

Universidad Complutense de Madrid

Universidad Nacional de Educación a Distancia



Master en Ingeniería de Sistemas y Control

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Memoria presentada por

Carlos Salvador Vázquez

Bajo la dirección de

José Jaime Ruz Ortiz

Curso Académico 2011/2012

Septiembre 2012

Master en Ingeniería de Sistemas y Control

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Proyecto tipo A

Memoria presentada por

Carlos Salvador Vázquez

Bajo la dirección de

José Jaime Ruz Ortiz

Resumen

Dado que uno de los mayores costes en la recogida de los residuos sólidos urbanos es el transporte, este trabajo intenta optimizar todas las rutas de recogida de cada vehículo, de manera que se recorra el menor número de kilómetros posible. El entorno es la Provincia de Huelva, donde la Mancomunidad de Servicios (MAS) tiene actualmente esta responsabilidad en la mayoría de los núcleos de población onubenses. Los vehículos de recogida se organizan en Bases de Vehículos con responsabilidad en un conjunto de núcleos de población claramente definido. Los vehículos de recogida vuelcan su contenido en las Estaciones de Transferencia para estar en condiciones de iniciar un nuevo servicio. Se ha utilizado un planteamiento basado en la Programación Lineal Entera Mixta (MILP) utilizando el software de IBM CPLEX Studio.

Abstract

As one of the largest costs in the collection of municipal solid waste is the transportation, this paper attempts to optimize all collection routes each vehicle, so that travel the fewest kilometers possible. The environment is the province of Huelva (Spain), where the Mancomunidad de Servicios (MAS) currently has responsibility for most of the population centers of Huelva. Collection vehicles bases are organized in a vehicle with responsibility villages set clearly defined. Collection vehicles is dumped its contents in Transfer Stations to be able to start a new service. We used an approach based on Mixed Integer Linear Programming (MILP) using IBM software CPLEX Studio.

Palabras clave: *Optimización, programación matemática, residuos sólidos, RSU, rutas, planificación óptima, logística, MILP.*

Índice de contenidos

Índice de contenidos	7
Lista de figuras	10
Lista de Tablas	11
1. Introducción.....	12
Planteamiento general del problema	12
Teorías utilizadas en su solución.....	13
El problema del agente viajero (TSP)	13
El problema de rutas de vehículos o <i>Vehicle Routing Problem</i> (VRP)	13
Algoritmos utilizados para resolver el VRP.....	15
Niveles de estudio	16
2. Especificación de problema.....	17
Mancomunidad de Servicios (MAS) de la Provincia de Huelva.....	17
Organización general de la recogida de RSU,s orgánicos en la provincia de Huelva	18
Consideraciones generales	20
Organización de la recogida de RSU,s orgánicos en la Mancomunidad: Estaciones de Transferencia	20
Estación de transferencia de Andévalo	20
Estación de transferencia de El Campillo	21
Estación de transferencia de Huelva	21
Estación de transferencia La Redondela	21
Estación de transferencia Linares de la Sierra.....	22
Estación de transferencia Villarrasa	22
Organización de la recogida de RSU orgánicos en la Mancomunidad: Bases de Vehículos	22
Base de Aracena	23
Base de Andévalo	24
Base de Condado.....	24
Base de Cuenca Minera.....	24
Base de Isla Cristina.....	25
Base de Punta Umbría.....	25
Base de Trigueros	25
3. Modelo MILP básico.....	27

4. Refinado del modelo básico	33
Primer MODELO	33
PARÁMETROS	34
VARIABLES DE DECISIÓN	35
VARIABLES AUXILIARES	35
FUNCIÓN OBJETIVO	37
RESTRICCIONES	37
PROBLEMAS.....	40
Segundo MODELO	41
PARÁMETROS	42
PARÁMETROS CALCULADOS MEDIANTE SCRIPT	44
VARIABLES DE DECISIÓN	44
VARIABLES AUXILIARES	45
FUNCIÓN OBJETIVO.....	47
RESTRICCIONES	47
Tercer MODELO.....	51
PARÁMETROS	52
PARÁMETROS CALCULADOS MEDIANTE SCRIPT	52
VARIABLES DE DECISIÓN	52
FUNCIÓN OBJETIVO.....	52
VARIABLES AUXILIARES	52
RESTRICCIONES	54
Cuarto MODELO	60
PARÁMETROS	61
PARÁMETROS CALCULADOS MEDIANTE SCRIPT	61
VARIABLES DE DECISIÓN	61
FUNCIÓN OBJETIVO.....	61
VARIABLES AUXILIARES	61
RESTRICCIONES	63
5. Resultados	69
Base de vehículos: ARACENA (Segundo Modelo)	70
Base de vehículos: CONDADO (Segundo Modelo).....	73
Base de vehículos: CUENCA MINERA (Segundo Modelo)	75
Base de vehículos: Isla Cristina (Segundo Modelo)	78
Base de vehículos: ANDÉVALO (Tercer Modelo)	81
Base de vehículos: ANDÉVALO. Opción B (Tercer Modelo)	84
Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA. Sist. NORD. VERANO (Tercer Modelo).....	87
Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA. Sistema NORD. VERANO. Opción B (Tercer Modelo).....	91

Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA. Carga Trasera. VERANO. (Tercer Modelo)	95
Base de vehículos: TRIGUEROS (Cuarto Modelo)	99
6. Conclusiones y trabajos futuros	103
Referencias y Bibliografía	106

Lista de figuras

<i>Figura 2.1: Centro de tratamientos de residuos de Villarrasa.....</i>	18
<i>Figura 2.2: Distribución de los municipios de Huelva por estación de Transferencia</i>	19
<i>Figura 3.1: Esquema VRP para tres vehículos</i>	28
<i>Figura 4.1: Esquema Primer Modelo</i>	33
<i>Figura 4.2: Esquema del Segundo Modelo</i>	41
<i>Figura 4.3: Esquema Tercer Modelo.....</i>	52
<i>Figura 4.4: Esquema del Cuarto Modelo.....</i>	60
<i>Figura 5.1B Resultado Base de vehículos de ARACENA.....</i>	71
<i>Figura 5.1C Recorrido d vehículos y viajes: Base de vehículos de ARACENA</i>	72
<i>Figura 5.2B Resultado Base de vehículos de CONDADO</i>	75
<i>Figura 5.2C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos de CONDADO</i>	75
<i>Figura 5.3B Resultado Base de vehículos de CUENCA MINERA</i>	77
<i>Figura 5.3C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos de CUENCA MINERA.....</i>	78
<i>Figura 5.4B Resultado Base de vehículos de ISLA CRISTINA.....</i>	80
<i>Figura 5.4C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos de ISLA CRISTINA</i>	81
<i>Figura 5.5B Resultado Base de vehículos de ANDÉVALO.....</i>	84
<i>Figura 5.5C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos de ANDÉVALO</i>	84
<i>Figura 5.6B Resultado Base de vehículos de ANDÉVALO (Opción B)</i>	86
<i>Figura 5.6C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos de ANDÉVALO (Opción B).....</i>	87
<i>Figura 5.7B Resultado Base de vehículos de PUNTA UMBRÍA (NORD-VERANO)</i>	90
<i>Figura 5.7C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos de PUNTA UMBRÍA (NORD-VERANO).....</i>	91
<i>Figura 5.8B Resultado Base de vehículos de PUNTA UMBRÍA (NORD-VERANO)(Opción B).....</i>	94
<i>Figura 5.8C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos de PUNTA UMBRÍA (NORD-VERANO) (Op. B) .</i>	95
<i>Figura 5.9B Resultado Base de vehículos de PUNTA UMBRÍA (CARGA TRASERA-VERANO).....</i>	98
<i>Figura 5.10A Estadística. Base de vehículos de TRIGUEROS</i>	100
<i>Figura 5.10B Resultado Base de vehículos de TRIGUEROS</i>	102
<i>Figura 5.10C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos de TRIGUEROS.....</i>	103

Lista de Tablas

<i>Tabla 2.1: Municipios adheridos a MAS que participan en el estudio</i>	18
<i>Tabla 2.2: Distribución de vehículos por bases</i>	23
<i>Tabla 2.3: Poblaciones con Estaciones de Transferencia y Base de Vehículos</i>	26
<i>Tabla 4.1: Bases de vehículos asociadas al Primer Modelo</i>	34
<i>Tabla 4.2: Bases de vehículos asociadas al Segundo Modelo</i>	42
<i>Tabla 4.3: Bases de vehículos asociadas al Tercer Modelo</i>	51
<i>Tabla 4.4: Bases de vehículos asociadas al Cuarto Modelo</i>	61
<i>Tabla 5.1A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: ARACENA</i>	70
<i>Tabla 5.1B: Recorrido Vehículos Base Aracena (Variable x_{ijkv})</i>	70
<i>Tabla 5.2A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: CONDADO</i>	73
<i>Tabla 5.2B: Recorrido Vehículos Base Condado (Variable x_{ijkv})</i>	73
<i>Tabla 5.3A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: CUENCA MINERA</i>	75
<i>Tabla 5.3B: Recorrido Vehículos Base CUENCA MINERA (Variable x_{ijkv})</i>	76
<i>Tabla 5.4A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: ISLA CRISTINA</i>	78
<i>Tabla 5.4B: Recorrido Vehículos Base ISLA CRISTINA (Variable x_{ijkv})</i>	79
<i>Tabla 5.5A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: ANDÉVALO</i>	81
<i>Tabla 5.5B: Recorrido Vehículos Base ANDÉVALO (Variable x_{ijkv})</i>	82
<i>Tabla 5.6A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: ANDÉVALO Opción B</i>	85
<i>Tabla 5.6B: Recorrido Vehículos Base ANDÉVALO Opción B (Variable x_{ijkv})</i>	85
<i>Tabla 5.7A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA Nord Verano</i>	88
<i>Tabla 5.7B: Recorrido Vehículos Base PUNTA UMBRÍA Nord Verano (Variable x_{ijkv})</i>	88
<i>Tabla 5.8A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA Nord Verano Opción B</i>	92
<i>Tabla 5.8B: Recorrido Vehículos Base PUNTA UMBRÍA Nord Verano Opción B (Variable x_{ijkv})</i>	92
<i>Tabla 5.9A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA Carga Trasera- Verano</i>	96
<i>Tabla 5.9B: Recorrido Vehículos Base PUNTA UMBRÍA Carga Trasera- Verano (Variable x_{ijkv})</i>	96
<i>Tabla 5.10A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: TRIGUEROS</i>	99
<i>Tabla 5.10B: Recorrido Vehículos Base TRIGUEROS (Variable x_{ijkv})</i>	100

1. Introducción

Planteamiento general del problema

Entendemos por **residuo** cualquier producto en estado sólido, líquido o gaseoso que carece de valor para quien lo origina y que es depositado (deseable) en lugares específicos para su posterior recogida, tratamiento y reciclado.

Residuos Sólidos Urbanos son los residuos sólidos generados por la actividad doméstica y comercial, principalmente en los núcleos urbanos.

