1677.6	1073.9	1244.1
	1563.7	1723.3	1887.5					
1597.1	1474.8	1164.7	148.9	1086.0	600.3	865.4	1096.9	
	1318.7	1320.3	1652.2	1559.5	1675.8	1664.1		
	1586.9	2256.4	2513.9	2291.8	2205.9	2222.6		
	2139.8	2232.4	2089.5	2952.6	3057.2	3062.9		
	3346.2	3578.1	3720.8	3751.9	3593.6	3337.0		
	3397.7	3102.1	3565.5	3718.9	2943.3	2742.1		
	2370.0	2204.0						
1939.5	1816.5	2023.9	2796.5	3076.8	2523.6	2196.8		
	1961.8	1763.1	1635.6	1439.1	2928.5	2686.2		
	2438.4	2349.3	2782.9	2642.5	2038.9	1877.0		
	1726.9	1622.1	1007.7	969.3	990.7	1635.2	1846.4	

	1551.6	1545.0	1547.1	1482.6	1124.9	947.7	920.6
	640.3	844.6	1016.6	215.4	52.1	380.4	598.4
23.5	183.3	412.8	1715.5	2522.2	1850.1	1776.5	1767.0
	1800.1	1658.7	1851.3	2782.7	2735.8	2586.4	
	2476.2	3182.5	3280.8	2801.4	2644.6	2566.3	
	2437.0	2105.0	1925.8	2656.7	3086.7	3207.1	
	3207.4	3321.1	3385.0	3353.6	3043.1	2831.8	
	2833.3	2528.8	2723.3	2915.3	2101.5	1973.9	
	1574.3	1347.1					
78.2	211.5	488.6	1792.0	2585.3	1910.6	1823.2	1801.8
	1823.7	1678.3	1856.9	2831.3	2775.5	2619.9	
	2509.2	3211.1	3299.5	2809.6	2650.5	2567.7	
	2437.4	2085.2	1907.0	2619.6	3064.7	3190.8	
	3174.9	3281.3	3340.5	3305.8	2988.8	2781.3	
	2779.4	2476.6	2655.0	2848.0	2037.4	1915.6	
	1520.0	1293.1					
92.2	139.8	344.5	1647.7	2453.4	1781.6	1710.7	1705.2
	1743.0	1603.5	1803.2	2716.2	2672.0	2524.8	
	2414.8	3122.7	3225.2	2751.3	2595.8	2520.1	
	2391.4	2072.5	1892.8	2636.6	3055.0	3171.5	
	3183.4	3302.9	3370.7	3342.2	3037.9	2823.1	
	2827.7	2521.7	2732.7	2923.3	2106.7	1973.4	
	1570.5	1343.5					
216.1	13.3	314.5	1598.3	2368.8	1692.2	1598.6	1578.6
	1606.4	1463.9	1656.7	2606.9	2551.2	2397.3	
	2286.8	2990.9	3086.1	2606.3	2449.8	2372.6	
	2243.6	1923.7	1743.9	2493.5	2906.3	3022.2	
	3037.7	3160.9	3231.7	3205.7	2907.8	2689.5	
	2697.3	2390.0	2621.9	2810.3	1990.7	1849.9	
	1443.8	1217.9					
420.8	285.0	59.5	1328.1	2124.9	1454.3	1398.5	1415.1
	1479.0	1352.0	1588.3	2399.0	2368.0	2232.5	
	2124.1	2838.5	2962.8	2518.5	2370.6	2308.6	
	2184.1	1936.4	1756.5	2556.3	2914.3	3010.6	
	3079.7	3226.9	3313.4	3298.8	3026.4	2796.6	
	2815.9	2505.9	2792.8	2975.6	2154.2	1995.7	
	1585.8	1366.9					
415.1	349.4	95.9	1328.6	2166.5	1506.6	1482.9	1520.2
	1598.7	1477.7	1724.2	2472.5	2457.8	2332.7	
	2225.7	2943.1	3079.3	2647.2	2501.9	2443.6	
	2320.4	2083.1	1903.3	2704.3	3060.0	3154.1	
	3227.5	3374.9	3461.0	3445.7	3170.7	2942.1	
	2960.2	2650.3	2926.6	3111.1	2289.5	2134.8	
	1725.1	1504.2					
1835.0	1668.6	1410.3	477.7	713.3	49.7	380.9	646.4
	1252.4	1050.9	1131.3	1111.6	1035.9	1706.2	
	1961.9	1765.9	1694.8	1729.3	1661.4	1859.5	
	1743.0	2575.9	2595.3	2577.3	2912.7	3165.7	
	3323.9	3370.5	3260.5	3001.0	3076.7	2798.2	
	3326.9	3460.9	2737.4	2525.3	2197.5	2073.3	
1767.3	1582.5	1369.8	757.6	888.1	302.7	72.4	329.2
	934.4	1038.9	1025.4	938.8	844.1	1555.0	1764.9
	1413.2	1434.8	1359.0	1541.9	1428.0	2257.8	
	2288.4	2279.9	2599.2	2849.5	3006.5	3052.4	
	2944.3	2684.8	2761.9	2486.1	3025.7	3155.3	
	2446.8	2233.0	1921.7	1814.4			
1751.5	1554.7	1393.3	1029.0	1104.0	588.6	230.4	54.2
	282.1	348.9	647.1	1111.8	1012.2	860.1	751.5
	1282.3	1176.7	1180.7	1094.7	1254.9	1144.3	1622.9
	1970.4	2015.0	2017.8	2317.6	2564.5	2720.0	
	2765.2	2658.7	2399.2	2477.8	2205.0	2755.9	
	2880.8	2189.7	1974.6	1683.9	1597.1		

1786.9	1583.9	1479.3	1315.4	1352.2	883.0	523.3	257.5
41.8	121.8	352.2	1250.1	1078.3	872.4	761.8	1430.5
1090.3	960.7	938.1	837.4	960.8	856.3	1675.4	1737.7
2029.5	2272.0	2425.8	2470.3	2366.3	2106.9		1755.4
2187.4	1919.0	2484.1	2602.7	1936.0	1720.4		
1460.4	1402.9						
1845.1	1641.6	1581.1	1546.2	1564.3	1118.9	759.1	
492.6	255.3	231.8	116.7	1399.2	1186.1	954.2	851.1
1474.7	978.2	827.7	773.9	657.8	725.6	629.3	1439.3
1556.2	1801.6	2039.3	2191.1	2234.4	2132.3		
1873.0	1955.4	1691.3	2269.1	2381.7	1740.2		
1525.3	1299.2	1272.1					
1729.2	1525.5	1451.5	1424.0	1506.6	1017.3	661.2	
401.6	191.9	96.1	236.4	1396.9	1210.8	993.1	884.8
1577.1	1103.5	958.2	911.0	796.9	830.7	713.7	1550.5
1695.9	1931.2	2162.8	2310.0	2348.6	2229.8		
1970.3	2047.5	1774.3	2332.2	2453.2	1781.0		
1565.3	1307.1	1255.6					
1630.8	1427.3	1338.8	1315.9	1461.4	932.3	585.4	345.7
208.5	49.3	357.1	1403.4	1242.8	1039.8	929.0	1595.8
1671.3	1216.9	1075.9	1033.8	921.2	934.3	804.6	1655.5
1782.5	1821.0	2049.4	2276.3	2419.8	2454.7		
2322.9	2063.7	2136.5	1856.8	2396.9	2524.6		
1828.8	1613.7	1330.0	1257.3				
2465.4	2266.8	2109.5	1473.8	989.0	954.1	743.8	676.0
857.0	910.4	603.4	353.6	143.7	37.3	755.8	964.9
1399.5	1378.3	2007.3	1809.5	1729.6	2181.5		
2472.6	2659.5	2739.0	2742.5	2493.5	2597.1		
2378.5	3005.3	3091.2	2531.5	2320.6	2127.5		
2104.1							
2628.2	2429.1	2274.7	1615.7	1052.0	1099.3	907.0	
839.8	841.6	1003.5	1021.3	575.4	270.2	37.8	130.2
774.5	798.3	915.1	935.4	1463.8	1461.3	2032.6	1779.9
1680.0	2162.8	2460.8	2653.0	2739.8	2768.7		
2524.7	2632.8	2428.7	3066.2	3142.9	2616.0		
2408.0	2236.5	2225.5					
3241.6	3038.0	2933.8	2392.6	1764.5	1874.6	1650.2	
1518.7	1425.8	1561.7	1417.3	1180.3	892.7	813.9	
885.3	389.6	65.3	540.4	706.5	853.2	966.9	1577.1
1411.0	1229.6	1808.7	2118.4	2324.8	2440.4		
2585.3	2377.9	2501.4	2379.0	3037.5	3065.8		
2726.7	2544.8	2495.9	2553.4				
2890.5	2687.3	2620.3	2281.3	1831.6	1764.2	1473.2	
1281.0	1128.1	1235.1	1024.6	1327.5	1007.3		
816.7	830.2	749.8	536.0	73.5	246.2	383.4	504.8
1445.1	1042.8	911.5	1440.1	1747.9	1949.6	2053.0	
2156.4	1936.9	2057.6	1917.9	2576.6	2613.5		
2253.5	2071.8	2033.1	2102.2				
2763.5	2561.0	2510.0	2255.7	1878.6	1746.0	1433.7	
1219.9	1043.3	1133.2	892.8	1412.1	1092.9	877.3	
868.7	907.1	711.7	111.8	101.7	210.6	337.7	932.0
937.5	839.6	1326.7	1630.2	1827.9	1924.7	2006.5	
1781.1	1900.0	1750.8	2409.1	2450.7	2078.2		
1896.1	1860.7	1934.5					
2774.7	2571.3	2501.0	2168.6	1746.9	1653.2	1356.7	
1161.1	1007.3	1115.4	912.5	1265.3	945.3	737.4	738.8
763.5	606.5	74.8	169.1	321.6	426.4	1039.8	1119.9
1086.1	976.6	1477.6	1782.0	1980.3	2077.7	2157.6	
1930.3	2048.3	1892.1	2549.5	2595.4	2200.4		
2013.0	1954.3	2014.0					
2674.5	2471.2	2404.2	2103.5	1722.2	1591.7	1284.9	
1079.6	916.4	1019.6	810.8	1267.2	950.2	726.6	712.6
							830.8