Residuos Sólidos Urbanos orgánicos son los residuos sólidos generados en las poblaciones que por su naturaleza es necesario su recogida con la mayor frecuencia posible.

La modelización de los sistemas de recogida se empezó a estudiar en los años setenta, desde el punto de vista de programación lineal y metaheurístico.

El problema que se plantea en este trabajo es la optimización en la recogida de residuos sólidos, si bien es aplicable a cualquier tipo: orgánicos, papel/cartón, envases, vidrio, etc., nos vamos a limitar a los orgánicos que es el tipo, que por la frecuencia de su recogida, provoca mayor complejidad.

En los planteamientos de recogida de residuos en grandes poblaciones, los residuos son depositados en contenedores que se encuentran en diferentes puntos de las calles. El problema que lo estudia puede partir del llamado *Capacited Arc Routing Problem (CARP)*, en el que se consideran *arcos* (de valor diferente en cada sentido) las calles y *nodos*, los cruces de estas .

En este caso, los modelos para resolver el problema, que encuentran grandes dificultades para ser resuelto de forma exacta, se plantean con estrategias empíricas. La responsabilidad para optimizar esta recogida de residuos cae de lleno en los propios municipios.

Sin embargo, cuando planteamos la recogida en municipios más pequeños, normalmente en entornos rurales, este servicio está tendiendo a mancomunarse, que sería el primer paso para una optimización. En estos casos el problema podría partir del llamado *Capacited Vehicle Routing Problem (CVRP)*, donde los núcleos de población los consideramos *nodos* y estos se unen por las vías de comunicación, que las consideramos *arcos* que, por lo general, se pueden recorrer en ambos sentidos, aunque no tienen por qué tener el mismo coste. En la resolución de este problema se emplean métodos heurísticos, especialmente si se consideran ventanas de tiempo, pero también pueden ser válidos los métodos exactos, como será nuestro caso.

No hay que olvidar que este tipo de problema está incluido en la clase NP-HARD, es decir, dificultad no polinómica y por tanto el esfuerzo para resolverlo crece de forma exponencial al crecer su tamaño que , en nuestro caso, será el número de poblaciones. Afortunadamente, este servicio suele

estar compartimentado en número de poblaciones no muy numeroso y, en nuestro caso, este número es inferior a veinte en cualquiera de los planteamientos.

Teorías utilizadas en su solución

Vamos a plantear dos enfoques principales y algunas de sus variantes. El TSP o problema del viajero que es el caso más sencillo de plantear aunque no por eso deje de ser muy compleja su resolución y el VRP o problema de rutas de vehículos con muchas variantes que se adaptan a diferentes casuísticas.

El problema del agente viajero (TSP)

En este problema disponemos de un solo vehículo y una única estación de donde en un solo viaje debe visitar todas las poblaciones. No existe demanda de cada población. Una variante es que tenga que regresar al mismo punto desde donde partió.

Se trata de minimizar el coste total: $\sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n c_{ij} \cdot x_{ij}$

Donde c_{ij} es el coste de recorrer el tramo de i a j , x_{ij} , una variable binaria que nos indica si se recorre o no dicho tramo y n el número de poblaciones. Estaría sujeto a las siguientes restricciones

- De cada nodo parte uno y solo un arco: $\sum_{j=1}^n x_{ij}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$
- A cada nodo llega uno y solo un arco: $\sum_{i=1}^n x_{ij}, \forall j \in \{1, \dots, n\}$
- Y evitando la formación de subciclos: $y_i - y_j + n \cdot x_{ij} \leq n - 1, \forall i \in \{1, \dots, n\}, x, y \in \{0, 1\}$

El problema de rutas de vehículos o *Vehicle Routing Problem* (VRP)

En este caso disponemos de varios vehículos que deben visitar varias poblaciones y varias estaciones de donde parten y terminan los recorridos. Si consideramos la capacidad (C) de los vehículos (m), que partiendo y volviendo de una única estación deben distribuir o recoger (nuestro caso) una demanda de mercancía (d) entonces estamos en un caso particular llamado *Capacited Vehicle Routing Problem* (CVRP). La función a minimizar sigue siendo el coste del recorrido y este coste se puede interpretar como tiempo, distancia, coste económico, etc.

Cada población tiene asociada una determinada demanda (d) que debe ser satisfecha por la flota de vehículos. En el sentido más simplista del problema, los vehículos empiezan y terminan su recorrido en un mismo punto con capacidad ilimitada, no obstante, los vehículos tienen capacidades limitadas y pueden ser diferentes así como un coste fijo relacionado con su disponibilidad, de manera que se

prime el maximizar cada vehículo al total de su capacidad frente al uso de un número mayor de vehículos.

La formulación del problema, según Toth y Vigo [5] sería:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n c_{ij} \cdot \left(\sum_{k=1}^m x_{ij} \right)$$

Siendo n el número de poblaciones y m el número de vehículos.

Sujeto a las siguientes restricciones:

- No pueden salir más vehículos de los que hay:

$$\sum_{j=2}^n x_{1j} \leq m$$

- El número de vehículos que salen del punto 1 es el mismo que el número que vuelven:

$$\sum_{i=2}^n x_{i1} = \sum_{j=2}^n x_{1j}$$

- Tenemos que respetar la capacidad máxima y evitar subciclos:

$$u_i - u_j + Q \cdot x_{ij} \leq Q - d_i, \forall i \neq j, i, j \in \{2, \dots, n\}, x_{ij} \in \{0, 1\}, u \in \mathbb{R}^+$$

Siendo u_i y u_j variables enteras auxiliares y Q la demanda total.

El VRP ha dado lugar a multitud de variantes. Vamos a ver algunas de ellas. Gómez Cámara nos recoge en [2] las más conocidas.

MDVRP : Una variante del VRP (*Multi Depot Vehicle Routing Problem*) que se diferencia en que existe varias estaciones de donde parten y vuelven los vehículos. Una primera formulación de esta variante la presenta en 1985 Kulkarni y Bhave [6]

Variantes del MDVRP serían:

- *Flotas fijas asociadas a cada estación*: Caso muy frecuente y que en nuestro planteamiento lo tenemos continuamente presente en el enfoque aproximado. Los vehículos están previamente fijados

- *Flotas fijas que parten de una estación y terminan en otra.* Caso algo más complicado pero todavía insuficiente para nuestro planteamiento. La restricción de que vuelve el mismo número de vehículos que sale ya no se puede aplicar.

PVRP (*Periodic Vehicle Routing Problem*): Otra variante al VRP estándar. En este caso existe un horizonte temporal de T días y los vehículos pueden visitar la población en cualquier día de este periodo. Uno de los objetivos de su resolución es determinar la planificación incluyendo el día de la visita. Los primeros trabajos de esta variante lo publica en 1979 Russell e Igo [7]

SDVRP (*Split Delivery Vehicle Routing Problem*): Se diferencia del estándar en que en este caso entran en juego varios vehículos. Fue abordado inicialmente por Dror y Trudeau en 1989 [8] y en 1990 [9], proponiendo un algoritmo para su resolución basado en una búsqueda local. En 1994 proponen un nuevo modelo basado en programación lineal [10].

SDP (*Skip Delivery Problem*): Es realmente un caso particular del SDVRP en el que la capacidad de los vehículos es pequeña y la carga solo puede dividirse entre dos poblaciones. Archetti lo resuelve en tiempo polinomial en [11].

SVRP (*Stochastic Vehicle Routing Problem*): Es el VRP con variables aleatorias. Los componentes del problema se comportan según una determinada función probabilidad que normalmente se desconoce. Los primeros trabajos se publican en 1969 por Tillman [12].

VRPPD (*Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivering*): En este caso las poblaciones pueden recibir unas mercancías o entregar otras. Los primeros trabajos se atribuyen a Wilson et al en 1971 [13]. Se proponen procedimientos exactos por Kohl et al.[14] y por Du Merle et al. [15].

VRPTW (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*): Cada población tiene asociada, además de una capacidad, una ventana temporal en la que solo está permitido la entrega o la recogida. Existe una variante en la que se permite la violación de la ventana asumiendo un coste determinado. Esta variante se empieza a estudiar en 1967 por Pullen y Webb [16]. Trabajos de Kolen et al.[17] y Desrochers [18] fueron el origen de algoritmos exactos basados en técnicas de *Branch and Cut*.

Algoritmos utilizados para resolver el VRP

Existen tres familias: métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos

Métodos exactos

Solo deberíamos utilizarlos en problemas con pocos puntos. Al ser programación entera mixta se utiliza el método *Branch and Bound*. Podemos encontrar información en los trabajos de Laporte u Norbert [19] y Laporte [20]. En nuestro estudio no parece que haya problemas, ya que el caso mayor no supera los veinte puntos.

Métodos Heurísticos

Se agruparían en *algoritmos constructivos*, como por ejemplo el algoritmo de los ahorros de Clarke y Wright [21], *algoritmos por fases*, como por ejemplo el heurístico de barrido [22] o el algoritmo de Pétalo propuesto por Balinski y Quandt [23] que es una generalización del anterior y *algoritmos de inserción*, que es un caso particular de los algoritmos constructivos como por ejemplo el de inserción secuencial de Mole y Jameson [24] o el procedimiento de Búsqueda Local como el operador λ -Intercambio desarrollado por LIn [25].

Métodos Metaheurísticos

Se agrupan en tres categorías: *búsqueda tabú*, como el algoritmo de Osman [26], *algoritmos basados en poblaciones*, como el procedimiento de memoria adaptativa desarrollado por Rochat y Taillart [27] y *algoritmos basados en mecanismos de aprendizaje*, como las redes neuronales y colonias de hormigas utilizados por Ghaziri [28] y Scumann y Retzko [29] para la resolución del VRP.

Laporte [30] menciona que quizá los algoritmos de hormigas como *D-ants* de Reimann [31] sea uno de los mejores y más prometedores a la hora de aplicarlos al VRP.

Niveles de estudio

El problema permite varios niveles de estudio en función del objetivo a conseguir.

Nivel Estratégico. En este nivel estudiaríamos el número, tipo y ubicación de los Centros de Tratamiento y de las Estaciones de Transferencia. En este caso intervendrían todos los núcleos de población, que estaría cerca de la centena y pensamos que los métodos metaheurísticos serían lo más apropiados.

Nivel Táctico. En este nivel partiríamos de las ubicaciones de los Centros de Tratamiento y de las Estaciones de Transferencia y nos centraríamos en definir las Bases de Vehículos, su ubicación, tipo y composición aproximada, así como en relacionar las poblaciones con las Bases y estas con las Estaciones. Este nivel se podía abordar con métodos metaheurísticos y exactos ya que en el estudio no tendrían que entrar todas las poblaciones de una vez, sino que podríamos filtrar y descartar aquellas que por su lejanía no sería probable su asignación a una Base o Estación determinada.