702.0	151.7	107.7	253.1	339.9	954.4	1026.8	1387.0	1084.8
996.3	1468.5		1768.6		1963.4		2055.4	2116.1
1999.0		1831.1		2486.5		2538.6		2120.8
1861.1		1916.7						1930.4
2572.9	2369.9		2312.9		2071.8		1746.7	1567.4
1025.1		843.9	933.9	703.8	1324.1		1013.1	776.6
824.0	250.5	98.8	166.4	223.5	835.8	904.9	1298.6	1049.3
1421.0		1714.9		1905.2		1991.0		2032.0
1907.6		1729.4		2382.4		2439.8		2004.8
1739.2		1795.0						1812.6
2642.5	2440.6		2398.6		2201.7		1881.7	1700.0
1146.9		955.0	1031.9		773.5	1448.7		1134.2
1010.7		840.6	236.6	83.9	76.5	202.6	800.5	894.9
850.7	1290.2		1586.8		1779.4		1868.7	1196.7
1809.1		1645.8		2302.5		2351.2		1954.3
1726.4		1799.1						1769.1
2512.8	2311.4		2276.6		2133.7		1871.8	1641.8
1065.3		859.7	922.4	647.7	1475.6		1169.2	927.2
965.4	365.2	194.5	72.8	67.1	678.6	763.1	1135.4	934.4
1576.5		1762.3		1842.8		1870.3		1630.5
1561.8		2214.7		2272.5		1842.7		1653.1
1664.9								1596.5
2400.5	2200.0		2175.7		2097.2		1894.6	1618.1
1020.7		801.2	844.1	547.7	1533.2		1235.8	987.9
1092.2		494.1	322.3	193.7	62.4	557.9	634.7	1068.7
1279.7		1554.5		1732.7		1804.7		1804.8
1667.1		1471.2		2118.9		2184.5		1727.7
1468.7		1535.5						1534.8
2152.2	1962.3		2005.1		2219.4		2206.2	1801.6
1174.9		936.1	890.5	567.0	1932.4		1657.2	1405.5
1697.3		1562.8		959.1	792.9	646.0	535.5	79.4
1071.0		1162.7		1373.4		1514.9		1553.0
1200.6		1291.5		1052.3		1677.6		1763.0
1056.4		1011.0		1107.6				1251.5
1972.1	1784.0		1837.8		2132.4		2196.2	1743.1
1122.9		890.4	814.7	521.6	1972.0		1714.4	1464.3
1810.6		1704.6		1105.2		934.4	795.3	673.5
1132.2		1253.2		1306.4		1494.0		1620.0
1504.4		1244.9		1322.0		1054.8		1645.1
1163.2		956.9	856.3	934.7				1749.3
2144.0	1960.5		2029.2		2330.8		2356.0	1930.0
1305.5		1068.9		1006.8		696.9	2093.3	1819.5
1493.0		1853.2		1705.9		1102.1		940.1
229.7	642.9	958.9	1101.9		1107.1		1289.2	1415.6
1318.7		1059.4		1144.4		895.4	1515.8	1603.7
904.0	895.6	1017.1						1094.6
1580.0	1440.8		1628.7		2400.3		2732.8	2151.8
1619.0		1440.9		1299.0		1157.5		2637.9
2180.6		2083.1		2591.6		2502.5		1903.6
1593.1		1471.9		882.7	776.2	1153.0		1719.0
1728.2		1787.0		1827.7		1786.3		1471.5
1261.2		955.8	1252.4		1423.0		617.1	431.2
1362.8	1225.7		1422.9		2261.6		2659.7	2051.3
1558.2		1404.3		1251.4		1165.4		2613.0
2185.0		2082.4		2635.9		2577.0		1987.8
1683.6		1556.6		1003.0		867.7	1355.2	1895.2
1928.0		1998.1		2043.1		2003.2		1687.8
1477.7		1173.0		1438.0		1615.8		797.4
2038.9	1913.0		2114.4		2856.0		3107.5	2568.3
1995.0		1789.5		1668.2		1454.5		2939.2
2439.9		2353.8		2763.6		2610.1		2008.1
1698.0		1598.3		987.4	967.9	905.6	1558.6	1774.1
								1459.8