Nivel operativo. Es el nivel más bajo. Nos quedaría definir los vehículos y optimizar los recorridos que han de realizar estos para optimizar una función de coste u objetivo así como los recorridos dentro de las poblaciones. En este nivel el problema se subdivide en varios problemas similares y menores, en los que intervienen un número relativamente pequeño de puntos (poblaciones, Estaciones y Bases). Este nivel es perfectamente asumible con un método exacto para tratar los recorridos entre poblaciones y un método metaheurístico para los recorridos internos en las grandes poblaciones.

Nuestro estudio lo vamos a centrar en el Nivel Operativo y vamos a utilizar un modelo de programación lineal entera-mixta basado en técnicas de *Branch and Bound* .

2. Especificación de problema

Mancomunidad de Servicios (MAS) de la Provincia de Huelva

El estudio que planteamos está enmarcado en la **Mancomunidad de Servicios de la Provincia de Huelva**, con sede en el municipio de **Ajaraque**. La componen setenta municipios de los setenta y nueve que pertenecen a la toda la provincia.

Actualmente tiene las competencias, entre otras, para la recogida y tratamiento de residuos sólidos urbanos, orgánicos y no orgánicos, en gran parte de los municipios de esta Mancomunidad.

Los municipios adheridos a esta mancomunidad y que van a ser objeto de este estudio son los cincuenta y cinco que se relacionan en la tabla 2.1.

Alájar	Los Marines
Aljaraque	Lucena del Puerto
Alosno	Manzanilla
Aracena	Minas de Riotinto
Ayamonte	Nerva
Beas	Niebla
Berrocal	Paterna del Campo
Bonares	Paymogo
Cabezas Rubias	Puerto Moral
Cala	Punta Umbría
Calañas	Rociana del Condado
Campofrío	San Bartolomé de la Torre
Cañaveral de León	San Juan del Puerto
Cartaya	San Silvestre de Guzmán
Chucena	Sanlúcar de Guadiana
Cortelazor	Santa Bárbara de Casa
El Almendro	Santa Olalla del Cala
El Campillo	Trigueros
El Cerro de Andévalo	Valdelarco
El Granado	Valverde del Camino
Escacena del Campo	Villablanca
Fuenteheridos	Villalba del Alcor
Galaroza	Villanueva de las Cruces
Hinojales	Villanueva de los Castillejos
Isla Cristina	Villarrasa
La Granada de Riotinto	Zalamea la Real
La Puebla de Guzmán	Zufre
Linares de la Sierra	

Tabla 2.1: Municipios adheridos a MAS que participan en el estudio

Organización general de la recogida de RSU,s orgánicos en la provincia de Huelva



Figura 2.1: Centro de tratamiento de residuos de Villarrasa

Cada municipio tiene asignado una **Estación de Transferencia** donde descargan los vehículos de recogida. Posteriormente estos residuos son transferidos desde las Estaciones de Transferencia a los **Centros de Tratamiento de RSU**, donde se sigue un proceso de tres fases:

- Recepción y control de admisión
- Recuperación y
- Compostaje

Como resultado se obtiene compost afinado para su posterior comercialización y expedición. En la figura 2.1 se puede ver el centro de tratamiento de residuos de Villarrasa. Entendemos por:

- **Base:** lugar de dónde parten los vehículos asignados a ella y donde regresan una vez terminado el servicio.
- **Estación de Transferencia:** lugar donde los vehículos descargan los residuos.
- **Estación de Tratamientos de Residuos Sólidos Urbanos:** lugar donde los vehículos de gran tonelaje traen los residuos recogidos en las Estaciones de Transferencia para su tratamiento.

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

La distribución de municipios por estación de transferencia y centro de tratamiento en la provincia de Huelva es la que se indica en la figura 2.2, independientemente de que sea o no responsabilidad de la Mancomunidad.

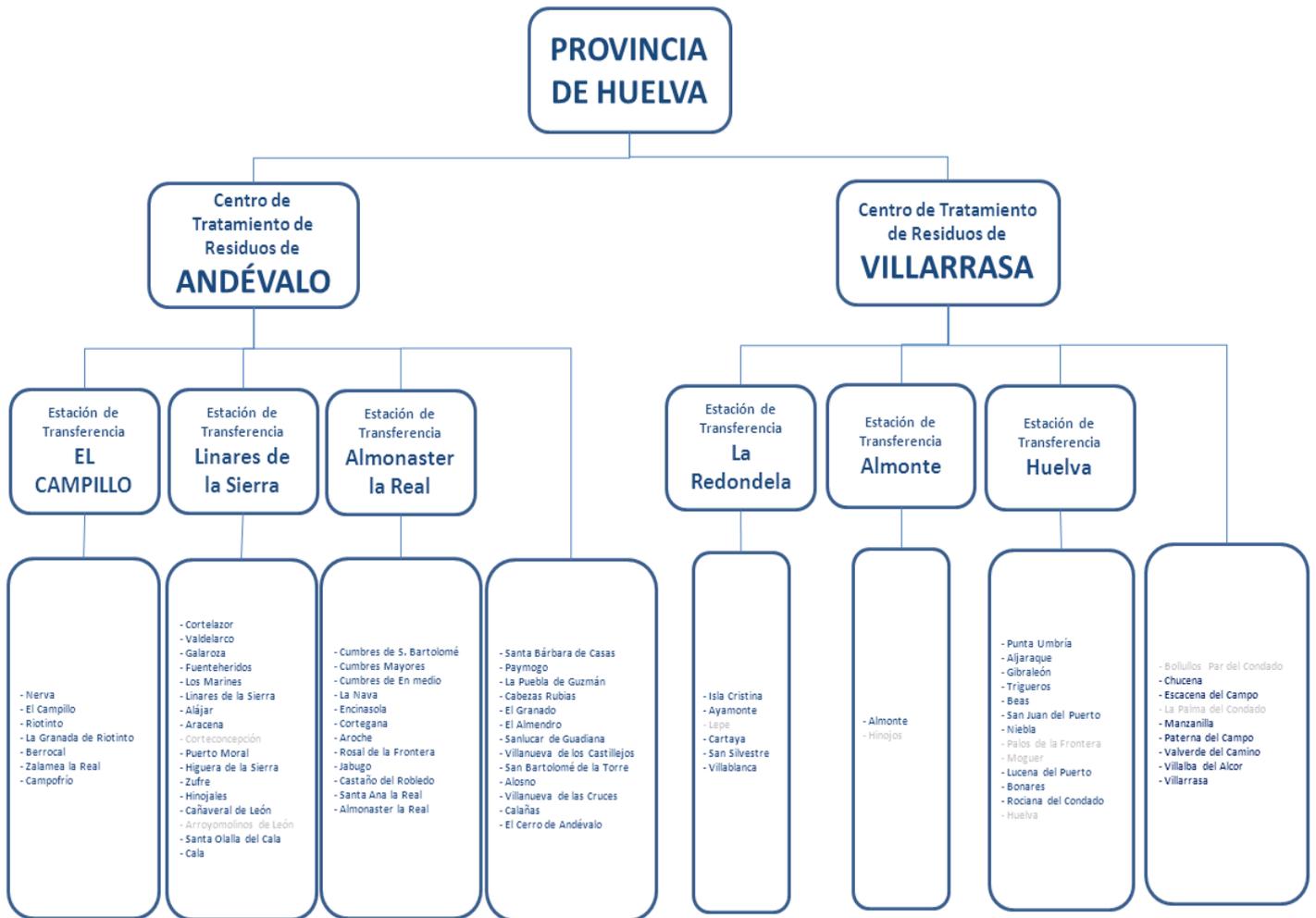


Figura 2.2: Distribución de los municipios de Huelva por estación de Transferencia

Los nueve municipios que están coloreados en gris no pertenecen a la Mancomunidad. De los setenta que sí pertenecen, vamos a trabajar con los cincuenta y cinco que ya tienen organizado el servicio de forma centralizada en la MAS. Hay que hacer la observación de que existen varios municipios como los de Calañas, El Campillo, Zalamea la Real, Aljaraque, Beas, Niebla, Ayamonte, Isla Cristina, Cartaya, Aracena y Galaroza que su responsabilidad alcanza a varias poblaciones dependientes del propio municipio (Núcleo principal y una o varias aldeas o pedanías). Para nuestro estudio, las consideramos como poblaciones diferentes, de modo que, por ejemplo, la Estación de Transferencia de Andévalo tiene que dar servicio no a trece núcleos de población sino a dieciséis, incluyendo los tres núcleos de Calañas además de la propia cabecera del municipio.

Consideraciones generales

Existen dos sistemas de recogida:

- Carga trasera (tradicional), con dos o tres operarios incluido el conductor.
- EASY (Nord), de carga lateral por un solo operario (el propio conductor)

Tanto en uno como en otro, se usa vehículo y contenedor específico. Esto hace que cuando coexistan ambos sistemas en una zona de responsabilidad de una estación de transferencia, se desdoble el problema en dos, totalmente independientes.

Entre las características de los vehículos está el volumen máximo de residuos recogidos (una vez prensados). Se ha establecido un coeficiente de prensado en función de la estacionalidad; por ejemplo un coeficiente de prensado de 5 se traduciría en que cinco contenedores de 1 m³, dentro del vehículo, ocuparía un único m³.

Se ha supuesto que todos los contenedores tienen una capacidad de 1m³.

El parámetro tiempo de recogida de un contenedor es diferente en cada tipo de contenedor. Se ha de calcular empíricamente.

Organización de la recogida de RSU,s orgánicos en la Mancomunidad:

Estaciones de Transferencia

Los cincuenta y cinco municipios donde la Mancomunidad tiene la responsabilidad de la recogida de residuos están organizados de manera que cada municipio tiene asignada una Estación de Transferencia. Los vehículos que recogen los residuos, organizados por bases, llevan los residuos a la Estación de Transferencia asignada. La distribución es la siguiente:

Estación de transferencia de Andévalo

Base en Andévalo

- Alosno
- Cabezas Rubias
- Calañas (Calañas, Sotiel Coronada, El Perrunal, La Zarza)
- El Almendro
- El Cerro de Andévalo
- El Granado
- La Puebla de Guzmán
- Paymogo
- San Bartolomé de la Torre
- Sanlúcar de Gadiana
- Santa Bárbara de Casa
- Villanueva de las Cruces

- Villanueva de los Castillejos

Estación de transferencia de El Campillo

Base Cuenca Minera

- Berrocal
- Campofrío
- El Campillo (El Campillo y Traslasierra)
- La Granada de Riotinto
- Minas de Riotinto
- Nerva
- Zalamea la Real (Zalamea la Real, Marigenta, Membrillo, Buitrón, El Pozuelo, Montesorromero, Las Delgadas, El Villar)

Estación de transferencia de Huelva

Base Punta Umbría

- Aljaraque (Aljaraque, Corrales, Bellavista, Dehesa Golf)
- Punta Umbría

Base Trigueros

- Beas (Beas, Candón, Fuente de la Corcha)
- Bonares
- Lucena del Puerto
- Niebla (Niebla y Picos de Niebla)
- Rociana del Condado
- San Juan del Puerto
- Trigueros

Estación de transferencia La Redondela

Base de Andévalo

- Andévalo

Base de Isla Cristina

- Ayamonte (Ayamonte y Pozo Camino)
- Isla Cristina (Isla Cristina, Isla Antilla, Urbasur, La Redondela)
- Villablanca

Base de Punta Umbría

- Cartaya (Cartaya, El Rompido, El Portil)

Estación de transferencia Linares de la Sierra

Base Aracena

- Alájar
- Aracena (Aracena y La Umbría)
- Cala
- Cañaveral de León
- Fuenteheridos
- Galaroza (Galaroza y Navahermosa)
- Hinojales
- Linares de la Sierra
- Puerto Moral
- Santa Olalla del Cala
- Valdelarco
- Zufre

Estación de transferencia Villarrasa

Base de Condado

- Chucena
- Escacena del Campo
- Manzanilla
- Paterna del Campo
- Valverde del Camino
- Villalba del Alcor
- Villarrasa

Organización de la recogida de RSU orgánicos en la Mancomunidad: Bases de Vehículos

Con la periodicidad que se haya determinado, los vehículos con la función de recoger los RSU,s orgánicos de las poblaciones de los municipios y llevar los residuos a la Estación de Transferencia asignada, están concentrados, no en la propia estación, sino en unas bases cercanas a ellas que, en algún caso, incluso, podría coincidir con ella.