	1444.9	1443.9	1378.3	1021.2	843.6	816.4	536.6	773.0
	936.3	187.1	60.1	469.2	692.4			
2079.3	1967.9	2189.8	2993.0	3274.0	2722.7	2395.5		
	2159.4	1958.7	1833.1	1629.7	3116.9	2869.6		
	2620.6	2533.6	2946.3	2790.4	2189.0	2031.3		
	1879.5	1780.7	1170.3	1148.7	1041.6	1705.1		
	1926.0	1575.4	1529.1	1504.7	1423.9	1037.2		
	898.4	845.9	609.1	663.7	845.7	25.5	204.7	561.6
3306.5	3115.4	3141.2	3109.0	2773.3	2613.3	2280.2		
	2039.6	1826.2	1865.9	1551.2	2283.1	1962.9		
	1764.9	1763.6	1624.4	1281.8	955.9	967.3	917.7	997.4
	1192.0	1367.9	957.6	289.0	83.6	607.4	903.0	1109.1
	1476.5	1332.7	1459.3	1460.7	2064.5	2033.7		
	1980.0	1868.3	2022.4	2180.8				
3171.4	2999.2	3093.5	3333.9	3172.7	2882.4	2526.2		
	2263.3	2026.9	2011.9	1679.7	2758.1	2441.8		
	2213.3	2183.2	2206.4	1897.6	1446.9	1386.2		
	1273.9	1288.2	1130.2	1301.4	515.2	443.3	651.5	77.1
	277.0	475.9	586.4	811.5	703.3	823.6	906.9	1437.9
	1430.1	1695.0	1895.4				1383.9	1484.8
3265.7	3101.0	3214.9	3519.3	3387.2	3078.2	2720.1		
	2455.3	2217.2	2192.1	1861.9	2981.4	2665.9		
	2435.5	2403.0	2433.4	2122.2	1673.7	1610.0		
	1494.2	1502.2	1288.3	1450.7	603.1	668.6	867.2	273.2
	68.2	248.7	363.2	649.6	608.5	711.9	869.4	1316.0
	1436.9	1743.8	1955.7				1236.4	1458.3
3374.8	3219.7	3355.6	3733.9	3637.8	3306.1	2946.6		
	2680.4	2441.3	2405.0	2078.8	3244.0	2929.9		
	2697.0	2661.2	2704.8	2393.3	1942.5	1874.3		
	1754.4	1755.2	1486.8	1637.5	769.9	940.0	1134.9	
	542.9	237.6	41.8	104.6	502.6	575.1	638.5	878.8
	1450.1	1468.9	1816.5	2037.7	1189.6	1076.6		
3339.1	3189.3	3336.7	3761.0	3696.4	3344.2	2984.2		
	2717.5	2478.2	2433.6	2111.6	3318.1	3006.4		
	2770.1	2729.9	2800.4	2496.3	2029.4	1952.9		
	1827.7	1820.2	1510.8	1652.9	789.6	1042.1	1245.9	
	651.7	358.2	172.9	32.5	389.8	508.3	550.1	817.3
	1406.6	1769.4	1993.5				1072.1	951.5
								1371.2
3063.9	2923.4	3090.7	3611.4	3629.3	3224.1	2865.4		
	2599.8	2362.8	2297.9	1990.9	3298.7	2996.8		
	2751.9	2699.3	2856.6	2582.8	2065.0	1963.6		
	1824.7	1792.7	1382.1	1498.6	697.5	1160.1	1387.4	
	821.4	602.6	485.6	370.7	62.8	243.3	227.5	528.9
	1101.8	1484.3	1711.1				746.2	650.4
							1045.5	
2892.1	2747.5	2908.4	3420.0	3447.7	3035.0	2676.6		
	2411.4	2174.9	2107.9	1802.9	3128.6	2830.1		
	2583.4	2527.5	2712.4	2452.2	1917.1	1807.4		
	1665.0	1625.6	1194.6	1307.9	528.8	1063.2	1296.8	
	770.2	619.2	563.8	486.2	213.4	53.6	130.5	359.8
	1316.3	1541.9					744.4	698.5
							919.1	947.9
2775.1	2627.3	2782.8	3286.1	3320.3	2902.3	2544.3		
	2279.3	2043.2	1974.8	1671.2	3009.6	2713.7		
	2465.9	2407.6	2612.9	2363.3	1816.2	1700.4		
	1555.5	1510.3	1063.5	1174.4	420.4	1008.5	1244.0	
	758.2	661.3	644.9	589.1	344.6	85.1	193.1	263.5
	1204.9	1428.7					775.1	762.3
							848.3	851.9
2770.7	2629.8	2798.8	3350.6	3414.0	2979.5	2623.1		
	2359.7	2125.6	2049.7	1754.2	3117.0	2824.2		
	2575.3	2514.2	2735.7	2490.4	1938.9	1819.6		
	1673.2	1623.2	1150.8	1248.8	543.5	1138.5	1373.9	
	877.1	751.2	703.0	622.8	287.8	102.6	85.1	235.4
	1191.6	1418.2					646.1	632.6
							780.1	814.9

```
2570.0      2429.5      2600.7      3180.7      3281.0      2823.6      2470.1
  2209.3      1978.8      1893.6      1610.0      3011.1      2726.6
  2475.7      2408.3      2677.7      2455.0      1883.5      1752.0
  1601.6      1537.9      1019.0      1097.1      523.2 1176.1      1409.8
  974.0 900.9 881.5 814.0 484.4 279.1 274.0 37.1 639.7 686.9 607.9 619.6
  991.1 1217.6
```

;

```
Demanda= 1.0      0.2  0.6  0.1  0.1  0.5  0.1  1.6  0.2  0.1  0.6
          0.6  0.1  0.6  0.6  0.4  0.2  0.2  0.6  0.4  0.3  0.6  0.5
          0.5  0.6  0.3  0.4  0.6  1.0  0.7  1.1  0.6  0.4  0.2  0.4
          0.4  0.4  0.6  0.8  0.8  0.8  0.2  0.7  0.8  0.4  0.6  0.9
          0.5  0.7  0.6  0.3  0.6  0.8  0.3  0.3  0.8;
```

```
numero_maximo= 3  3  3  3  3  3  3  3  3  3  3  3  3
                3  3  3  3  3  3  3  3  3  3  3  3  3
                3  3  3  3  3  3  3  3  3  3  3  3  3
                3  3;
```

D_max=260;

Num_contenedores=40;

Capacidad_contenedor=2.2;

ENDDATA

!Numero de Localizaciones activadas;

Num_localizaciones=@sum(localizaciones(j):X(j));

!Numero de Contenedores Activados;

Num_contenedores_colocados=@sum(localizaciones(j):Z(j));

!Distancia media recorrida por los habitantes y grandes productores;

Distancia_Media=@sum(dist_loc(i,j):distancias(i,j)*beta(i,j))/56;

!Esta función minimiza, las distancias medias en función del número de localizaciones que se le indiquen;

Min=Distancia_Media;

Num_localizaciones<=28;

!R1.-Cada distrito es asignado a una localización;

@for(distritos(i):

distancias_asignadas(i)=@sum(localizaciones(j):distancias(i,j)*beta(i,j));

@sum(localizaciones(j):beta(i,j))=1;

);

!R2.- Se van a instalar un número determinado de contenedores;

@sum(localizaciones(j):Z(j))<=Num_contenedores;

!Solo con el calculo de las distancias;

!@sum(localizaciones(j):X(j))<=30;

!R3.- Capacidad de cada localización;

@for(localizaciones(j):

@sum(distritos(i):Demanda(i)*beta(i,j))=demandalocalizacion(j);

demandalocalizacion(j)<=Capacidad_contenedor*Z(j);

```
);  
  
!R4.-Relación entre variables X y Z;  
@for(localizaciones(j):  
  
Z(j)<=X(j)*numero_maximo(j);  
!Z(j)>=X(j);  
  
);  
  
!R5.-Distancia máxima de asignación;  
@for(dist_loc(i,j):  
  
    distancias(i,j)*beta(i,j)<=D_max  
  
);  
  
@for(localizaciones(j):  
  
@sum(distritos(i):beta(i,j))<=X(j)*56;  
);  
  
!Declaracion de variables;  
  
@for(dist_loc(i,j):  
  
    @bin(beta(i,j));  
  
);  
  
@for(localizaciones(j):  
  
@bin(X(j));  
@gin(Z(j));  
  
);  
  
END
```