La distribución de los vehículos por bases se muestra en la tabla 2.2.

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base	Trasera						Nord
	23 m3	18 m3	14 m3	12 m3	9 m3	6 m3	
Andévalo		7331-GLR 8950-GLY					
Aracena			4234-GML	2868-DNL	0594-DNY		
Condado	9461-GLS	2285-GNH					
Cuenca Minera		8977-GLY		7273-GLR			
Isla Cristina	9469-GLS 9481-GLS	9487-GLS 2276-GNH					
Punta Umbría		5632-CGK(*) 9478-GNK				2294-GNH	0868-GMY 0856-GMY 7238-GMY 1673-GPP
Trigueros	7322-GLR	9466-GLR 7255-GLR 7279-GLR	2190-DDC				

(*) Solo verano

Tabla 2.2: Distribución de vehículos por bases

La distribución de los municipios por bases, indicando la estación de transferencia, es la siguiente:

Base de Aracena

<u>Núcleo urbano</u>	<u>Estación de Transferencia actual</u>
Alájar	Linares de la Sierra
Aracena	Linares de la Sierra
Cala	Linares de la Sierra
Cañaverale de León	Linares de la Sierra
Fuenteheridos	Linares de la Sierra
Galaroza	Linares de la Sierra
Hinojales	Linares de la Sierra
La Umbría (Aracena)	Linares de la Sierra
Linares de la Sierra	Linares de la Sierra
Navahermosa (Galaroza)	Linares de la Sierra
Puerto Moral	Linares de la Sierra
Santa Olalla del Cala	Linares de la Sierra
Valdelarco	Linares de la Sierra
Zufre	Linares de la Sierra

Base de Andévalo

<u>Núcleo urbano</u>	<u>Estación de Transferencia actual</u>
Alosno	Andévalo
Cabezas Rubias	Andévalo
Calañas	Andévalo
El Almendro	Andévalo
El Cerro de Andévalo	Andévalo
El Granado	Andévalo
Calañas	Andévalo
La Puebla de Guzmán	Andévalo
Calañas	Andévalo
Paymogo	Andévalo
San Bartolomé de la Torre	Andévalo
San Silvestre de Guzmán	La Redondela
Sanlúcar de Gadiana	Andévalo
Santa Bárbara de Casa	Andévalo
Calañas	Andévalo
Villanueva de las Cruces	Andévalo
Villanueva de los Castillejos	Andévalo

Base de Condado

<u>Núcleo urbano</u>	<u>Estación de Transferencia actual</u>
Chucena	Villarrasa
Escacena del Campo	Villarrasa
Manzanilla	Villarrasa
Paterna del Campo	Villarrasa
Villalba del Alcor	Villarrasa
Villarrasa	Villarrasa
Chucena	Villarrasa

Base de Cuenca Minera

<u>Núcleo urbano</u>	<u>Estación de Transferencia actual</u>
Berrocal	El Campillo
Buitron (Zalamea la Real)	El Campillo
Campofrío	El Campillo
El Campillo	El Campillo
El Pozuelo (Zalamea la Real)	El Campillo
El Villar (Zalamea la Real)	El Campillo
La Dehesa (Minas de Riotinto)	El Campillo
La Granada de Riotinto	El Campillo
Las Delgadas (Zalamea la Real)	El Campillo
Marigenta (Zalamea la Real)	El Campillo
Membrillo (Zalamea la Real)	El Campillo
Minas de Riotinto	El Campillo
Monte Sorromero (Zalamea la Real)	El Campillo
Nerva	El Campillo
Traslasierra (El Campillo)	El Campillo
Zalamea la Real	El Campillo

Base de Isla Cristina

Núcleo urbano

Ayamonte
Isla Cristina
Islantilla (Isla Cristina)
La Redondela (Isla Cristina)
Pozo Camino (Ayamonte)
Urbasur (Isla Cristina)
Villablanca

Estación de Transferencia actual

La Redondela
La Redondela
La Redondela
La Redondela
La Redondela
La Redondela
La Redondela

Base de Punta Umbría

Núcleo urbano

Aljaraque
Bellavista (Aljaraque)
Cartaya
Corrales (Aljaraque)
Dehesa Golf (Aljaraque)
El Portil (Cartaya)
El Rompido (Cartaya)
Punta Umbría

Estación de Transferencia actual

Huelva
Huelva
La Redondela
Huelva
Huelva
La Redondela
La Redondela
Huelva

Base de Trigueros

Núcleo urbano

Beas
Bonares
Candón (Beas)
Fuente de la Corcha (Beas)
Lucena del Puerto
Navahermosa (Galaroza)
Navahermosa (Beas)
Niebla
Rociana del Condado
San Juan del Puerto
Trigueros
Valverde del Camino

Estación de Transferencia actual

Huelva
Huelva
Huelva
Huelva
Huelva
Linares de la Sierra
Huelva
Huelva
Huelva
Huelva
Huelva
Villarrasa

En general, las bases de vehículos no atienden a una única estación de transferencia, aunque en algún caso sea así, como las base de Aracena, Condado, Cuenca Minera e Isla Cristina.

La distribución actual de las poblaciones por vehículo (Base) y por estación de transferencia la resumimos en tabla 2.3. En nuestro estudio no vamos a respetar las asignaciones de las poblaciones a las Estaciones de Transferencia, sino las asignaciones de las Bases de Vehículos a estas.

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

	Punta Umbría 0868-GMY (NORD) 7238-GMY (NORD) 0856-GMY (NORD) 1673-GPP (NORD) 2294-GNH 9478-GNK 9466-GLR 7322-GLR 7255-GLR 2190-DDC 7279-GLR	Trigueros 2276-GNH (2 turnos) 9487-GLS 9481-GLS 9489-GLS	Isla Cristina 7273-GLR 8577-GLY 2285-GNH 9461-GLS	Cuenca Minera 0594-DNY 2688-DNL 4234-GNL	Condado 8950-GLY (2 turnos) 7531-GLR (2 turnos)	Aracena 0594-DNY 2688-DNL 4234-GNL	Andévalo 8950-GLY (2 turnos) 7531-GLR (2 turnos)
Alájar	HU					LS	
Aljaraque	HU						
Almonaster la Real							
Almonte							
Alosno							AN
Aracena						LS	
Aroche							
Ayamonte			RE	RE			
Beas		HU					
Bellavista (Aljaraque)	HU						
Berrocal				CA			
Bonares		HU		CA			
Buitron (Zalamea la Real)				CA			
Cabezas Rubias							AN
Cala						LS	
Calañas							AN
Campofrío				CA			
Candón (Beas)		HU					
Cañaverál de León						LS	
Cartaya	RE	RE					
Castaño del Robledo							
Chucena					VI		
Clarines		S/ET					
Corrales (Aljaraque)	HU						
Cortegana							
Cortelazor							
Costa Esuri (Ayamonte)			RE				
Cumbres de En medio							
Cumbres de San Bartolomé							
Cumbres Mayores							
Dehesa Golf (Aljaraque)	HU						
El Almendro							AN
El Campillo				CA	CA		
El Cerro de Andévalo							AN
El Granada							AN
El Perrunal (Calañas)							AN
El Portil (Cartaya)	RE						
El Pozuelo (Zalamea la Real)				CA			
El Rompido (Cartaya)	RE						
El Villar (Zalamea la Real)				CA			
Encinasola							
Escacena del Campo					VI		
Fuente de la Corcha (Beas)		HU					
Fuenteheridos						LS	
Galarzo						LS	
Gibraleón							
Higuera de la Sierra							
Hinojales						LS	
Isla Canela (Ayamonte)			RE				
Isla Cristina			RE	RE			
Islantilla (Isla Cristina)			RE				
Jabugo							
La Dehesa de Riotinto				RI			
La Granada de Riotinto				CA			
La Nava							
La Puebla de Guzmán							AN
La Redondela (Isla Cristina)			RE				
La Umbría (Aracena)						LS	
La Zarza (Calañas)							AN
Las Delgadas (Zalamea la Real)				CA			
Linares de la Sierra						LS	
Los Marines							
Lucena del Puerto		HU					
Manzanilla					VI		
Marigenta (Zalamea la Real)				CA			
Membrillo (Zalamea la Real)				CA			
Minas de Riotinto				CA			
Monte Sombrero (Zalamea la Real)				CA			
Navahermosa (Galarzo)						LS	
Navahermosa (Beas)		HU					
Nerva				CA			
Niebla							
Panyajo		S/ET	HU				
Paterna del Campo							
Paymogo		VI	VI				AN
Picos de Niebla							
Pozo Camino (Ayamonte)		HU					
Puerto Moral			RE			LS	
Punta del Moral (Ayamonte)			RE				
Punta Umbría	HU	HU					
Rociana del Condado		HU					
Rosal de la Frontera							
San Bartolomé de la Torre							AN
San Juan del Puerto			HU				
San Silvestre de Guzmán							RE
Sanlúcar de Guadiana							AN
Santa Ana la Real							
Santa Bárbara de Casa							AN
Santa Olalla del Cala						LS	
Sotiel Coronada (Calañas)							AN
Trasasierra (El Campillo)				CA			
Trigueros		HU	HU				
Urbasar (Isla Cristina)			RE				
Valdelarco						LS	
Valverde del Camino					VI		
Villablanca			RE				
Villalba del Alcor					VI		
Villanueva de las Cruces							AN
Villanueva de los Castillejos							AN
Villarrasa					VI		
Zalamea la Real				CA			
Zufre						LS	

Código de colores

Estaciones de transferencia:

- AN Andévalo
- CA El Campillo
- HU Huelva
- RE La Redondela
- LS Linares de la Sierra
- VI Villarrasa

Bases:

- Isla Cristina
- Aracena
- Andévalo
- Condado
- Cuenca Minera
- Punta Umbría
- Trigueros

Tabla 2.3: Poblaciones con Estaciones de Transferencia y Base de Vehículos

3. Modelo MILP básico

En nuestro caso vamos a optimizar, inicialmente, la distancia recorrida por los vehículos de recogida de residuos urbanos, abordándolo desde el punto de vista de la programación lineal entera-mixta (MILP).