2 Modelo de programación lineal para el diseño de rutas de vehículos para la recogida de residuos orgánicos

MODEL:

```
!*****;
!*VRP de residuos biodegradables.
TFG- Curso 2023-24. Diseño de ruta de recogida de la fracción orgánica.
*****
*****;
```

SETS:

```
localizaciones/1..26/:demanda; !El primer nodo es el depot y el ultimo el
vertedero;
```

```
vehiculos/1..1/:consumo,capacidad; !El consumo en Litros/metros;
```

```
loc_loc(localizaciones,localizaciones):distancias; !Distancias en Metros;
```

```
loc_loc_veh(localizaciones,localizaciones,vehiculos):X,f;
```

ENDSETS

DATA:

```
!Todos estos son los INPUTS;
!Demanda de cada centro productor o distrito;
demanda= 0 1.4 0.7 0.6 1 0.6 1.1 1.6 0.4 0.3 1.7 0.2
1.1 2.2 2.2 1.9 1.6 1 0.5 1.6 2 0.8 1.1 1.6
2.1 0;
```

```
!Consumo en vacio L/m (Introducir en función de GNC o diésel);
```

```
consumo= 0.000392;
```

```
!La Capacidad del Recolector de 19m3 teniendo en cuenta su capacidad de
compresión de la fracción de orgánica se consigue 76 m3;
```

```
capacidad= 76;
```

```
!Peso del Vehículo en vacio (Introducir en función de GNC o diésel);
```

```
Tara=16200;
```

```
!Factor de conversion para convertir m3 a Kg;
```

```
Densidad_Media=382;
```

```
distancias=
```

0.0	3853.3	3431.6	2159.6	1806.8	2310.2	2637.0
	3209.9	3472.2	2547.8	2779.1	2977.5	3357.3
	3558.5	3688.2	4068.3	4743.2	4464.6	4945.7
	5423.3	5211.2	5048.2	5737.7	4831.3	4512.6
	3817.1	3853.3	0.0	435.3	1737.5	2545.5
	1799.8	1680.0	1870.7	2758.9	2498.9	3204.8
	3302.1	2821.3	2585.2	2120.0	2667.9	3222.9
	3219.7	3394.2	2839.3	2535.8	2917.2	1978.9
	1580.5	7163.6	3431.6	435.3	0.0	1303.6
	1450.8	1409.8	1386.1	1629.5	2382.4	2144.5

2860.7	2991.6	2554.7	2349.2	1987.9	2611.9				
3058.3	3133.3	3370.1	2854.8	2564.6	3035.1				
2055.2	1645.3	6808.7	2159.6	1737.5	1303.6				
0.0	944.9	520.8	828.9	1329.0	1657.5	1573.7	1509.4		
2160.3	2431.7	2241.5	2191.9	2250.2	2971.5				
3037.5	3344.8	3733.9	3370.0	3144.2	3775.3				
2806.7	2443.9	5733.3	1806.8	2545.5	2117.3				
944.9	0.0	679.4	902.8	1441.2	1676.2	872.1	1009.9	1439.3	
1784.0	1820.1	1905.3	2264.4	2936.7	2718.2				
3161.6	3627.2	3404.8	3248.1	3945.1	3071.0				
2787.9	5610.3	2310.2	1873.6	1450.8	520.8	679.4			
0.0	360.0	930.2	1235.2	1081.8	990.0	1657.4	1915.1		
1726.6	1696.1	1843.5	2557.9	2544.4	2887.0				
3302.6	2987.3	2788.4	3455.3	2525.3	2202.8				
6027.5	2637.0	1799.8	1409.8	828.9	902.8	360.0	0.0		
577.7	875.5	976.3	781.0	1495.3	1698.3	1427.7	1363.2		
1484.1	2197.8	2208.8	2532.5	2943.4	2629.3				
2435.2	3109.1	2195.2	1892.4	6378.4	3209.9				
1680.0	1386.1	1329.0	1441.2	930.2	577.7	0.1	332.5		
1199.7	883.5	1547.2	1622.1	1170.8	992.9	923.5	1644.1		
1787.4	2027.3	2405.0	2059.6	1858.5	2531.9				
1630.5	1355.8	6955.7	3472.2	1870.7	1629.5				
1657.5	1676.2	1235.2	875.5	332.5	0.0	1263.2	925.6		
1484.4	1481.4	953.7	720.5	608.9	1323.5	1471.0	1694.8		
2077.6	1756.3	1576.3	2269.0	1425.1	1217.5				
7243.3	2547.8	2758.9	2382.4	1573.7	872.1	1081.8			
976.3	1199.7	1263.2	0.0	338.0	592.6	914.3	1012.4	1179.3	
1730.5	2301.9	1917.4	2418.1	2913.2	2794.4				
2698.4	3412.5	2666.7	2480.6	6361.6	2779.1				
2498.9	2144.5	1509.4	1009.9	990.0	781.0	883.5	925.6		
338.0	0.0	719.5	928.1	812.8	909.3	1402.9	2001.9	1708.3	
2166.7	2647.4	2489.7	2379.2	3092.4	2330.4				
2143.1	6595.5	2977.5	3204.8	2860.7	2160.3				
1439.3	1657.4	1495.3	1547.2	1484.4	592.6	719.5			
0.0	379.8	796.9	1081.0	1776.6	2192.8	1600.0	2166.2		
2681.0	2685.9	2655.5	3357.6	2753.5	2651.5				
6756.4	3357.3	3302.1	2991.6	2431.7	1784.0				
1915.1	1698.3	1622.1	1481.4	914.3	928.1	379.8	0.1		
604.1	917.0	1641.1	1948.6	1267.3	1850.7	2366.6			
2431.0	2436.5	3120.8	2607.8	2560.8	7134.6				
3558.5	2821.3	2554.7	2241.5	1820.1	1726.6				
1427.7	1170.8	953.7	1012.4	812.8	796.9	604.1	0.0	313.1	
1037.2	1396.0	906.4	1416.7	1922.4	1889.8	1862.3			
2561.4	2004.7	1961.3	7373.7	3688.2	2585.2				
2349.2	2191.9	1905.3	1696.1	1363.2	992.9	720.5			
1179.3	909.3	1081.0	917.0	313.1	0.0	724.1	1136.8	848.4	
1258.2	1739.5	1633.1	1578.1	2285.5	1693.4				
1650.4	7504.3	4068.3	2120.0	1987.9	2250.2				
2264.4	1843.5	1484.1	923.5	608.9	1730.5	1402.9			
1776.6	1641.1	1037.2	724.1	0.0	721.3	1108.8	1159.9		
1489.2	1148.6	987.3	1695.3	977.1	937.6	7849.1	4743.2		
2667.9	2611.9	2971.5	2936.7	2557.9	2197.8				
1644.1	1323.5	2301.9	2001.9	2192.8	1948.6				
1396.0	1136.8	721.3	0.0	897.3	576.0	776.0	496.3	513.5	1172.2
939.6	1180.6	8541.3	4464.6	3222.9	3058.3	3037.5			
2718.2	2544.4	2208.8	1787.4	1471.0	1917.4				
1708.3	1600.0	1267.3	906.4	848.4	1108.8	897.3	0.0		
594.2	1105.6	1291.2	1405.1	1994.9	1798.2	1944.6			
8279.0	4945.7	3219.7	3133.3	3344.8	3161.6				
2887.0	2532.5	2027.3	1694.8	2418.1	2166.7				
2166.2	1850.7	1416.7	1258.2	1159.9	576.0	594.2			
0.1	516.1	780.1	982.3	1458.4	1499.7	1756.6	8762.2		

5423.3	3394.2	3370.1	3733.9	3627.2	3302.6		
2943.4	2405.0	2077.6	2913.2	2647.4	2681.0		
2366.6	1922.4	1739.5	1489.2	776.0	1105.6	516.1	
0.0	606.3	907.5	1118.2	1496.8	1840.0	9236.3	5211.2
2839.3	2854.8	3370.0	3404.8	2987.3	2629.3		
2059.6	1756.3	2794.4	2489.7	2685.9	2431.0		
1889.8	1633.1	1148.6	496.3	1291.2	780.1	606.3	0.0
309.0	705.1	898.7	1264.2	8997.5	5048.2	2535.8	2564.6
3144.2	3248.1	2788.4	2435.2	1858.5	1576.3		
2698.4	2379.2	2655.5	2436.5	1862.3	1578.1		
987.3	513.5	1405.1	982.3	907.5	309.0	0.0	714.2
5737.7	2917.2	3035.1	3775.3	3945.1	3455.3		
3109.1	2531.9	2269.0	3412.5	3092.4	3357.6		
3120.8	2561.4	2285.5	1695.3	1172.2	1994.9		
1458.4	1118.2	705.1	714.2	0.0	992.3	1396.7	9481.6
4831.3	1978.9	2055.2	2806.7	3071.0	2525.3		
2195.2	1630.5	1425.1	2666.7	2330.4	2753.5		
2607.8	2004.7	1693.4	977.1	939.6	1798.2	1499.7	
1496.8	898.7	590.6	992.3	0.0	409.9	8532.8	4512.6
1645.3	2443.9	2787.9	2202.8	1892.4	1355.8		
1217.5	2480.6	2143.1	2651.5	2560.8	1961.3		
1650.4	937.6	1180.6	1944.6	1756.6	1840.0	1264.2	
957.6	1396.7	409.9	0.0	8177.0	3817.1	7163.6	6808.7
5733.3	5610.3	6027.5	6378.4	6955.7	7243.3		
6361.6	6595.5	6756.4	7134.6	7373.7	7504.3		
7849.1	8541.3	8279.0	8762.2	9236.3	8997.5		
8813.5	9481.6	8532.8	8177.0	0.0			