Tenemos diferentes Municipios de la provincia de Huelva y varias Estaciones de transferencias, de manera que cada municipio tiene asignado una de ellas. Los vehículos de recogida se agrupan en Bases en las que existen un número determinado de vehículos de igual o diferentes características que tienen asignado la labor de la recogida de los residuos sólidos con una zona de actuación (municipios) previamente determinada.

Dadas las características del servicio no se consideran ventanas de tiempo.

De esta manera nuestro problema se subdivide en diferentes problemas similares en los que tenemos un grupo de municipios asociados, inicialmente a una única Base de Vehículos y esta con un grupo determinado de vehículos llevarían los residuos recogidos a una o varias Estaciones de Transferencia.

Vamos a partir del algoritmo más sencillo posible basado en el que resuelve *el problema del viajante* y lo iremos adaptando poco a poco a las especificaciones del problema completo. El *problema del viajante* consiste en lo siguiente: un viajante tiene que visitar un número determinado de ciudades de manera que visite todas pasando por cada una de ellas una vez y regresando al punto de partida al terminar.

Sea c_{ij} el coste de ir del punto i al j . x_{ij} es una variable binaria que tiene el valor 1 si después de visitar el punto i visita el j y 0 en el resto de los casos.

El objeto de nuestro modelo es por tanto minimizar el coste (p.e. distancia) total al recorrer todos los puntos. Es decir minimizar:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n c_{ij} \cdot x_{ij}$$

Siendo el punto 0 el de partida y de término y $1..n$ los n puntos (poblaciones) a visitar.

Las primeras condiciones que debe cumplir el modelo es que desde un punto i cualquiera solo se vaya a uno y solo uno j :

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n x_{ij} = 1, \forall i \in \{0..n\}$$

Y que a un punto cualquiera j solo se pueda llegar desde uno y solo uno i :

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n x_{ij} = 1, \forall j \in \{0..n\}$$

En este punto nos surge el primer problema: se podrían dar varios circuitos independientes, por ejemplo si tenemos que recorrer siete puntos (del 1 al 7) partiendo del punto 0, se podría dar el recorrido $0 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 0, 5 \rightarrow 3, 3 \rightarrow 5$, que no es lo que queremos. Para evitar esto añadimos una tercera condición:

$$u_i - u_j + n \cdot x_{ij} \leq n - 1, \forall i, j \in \{1..n\}, i \neq j$$

Siendo u_i y u_j variables auxiliares enteras.

Ya tendríamos el modelo que resuelve el problema del viajante. Saldría del punto 0 y recorrería los n puntos formando un ciclo. Con este sencillo planteamiento ya nos puede dar una idea de la complejidad computacional que esconde su resolución. Este modelo tiene las siguientes variables: $n \cdot (n+1)$ variables x_{ij} y n variables u_i . Y las siguientes restricciones: $(n+1)$ de la primera, $(n+1)$ de la segunda y $n \cdot (n-1)$ de la tercera. Para hacernos una idea, si tenemos 70 poblaciones y una única estación de transferencia estamos hablando de 5.040 variables y 4.972 restricciones.

En nuestro caso habría que añadir algunas variantes que nos implica otras restricciones. Empecemos por el número de vehículos. Antes era una sola persona o vehículo quien recorría todos los puntos, pues bien, en nuestro caso es un grupo de vehículos los que se reparten la ruta. Así pues, añadimos esta variante. Ahora tendríamos tantas rutas como vehículos. Estamos en un problema de VRP (*Vehicle Route Problem*)

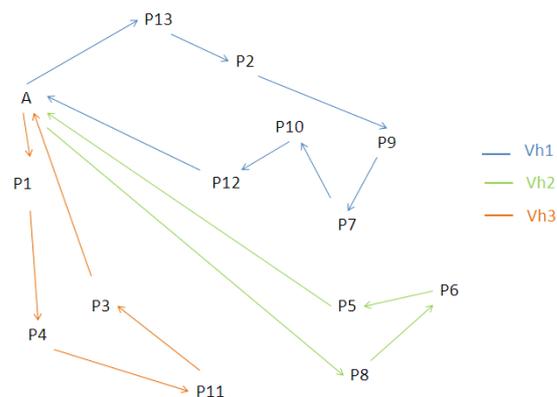


Figura 3.1: Esquema VRP para tres vehículos

Vemos en la figura 3.1 un caso para tres vehículos. Para la formulación introducimos otro subíndice: el vehículo. Ahora la función a minimizar quedaría así:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \sum_{k=1}^{N_C} C_{ij} \cdot x_{ijk}$$

Siendo k el nuevo subíndice y N_C el número de vehículos.

Si mantenemos las dos primeras restricciones como están para cada vehículo, estaríamos obligando a que todos los vehículos recorrieran todas las poblaciones, recogieran o no basura en cada una de ellas, situación que estaría en contra de nuestro objetivo de optimización. La obligatoriedad de recorrer todos los puntos la corregimos cambiando el signo “=” de las dos primeras restricciones por el “≤”, de manera que también admitamos el 0, es decir, que no tenga que existir un trayecto i, j para un vehículo determinado.

En este punto, el modelo podría no hacer ningún recorrido, ya que solo le estamos pidiendo que minimice el coste, y ahora lo cumpliría si no sale ningún vehículo.

Introducimos la condición impuesta por la demanda: la basura generada por los municipios hay que recogerla en su totalidad.

Para esto tenemos que introducir nuevas variables, en este caso asociadas a cada población. Y además un nuevo parámetro: la demanda, es decir, la basura generada por cada municipio.

Sea y_{jk} la variable (real o entera) que nos indica la cantidad de basura que el vehículo k recoge del municipio j . RM_j sería la cantidad de basura generada por el municipio j .

La cuarta restricción que habríamos que añadir sería la obligatoriedad de recoger toda la basura:

$$\sum_{k=1}^{N_C} y_{ik} \cdot x_{ijk} = RM_i \quad \forall i \in \{0..n\}, \forall j \in \{1..n\}, j \neq i$$

Que no es lineal y que lógicamente habría que linealizar al implementar el modelo.

En este momento se recoge toda la basura y los vehículos van (x) donde recogen (y). El problema que nos surge ahora es que al suavizar las dos primeras restricciones ya no estamos obligando a realizar el recorrido completo, por ejemplo, los siguientes recorridos son válidos:

0 → 5, 5 → 2, 1 → 4 con el vehículo 1 y 0 → 3, 2 → 1 con el vehículo 2 y la basura la recogen: el vehículo 1: municipios 2, 4 y 5; vehículo 2: 1 y 3. Esto cumple con las condiciones impuestas actualmente pero observamos que:

1. los tramos no son consecutivos,
2. estamos en municipios dónde no recogemos basura y

3. no terminamos en el punto inicial.

Luego las condiciones impuestas no son suficientes. Podríamos imponer la siguiente restricción para que los tramos sean consecutivos y así resolvamos el primer inconveniente:

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq s}}^n x_{isk} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq s}}^n x_{sjk}, \forall s \in \{0..n\}, \forall k \in \{1..N_c\}$$

Con esta restricción hemos corregido el punto 1. Dejamos pendiente, de momento, los puntos 2 y 3.

Al no tener la capacidad de los vehículos limitada, podríamos hacer todo el recorrido con un solo vehículo. Introduzcamos ahora la limitación de la capacidad de los vehículos haciendo que la suma de las cantidades recogidas por los vehículos no supere su capacidad máxima:

$$\sum_{j=1}^{NP} y_{jk} \leq CargaMax_k, \forall k \in 1..NC$$

siendo **CargaMax_k** la carga máxima que tiene permitida el vehículo **k**

El problema que nos encontramos ahora es que la suma de las capacidades máximas de los vehículos no tiene por qué ser igual o superior a la demanda y, por tanto, estaremos obligados a aumentar el tamaño de la flota o, lo que es más operativo, hacer varios viajes con cada vehículo hasta satisfacer la demanda.

Establezcamos ahora una cota en el número máximo de viajes por vehículo: **N_v**, e introduzcamos un nuevo subíndice: **v**, el número de viaje de cada vehículo. La función a minimizar nos quedaría ahora de la siguiente manera:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{v=1}^{N_v} C_{ij} \cdot x_{ijkv}$$

Las dos primeras restricciones nos quedaría de la siguiente manera:

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n x_{ijkv} \leq 1, \forall i \in \{0..n\}, \forall k \in \{1..N_c\}, \forall v \in \{1..N_v\}$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n x_{ijkv} \leq 1, \forall j \in \{0..n\}, \forall k \in \{1..N_c\}, \forall v \in \{1..N_v\}$$

La tercera restricción quedaría así:

$$u_i - u_j + n \cdot x_{ijkv} \leq n - 1, \forall i, j \in \{1..n\}, i \neq j, \forall k \in \{1..N_c\}, \forall v \in \{1..N_v\}$$

La cuarta restricción todavía sin linealizar quedaría así:

$$\sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{N_v} y_{jk} \cdot x_{ijkv} = RM_i \forall i \in \{0..n\}, \forall j \in \{1..n\}, j \neq i$$

Los vehículos no pueden trabajar todo el tiempo que deseemos, sino que hay que restringir su uso. El límite puede ser debido a diferentes causas:

- Si el vehículo es conducido por un único conductor podemos establecer cómo límite de uso diario las horas máximas diarias que el convenio permite
- Si el vehículo es de contratación externa, estableceremos el límite de la contratación
- Si se establecen turnos de conductores podríamos establecer el máximo en 24 horas.

Pero lo cierto es que no hay una regla para todos los vehículos, por lo que cada vehículo tendrá un límite superior particular. El tiempo se emplea fundamentalmente en el recorrido, no obstante tenemos que tener en cuenta otros componentes, como el tiempo de recogida del contenedor o el de vaciado del vehículo.

Si disponemos de los *tracks* actuales podemos determinar los parámetros necesarios, como por ejemplo la velocidad media entre poblaciones o el tiempo medio de recogida de un contenedor. El tiempo de vaciado del camión lo establecemos como la diferencia entre el momento en el que el vehículo cargado entra en la estación y el momento en el que sale vacío para realizar un nuevo viaje.

La restricción debida al tiempo de recorrido sería:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \sum_{v=1}^{N_v} \frac{d_{ij} \cdot x_{ijkv}}{VM_k} \leq Tdis_k, \forall k \in 1..NC$$

Siendo VM_k la velocidad media en carretera de cada vehículo, $Tdis_k$ el tiempo de disponibilidad de cada vehículo, añadiéndole los tiempos transcurridos en el interior de cada población, de recogida de contenedores y de vaciado.

Seguimos sin corregir los problemas 2 y 3 anteriores. Empecemos por el 3: para que los vehículos vuelvan a la estación de transferencia que es de donde salieron, imponemos la siguiente restricción:

$$\sum_{j=1}^n x_{0_jkv} = \sum_{i=1}^n x_{i_0kv}, \forall k \in 1..NC, \forall v \in 1..NV$$

El primer miembro representa la salida y el segundo la llegada. Si el primer miembro vale 1 (el vehículo en ese viaje salió) el segundo miembro también valdrá 1 (el vehículo en ese viaje, regresa).

Solo nos queda corregir el punto 2, es decir, el vehículo va a un Municipio si es para recoger basura:

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n x_{ijkv} \leq y_{jkv}, \forall j \in 1..n, \forall k \in 1..NC, \forall v \in 1..NV$$

El modelo así definido podríamos considerarlo completo.

Otra consideración es fijar el criterio a optimizar. Hemos supuesto inicialmente la distancia recorrida por ser el valor que posiblemente más influya en el coste. Si queremos minimizar el coste deberíamos introducir en el modelo otras consideraciones. La distancia recorrida sería fácil pasarla a coste introduciendo el parámetro de consumo medio o mejor el coste por kilómetro que ya incluye los mantenimientos y reposiciones de piezas de uso.

Existirían otros costes no relacionados con el uso del vehículo como por ejemplo su disponibilidad, que por el hecho de estar preparado el vehículo en el garaje con su conductor tiene un coste. En este coste podemos considerar el salario del conductor, la amortización del vehículo, impuestos y seguro. Al considerar estos costes el modelo debería preferir maximizar el número de viajes de un vehículo que aumentar el número de vehículos.

Vamos a trabajar con un parámetro que llamaremos **factor de compresión** que engloba varios conceptos. Lo vamos a definir como el volumen (m³) que alcanza el contenido de un contenedor dentro del camión una vez prensado. Intervienen varias variables:

- el volumen del contenedor,
- la capacidad de prensado del sistema de recogida del vehículo y
- lo lleno o vacío que esté el contenedor en el momento de su recogida.

Este último aspecto depende fuertemente de la estacionalidad ya que en verano y en invierno pueden existir el mismo número de contenedores pero su llenado es claramente diferente, especialmente en las zonas costeras. Este parámetro lo vamos a trabajar desde la hoja de cálculo auxiliar de donde CPLEX lee únicamente el número de contenedores que un vehículo en particular puede recoger, dejando la tarea de la conversión de la capacidad del vehículo al número de contenedores, a través del factor de compresión, a esta hoja. Para cada sistema de recogida y para estación lo calcularemos de forma empírica aprovechando las estadísticas actuales.

Para el planteamiento de la estacionalidad vamos a suponer que el número de contenedores es el mismo y que solo cambian dos valores:

- Existencia o no de vehículos de refuerzo en época estival
- Factor de compresión (menor en época estival)

4. Refinado del modelo básico

La metodología que vamos a utilizar será implementar de forma sucesiva modelos cada vez más ajustados a las características del problema. Iremos describiendo, en cada modelo, las características que lo definen.

En el primer y segundo modelo definimos una única Base y Estación de Transferencia. En el primero la hacemos coincidir, despreciando el desplazamiento entre ambas, haciendo que los recorridos empiecen y terminen en la Estación de Transferencia. En el segundo modelo, sin embargo, ya los vehículos parten de la base, donde también terminan su jornada aunque descarguen siempre en las Estaciones de Transferencia. El tercer modelo usa una única Base de vehículos pero con dos Estaciones de Transferencia. En este modelo estableceremos dos variantes, una primera en el que no forzamos el uso de ambas Estaciones y una segunda en que si lo hacemos. El cuarto modelo, el más completo del estudio, se plantea con una única base de vehículos y con un número variable de Estaciones de Transferencia. Con este cuarto modelo se podrían abordar todos los casos.

Primer MODELO

Primer MODELO

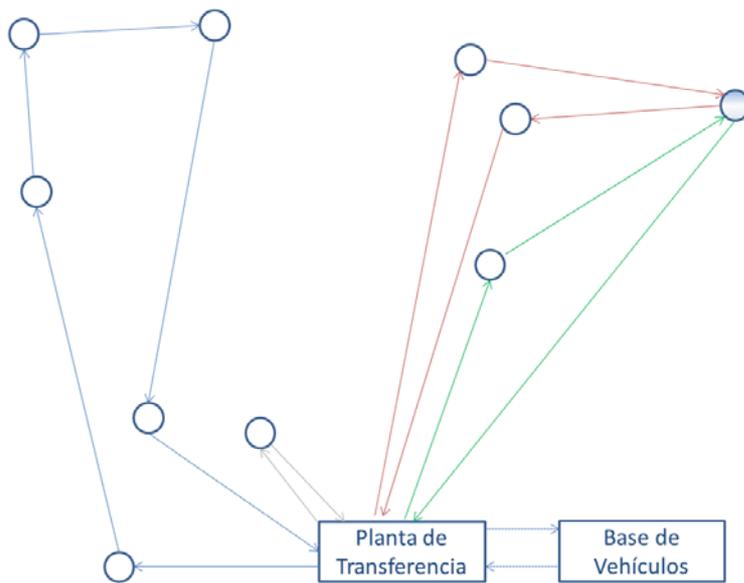


Figura 4.1: Esquema Primer Modelo

Consideraciones particulares del modelo:

En este primer modelo, que mostramos en la figura 4.1, introducimos las siguientes consideraciones particulares:

- la **función objetivo** será principalmente la distancia recorrida por los vehículos de recogida (modificada, como ya veremos)
- considerando que los vehículos parten y terminan en las Estaciones de transferencia o Bases de vehículos, ya que estas, supuestamente, coincidirían. El supuesto obliga a que los vehículos vayan y vuelvan de las Estaciones de Transferencia, reduciendo el tiempo disponible en el empleado en recorrer este tramo. La distancia y el tiempo empleado entre la Estación de Transferencia y la Base de Vehículos se desprecia.
- No se considera la distancia recorrida ni el tiempo dentro de las poblaciones

A este supuesto podríamos aproximar las siguientes Bases que trabajan con una Estación de Transferencia exclusivamente:

<u>BASE</u>	<u>ESTACIÓN DE TRANSFERENCIA</u>
Aracena	Linares de la Sierra
Condado	Villarrasa
Cuenca Minera	El Campillo
Isla Cristina	La Redondela

Tabla 4.1: Bases de vehículos asociadas al Primer Modelo

En estos casos todos los vehículos y contenedores son del mismo tipo: de carga trasera.

No se tendrá en cuenta otros criterios de coste.

Los índices indican los municipios desde el 1 al NP, siendo NP el número de municipios a considerar en el caso. El subíndice 0 se reserva a la estación de transferencia, de donde salen los vehículos y donde vuelven para su vaciado y, si acaso, vuelta a salir con el vehículo vacío.

Cuando el índice vaya de 1 a número de poblaciones hablaremos de poblaciones o municipios y cuando el índice vaya de cero al número de poblaciones hablaremos de puntos (que incluiría la estación de transferencia y los municipios).

Usaremos los subíndices i y j para las poblaciones y estación de transferencia, k para los vehículos y v para los viajes.

El número de vehículos no se optimiza sino que entra al modelo como parámetro.

PARÁMETROS

NP	int	Número de poblaciones o municipios
NC	int	Número de vehículos asociados a la Estación de Transferencia
NV	int	Número máximo de viajes por vehículo

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

d_{ij}	float	Distancia entre el punto i al j . Tanto i como j van desde 0 a NP. En kilómetros
TR	float	Tiempo (en horas) que se tarda en recoger un contenedor
RM_i	int	Cantidad de basura generada en la población i . En número de contenedores. i entre 1 y NP.
U	int	Cota superior de $RM(i)$
$CargaMax_k$	int	Carga máxima de cada vehículo en número de contenedores; k entre 1 y NV
$TJor_k$	int	Tiempo (horas) máximo de disponibilidad de cada vehículo
VM_k	float	Velocidad media de cada vehículo en carretera
$T_Vaciado$	float	Tiempo que tardamos en dejar el camión listo para la siguiente recogida
$PesoNumViajes$	Int	Valor utilizado con la variable n_viaj en la función objetivo
$PesoNumVisitas$	int	Valor utilizado con la suma de las variables n_vis_j en la función objetivo

VARIABLES DE DECISIÓN

x_{ijkv}	bin	Si es 1, el vehículo recorre el tramo del punto i al j , entrando en ambos lugares que, si son municipios, es para recoger basura. Tanto i como j varían entre 0 y NP.
y_{jkv}	Int	Cantidad de basura (número de contenedores) que el vehículo k en el viaje v recoge del municipio j ; j varía entre 1 y NP
u_j	Int	Variable auxiliar que utilizamos para evitar subitinerarios desconectados
z_{ijkv}	int	Variable auxiliar que utilizamos para linealizar una restricción; i varía entre 0 y NP, j entre 1 y NP

VARIABLES AUXILIARES

Estas variables las utilizamos para recoger datos que nos indican el funcionamiento del servicio y que normalmente las volcamos en la hoja de cálculo auxiliar.

t_rec_{kv}	float	Tiempo empleado, exclusivamente en el recorrido , por cada vehículo k en cada viaje v :
---------------	-------	----------------------------------------------------------------------------------------------------

			$t_{rec_{kv}} = \sum_{i=0}^{NP} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP} d_{ij} \cdot \frac{x_{ijkv}}{VM_k}$
$t_{con_{kv}}$	float	Tiempo empleado por cada vehículo (k) en recoger todos los contenedores durante un viaje (v):	$t_{con_k} = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv} \cdot TR$
t_{vac_k}	float	Tiempo que emplea cada vehículo en estar disponible:	$t_{vac_k} = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} x_{i0kv} \cdot T_{Vaciado}$
t_{veh_k}	float	Tiempo total empleado por cada vehículo:	$t_{veh_k} = \sum_{v=1}^{NV} t_{rec_{kv}} + t_{con_k} + t_{vac_k}$
$c_{veh_{kv}}$	int	Basura (número de contenedores) recogida por un vehículo (k) en cada viaje (v):	$c_{veh_{kv}} = \sum_{j=1}^{NP} y_{jkv}$
$d_{veh_{kv}}$	float	Distancia recorrida (en kms) por el vehículo k en cada viaje v:	$d_{veh} = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{NP} x_{ijkv} \cdot d_{ij}$
$d_{Recorrida}$	float	Distancia recorrida por todos los vehículos:	$d_{Recorrida} = \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} d_{veh_{kv}}$
$y_{TV_{ik}}$	int	Cantidad recogida en cada municipio por población y vehículo. Almacenamos el número de contenedores que recogemos por cada camión y en cada municipio:	$y_{TV_{ik}} = \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}$
n_{viaj}	int	Número total de viajes. Es el número total de viajes realizados por todos los vehículos:	$n_{viaj} = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} x_{0jkv}$
n_{vis_j}	Int	Número de visitas a la población. El número de veces que una población es visitada por camiones para que le recogen toda o parte de la basura:	

$$n_vis_j = \sum_{i=0}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} x_{ijkv}$$