;

ENDDATA

!Metros totales que recorren los vehículos en la ruta propuesta;

TOTAL_RECORRIDO=@sum(loc_loc_veh(i,j,k)|i#NE#j:distancias(i,j)*X(i,j,k));

!Funcion objetivo del problema - Minimiza el consumo de combustible(Los coeficientes de maquinaria son en función de si es diésel o GNC);

Min=@sum(loc_loc_veh(i,j,k)|i#NE#j: consumo(k)*distancias(i,j)*X(i,j,k)+ ((f(i,j,k)*Densidad_Media)*0.0009)/100000)*distancias(i,j));

!R1.-Cada vehiculo sale una sola vez;

@for(vehiculos(k):

@sum(localizaciones(j)|j#GT#1 #AND# j#LE# (@size(localizaciones)-1):X(1,j,k))=1;

);

!R2.-Si sale, llega al vertedero y al deposito;

@for(vehiculos(k):

@sum(localizaciones(j)|j#GT#1 #AND# j#LE#(@size(localizaciones)-1):X(1,j,k))=@sum(localizaciones(j)|j#GT#1 #AND# j#LE#(@size(localizaciones)-1):X(j, @size(localizaciones),k));

);

!R2.-Si sale, llega al vertedero y al deposito;

@for(vehiculos(k):

```

@sum(localizaciones(j) | j#GT#1 #AND# j#LE#(@size(localizaciones)-1)
: X(j, @size(localizaciones), k)) = X(@size(localizaciones), 1, k);

);

!R3.-Cada contenedor 1 vez es visitado;

@for(localizaciones(j) | j#GE#1 #AND# j#LE#(@size(localizaciones)) :

@sum(vehiculos(k) : @sum(localizaciones(i) | i#LE#(@size(localizaciones)) #AND#
i#NE#j : X(i, j, k))) = 1;

);

!R4.-Conservacion de flujo;

@for(localizaciones(j) | j#GT#1 #AND# j#LE#(@size(localizaciones)-1) :
@for(vehiculos(k) :

@sum(localizaciones(i) | i#LE#(@size(localizaciones)-1) #AND#
i#NE#j : X(i, j, k)) = @sum(localizaciones(i) | i#GE#2 #AND# i#NE#j : X(j, i, k));

);
);

!R5.-Exceder carga del vehiculo;

@for(vehiculos(k) :

@sum(localizaciones(i) | i#LE#(@size(localizaciones)-1)
: @sum(localizaciones(j) | j#GE#2 #AND# j#LE#(@size(localizaciones)-1) #AND#
i#NE#j : X(i, j, k) * demanda(j))) <= capacidad(k);

);

!R6.-Relacion entre variables;

@for(loc_loc_veh(i, j, k) | i#NE#j #and# i#LE#@size(localizaciones) #and#
j#LE#@size(localizaciones) #and# j#GE#2 :

f(i, j, k) <= x(i, j, k) * capacidad(k);

);

@for(loc_loc_veh(i, j, k) | i#NE#j #and# i#GE#2 #and# i#LE#@size(localizaciones)
#and# j#GE#2 #and# j#LE#@size(localizaciones) :

f(i, j, k) >= x(i, j, k) * demanda(i);

);

!R7.-Balance de carga;

@for(localizaciones(j) | j#GT#1 #AND# j#LE#(@size(localizaciones)-1) :

@sum(vehiculos(k) : @sum(localizaciones(i) | i#NE#j #and#
i#LE#@size(localizaciones) :
f(i, j, k))) + demanda(j) = @sum(vehiculos(k) : @sum(localizaciones(i) | i#NE#j #and#
i#GE#2 : f(j, i, k)));

);

```

```
!R8.-Inicializar cargas;
@for(localizaciones(j) | j#GT#1 #AND# j#LE#(@size(localizaciones)-1) :
@sum(vehiculos(k):f(1,j,k))=0;
);
!Declaracion de variables;
@for(loc_loc_veh(i,j,k):
@bin(X(i,j,k));
);
END
```