FUNCIÓN OBJETIVO

Minimizar la distancia recorrida por todos los vehículos en todos los viajes que realicen para recoger los residuos influenciada con el número de vehículos y de viajes. Es decir, tenemos que minimizar la siguiente función de coste:

$$\sum_{i=0}^{NP} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} d_{ij} \cdot x_{ijkv} + \text{PesoNumViajes} \cdot n_viaj + \text{PesoNumVisitas} \cdot \sum_{j=1}^{NP} n_vis_j$$

Para poder monitorizar algunos valores vamos a descomponer la función:

Minimizar ***d_Recorrida***, siendo esta:

$$d_Recorrida = \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} d_veh_{kv}$$

$$d_veh_{kv} = \sum_{i=0}^{NP} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP} x_{ijkv} \cdot d_{ij}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIONES

RESTRICCIÓN 01: Solo una rama de salida

Desde cualquier punto solo podremos ir a otro, con un determinado vehículo y viaje:

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP} x_{ijkv} \leq 1, \forall i \in \{0..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 02: Solo una rama de llegada

A cualquier punto solo podemos llegar desde uno, con un determinado vehículo y viaje:

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP} x_{ijkv} \leq 1, \forall j \in \{0..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 03: Recorridos inconexos

Para evitar recorridos inconexos como $3 \rightarrow 7, 7 \rightarrow 3$ y $0 \rightarrow 4, 4 \rightarrow 8, 8 \rightarrow 9, 9 \rightarrow 0$. Lo que evitamos con esta restricción es que si un tramo $i-j$ se recorre no se pueda hacer el inverso: $j-i$. Hemos exceptuado el índice 0 ya que si admitimos ir desde la estación de transferencia a un municipio y volver:

$$u_i - u_j + NP \cdot x_{ijkv} \leq NP - 1, \forall i, j \in \{1..NP\}, i \neq j, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 04: Gestión de la demanda

Se ha de recoger toda la basura generada en cada municipio. La suma de los productos de y_{jkv} (cantidad de basura que el vehículo k en su viaje v recoge del municipio j) por x_{ijkv} (que nos indica que el vehículo k en su viaje v llega al municipio j procedente del punto i) para todos los vehículos y durante todos los viajes se debe ser igual a la demanda del municipio j . Es necesario multiplicar los valores de y por x para que esta variable no trabaje de forma independiente de x . Si no lo hiciéramos así, estaríamos contabilizando basura recogida de los municipios sin haber pasado por ellos:

$$\sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} y_{jk} \cdot x_{ijkv} = RM_j, \forall i \in \{0..NP\}, \forall j \in \{1..NP\}, j \neq i$$

El problema que nos encontramos es que el producto de dos variables (una entera y la otra binaria) ya no nos permite plantear un sistema de ecuaciones lineales. Podemos cambiar esta restricción por las siguientes cuatro restricciones lineales, utilizando una variable auxiliar z :

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} z_{ijkv} = RM_j, \forall j \in \{1..NP\}$$

$$z_{ijkv} \leq U \cdot x_{ijkv}, \forall i \in \{0..NP\}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{NP} z_{ijkv} \leq y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP} z_{ijkv} \geq y_{jkv} - U \cdot (1 - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP} x_{ijkv}), \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 04-B: Gestión de la demanda. No la utilizo (LINEAL)

En vez de la restricción anterior, esta opción es más sencilla:

$$\sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} y_{jk} = RM_j, \forall j \in \{1..NP\}$$

Y para evitar que x valga continuamente 0 a pesar de valer $y > 0$:

$$\frac{y_{jkv}}{U} \leq \sum_{i=0}^{NP} x_{ijkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\},$$

Siendo U una cota superior de RM

RESTRICCIÓN 05: No ir sin recoger

Para evitar recorrer lugares donde no se recoge basura, es decir para evitar situaciones como : $y = 0$ con $\sum x = 1$ (no recojo basura a pesar de haber llegado):

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP} x_{ijkv} \leq y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 06: Ramas muertas

Para evitar tramos de recorridos que no sean consecutivos, es decir llegar a un municipio determinado y luego no salir de él. Impondríamos la siguiente restricción:

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq s}}^{NP} x_{iskv} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq s}}^{NP} x_{sjkv}, \forall s \in \{0..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

Que viene a indicar que para un vehículo y viaje determinado, salgo del municipio s si y solo si llego a él.

RESTRICCIÓN 07: Capacidad de los vehículos

Introduzcamos ahora la limitación de la capacidad de los vehículos haciendo que la suma de las cantidades recogidas por los vehículos no supere su capacidad máxima:

$$\sum_{j=1}^{NP} y_{jkv} \leq C \text{ arg } aMax_k, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

En cada viaje de cada vehículo, todas las cantidades de basura recogidas en los diferentes municipios no pueden superar la capacidad máxima del vehículo. Esta restricción la vamos a descomponer para poder dejar registro de las cantidades recogidas:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{NP} y_{jkv} = c_veh_{kv}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

$$c_veh_{kv} \leq C \text{ arg } aMax_k, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 08: Tiempos

El tiempo que emplea cada vehículo no puede superar su tiempo de disponibilidad, que si va asociado a un conductor específico, este tiempo coincidiría con la jornada de trabajo. El tiempo lo emplea en:

- i. Recorrer desde la estación de transferencia al primer municipio, recorrer los municipios donde recoge basura, regresar a la estación. (t_rec):

$$t_rec_{kv} = \sum_{i=0}^{NP} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP} \frac{d_{ij} \cdot x_{ijkv}}{VM_k}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

ii. Recoger los contenedores (**t_con**):

$$t_con_{kv} = \sum_{j=1}^{NP} TR \cdot y_{jkv}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

iii. Preparación de camión para su uso en el siguiente viaje (vaciar la basura, fundamentalmente) (**t_vac**):

$$t_uso_k = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} T_vaciado \cdot x_{i0kv}, \forall k \in \{1..NC\}$$

La restricción sería:

$$\sum_{v=1}^{NV} t_rec_{kv} + \sum_{v=1}^{NV} t_con_{kv} + t_uso_k \leq TFor_k, \forall k \in \{1..NC\}$$

RESTRICCIÓN 09: Vuelta a la estación

Para que los vehículos vuelvan a la estación de transferencia que es de donde salieron, imponemos la siguiente restricción:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i0kv} = \sum_{j=1}^{NP} x_{0jkv}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

El primer miembro representa la salida y el segundo la llegada. Si el primer miembro vale 1 (el vehículo en ese viaje salió) el segundo miembro también valdrá 1 (el vehículo en ese viaje, regresa).

PROBLEMAS

- Hay municipios que solo recoge un contenedor
- Utiliza un nuevo camión aunque tenga viajes disponibles de otro
- Usa un viaje 2 sin haber usado el 1

Segundo MODELO

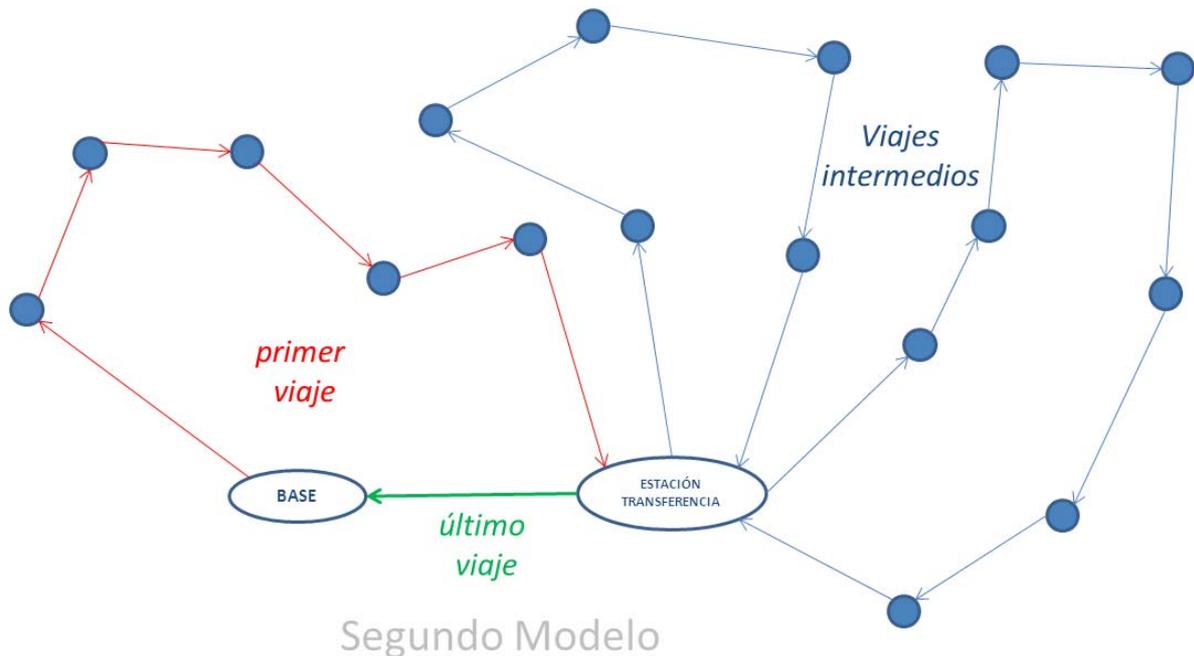


Figura 4.2: Esquema del Segundo Modelo

Consideraciones particulares del modelo:

Un esquema de este modelo podemos verlo en la figura 4.2. Seguimos tratando:

- Los vehículos comienzan y terminan su jornada en las bases, y descargan los residuos en una única Estación de Transferencia, de donde parten en el siguiente viaje.
- Consideramos la distancia recorrida y el tiempo empleado dentro de las poblaciones, base a un parámetro relacionado con el tamaño de la población y en una velocidad media única para todos los vehículos.
- La función objetivo se compone de tres sumandos: distancia recorrida total, número total de visitas (modificado con un peso) y número total de viajes (modificado con un peso).
- Las distancias entre los puntos las calculamos a partir de las coordenadas geográficas que nos entran como parámetros, es decir, son distancias geométricas.
- El tiempo medio de recogida de un contenedor lo asociamos al sistema de recogida, dependiendo por tanto del tipo de vehículo.

- Al no disponer de los *tracks* de los vehículos, se ha supuesto que el recorrido de los vehículos dentro de la población es nueve veces su diámetro medio.
- Al no disponer de los datos actuales de recogida, se ha supuesto que la capacidad de un contenedor, una vez prensado en el vehículo es inferior. Este factor de compresión se introduce como parámetro del modelo; en general 1/15.
- En este modelo consideramos las siguientes bases (ver tabla 4.2):

<u>Base</u>	<u>Estaciones de Transferencia</u>
Aracena	Linares de la Sierra
Condado	Villarrasa
Cuenca Minera	El Campillo
Isla Cristina	La Redondela

Tabla 4.2: Bases de vehículos asociadas al Segundo Modelo

PARÁMETROS

NP	int	Número de poblaciones o municipios
NC	int	Número de vehículos asociados a la estación de transferencia
NV	int	Número máximo de viajes por vehículo
muni	range	1..NP. Solo Municipios
aMuni	string	Array con los municipios
sMuni	{string}	Conjunto con los municipios
base	range	0..NP. Municipios y Base de vehículos. El subíndice 0 corresponde a la Base de vehículos.
aBase	string	Array con la Base de vehículos y los municipios.
sBase	{string}	Conjunto con la Base de vehículos y los municipios.
tran	range	1..NP+1. Municipios y Estación de Transferencia. El subíndice NP+1 corresponde a la Estación de Transferencia
aTran	string	Array con la Estación de Transferencia y los municipios.

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS
URBANOS

sTran	{string}	Conjunto con la Estación de Transferencia y los municipios
punt	range	0..NP+1. Municipios, Estación de Transferencia y Base de vehículos. El subíndice 0 corresponde a la Base de vehículos. El NP+1 corresponde a la Estación de Transferencia.
aPunt	string	Array con la Base de vehículos, la Estación de Transferencia y los municipios
sPunt	{string}	Conjunto con la Base de vehículos, la Estación de Transferencia y los municipios
vehi	range	1..NC
aVehi	string	Array con las matrículas de los vehículos
sVehi	{string}	Conjunto con las matrículas de los vehículos
viaj	range	1..NV
viaT	range	1..(NV+1): Incluimos el viaje de regreso a la Base.
d_{ij}	float	Distancia entre el punto <i>i</i> al <i>j</i> . Tanto <i>i</i> como <i>j</i> van desde 0 a NP+1 , (kilómetros) $d_{12} = 6371.a \cos(\cos(lat_1).cos(lat_2).cos(lon_2 - lon_1) + \sin(lat_1).sin(lat_2))$
TR(vehi)	float	Tiempo (horas) que se tarda en recoger un contenedor. Depende del sistema de recogida (tipo de contenedor y vehículo) que usemos.
RM(sMuni)	int	Cantidad de basura generada en la población <i>i</i> (número de contenedores).
U	Int	Cota superior de RM(i) y, por tanto, de y .
CargaMax(vehi)	int	Carga máxima permitida de cada vehículo (número de contenedores).
TJor(vehi)	int	Tiempo (horas) máximo de disponibilidad de cada vehículo.
VM(vehi)	float	Velocidad media (km/h) de cada vehículo en carretera
VP	float	Velocidad media (km/h) de los vehículos en población. La consideramos igual para todos los vehículos y en todas las poblaciones.
T_Vaciado	float	Tiempo (horas) que tardamos en descargar el vehículo y dejarlo listo para la siguiente recogida. Existirá siempre después de cada recogida, incluida la última.

<i>DiamMed</i>(sMuni)	float	Diámetro (kilómetros) medio de cada población. Recorrido aproximado que realizamos cada vez que entremos en la población.
<i>RecPob</i>(sMuni)	float	Recorrido (kilómetros) que realizaríamos si recogeríamos todos los contenedores de la población. Se contabiliza una vez que estamos dentro de la población y se termina al recoger el último contenedor.
<i>PesoNumViajes</i>	Int	Valor utilizado con la variable <i>n_viaj</i> en la función objetivo para decidir su influencia en esta.
<i>PesoNumVisitas</i>	int	Valor utilizado con la variable <i>n_vis_tot</i> en la función objetivo para decidir su influencia en esta.
<i>lat</i>(sPunt)	float	Latitud geográfica (en grados) de la Base de vehículos, Estación de Transferencia y municipios
<i>lon</i>(sPunt)	float	Longitud geográfica (en grados) de la Base de vehículos, Estación de Transferencia y municipios

PARÁMETROS CALCULADOS MEDIANTE SCRIPT

<i>d_{ij}</i>	float	Distancia entre puntos
<i>latRd</i>	float	Latitud de cada punto en radianes
<i>lonRd</i>	float	Longitud de cada punto en radianes

VARIABLES DE DECISIÓN

<i>x_{ijkv}</i>	bin	Si es 1 , el vehículo recorre el tramo del punto <i>i</i> al <i>j</i> , entrando en ambos lugares, que si son municipios para recoger basura. Tanto <i>i</i> como <i>j</i> pueden entre 0 y NP+1 , dependiendo del caso.
<i>y_{jkv}</i>	Int	Cantidad de basura (número de contenedores) que el vehículo <i>k</i> en el viaje <i>v</i> recoge del municipio <i>j</i> ; <i>j</i> varía entre 1 y NP
<i>u_j</i>	Int	Variable auxiliar que utilizamos para evitar subitinerarios desconectados. <i>j</i> entre 0 y NP . <i>u_j</i> entre 0 y 100 .
<i>z_{ijkv}</i>	int	Variable auxiliar que utilizamos para linealizar una restricción; <i>i</i> varía entre 0 y NP+1 , <i>j</i> entre 1 y NP .

VARIABLES AUXILIARES

Estas variables las utilizamos para recoger datos que nos indican el funcionamiento del servicio y que algunas de ellas las volcamos en la hoja de cálculo auxiliar.

$t_{rec_{kv}}$ float **Tiempo empleado para recorrer todos los tramos** (incluidos Base de vehículos y Estación de Transferencia), por cada vehículo k en cada viaje v , excluyendo el de regreso a la base:

$$t_{rec_{kv}} = \sum_{i=0}^{NP+1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP+1} d_{ij} \cdot \frac{x_{ijkv}}{VM_k}$$

t_{reg_k} float **Tiempo empleado en regresar a la Base de vehículos** (desde la Estación de Transferencia) una vez terminada la recogida:

$$t_{reg_k} = \frac{d_{NP+1,0}}{VM_k}$$

t_{con_k} float **Tiempo empleado por cada vehículo (k)** en recoger los contenedores de las poblaciones que recorre y durante todos sus viajes:

$$t_{con_k} = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv} \cdot TR_k$$

t_{vac_k} float **Tiempo que emplea cada vehículo en estar disponible.**
Observemos que contamos las veces que se llega a la Estación de Transferencia (siempre con el vehículo cargado) y lo multiplicamos por el tiempo medio de vaciado de un vehículo:

$$t_{vac_k} = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} x_{i,NP+1,k,v} \cdot T_{Vaciado}$$

t_{pob_k} float **Tiempo de recorrido por vehículo en el interior de las poblaciones.**
Excluimos el tiempo dedicado a recoger los contenedores:

$$t_{pob_k} = \frac{d_{pob_k}}{VP}$$

t_{veh_k} float **Tiempo total empleado por cada vehículo:**

$$t_{veh_k} = \sum_{v=1}^{NV} t_{rec_{kv}} + t_{con_k} + t_{vac_k} + t_{reg_k} + t_{pob_k}$$

$c_{veh_{kv}}$ int **Carga (número de contenedores) recogida** por un vehículo k en cada viaje v :

$$c_{veh_{kv}} = \sum_{j=1}^{NP} y_{jkv}$$

$d_{veh_{kv}}$ float **Distancia recorrida** (en kms) por el vehículo k en cada viaje v :

$$d_{veh_{kv}} = \sum_{i=0}^{NP+1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP+1} x_{ijkv} \cdot d_{ij}$$

d_{veh_tot} float **Distancia total recorrida (kms)** por todos los vehículos en todos sus viajes en los recorridos de recogida:

$$d_{veh_tot} = \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} d_{veh_{kv}}$$

d_{pob_k} float **Distancia recorrida por vehículo dentro de poblaciones.** Desde que entra hasta que sale de cada una de ellas. Sumamos las visitas del vehículo a cada población (por la distancia de entrada a cada una) y el recorrido por la población recogiendo los contenedores:

$$d_{pob_k} = \sum_{j=1}^{NP} n_{vis_{jk}} \cdot DiamMed_j + \sum_{j=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} \frac{RecPob_{jv}}{RM_j} \cdot y_{jkv}$$

d_{reg_tot} float **Distancia recorrida por todos los vehículos al regresar a la Base de vehículos (desde la estación de Transferencia):**

$$d_{reg_tot} = NC \cdot d_{NP+1,0}$$

$d_{Recorrida}$ float **Distancia total recorrida por todos los vehículos y durante todos los viajes:**

$$d_{Recorrida} = d_{veh_tot} + d_{reg_tot} + \sum_{k=1}^{NC} d_{pob_k}$$

$y_{TV_{ik}}$ int **Cantidad recogida en cada municipio por población y vehículo.** Almacenamos el número de contenedores que recogemos por cada camión y en cada municipio:

$$y_{TV_{ik}} = \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}$$

n_{viaj} int **Número total de viajes.** Es el número total de viajes realizados por todos los vehículos, incluidos los de vuelta a la Base de vehículos. Lo calculamos con tres sumandos: Los que salen de la Base (primer viajes, todos: NC), los que salen de la Estación de Transferencia (a partir del segundo viajes) para continuar la recogida y los que regresan a la Base desde la Estación (todos: NC):

$$n_{viaj} = NC + \sum_{j=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=2}^{NV} x_{NP+1,j,k,v} + NC$$

Otra manera de calcularlo es con dos sumandos: número de llegadas a la Estación de transferencia (para descargar) más los viajes de regreso a la Base de vehículos (todos: NC):

$$n_viaj = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=2}^{NV} x_{i,NP+1,k,v} + NC$$

n_vis_{jk} Int **Número de visitas a la población.** El número de veces que una población j es visitada por un vehículo k para que le recojan toda o parte de la basura:

$$n_vis_{jk} = \sum_{i=0}^{NP+1} \sum_{v=1}^{NV} x_{ijkv}$$

n_vis_tot Int **Número total de visitas a las poblaciones.** Sencillamente, total-zamos todas la visitas de todos los vehículos a todas la poblacio-nes:

$$n_vis_tot = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} n_vis_{jk}$$

FUNCIÓN OBJETIVO

Minimizar la distancia recorrida por todos los vehículos en todos los viajes que realicen para recoger los residuos con un cierto apoyo en el número total de viajes y de visitas. Es decir, tenemos que minimizar la siguiente función de coste:

$$d_Recorrida + PesoNumViajes.n_viaj + PesoNumVisitas.n_vis_tot$$

RESTRICCIONES

RESTRICCIÓN 01: Rama de salida

Desde cualquier población solo podremos ir a otra, con un determinado vehículo y viaje:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{NP} x_{ijkv} \leq 1, \forall i \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

Desde la Base de vehículos, con cada vehículo y en el primer viaje, iremos a una población y solo a una:

$$\sum_{j=1}^{NP} x_{0,jk1} = 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

En el resto de viajes, desde la Estación de Transferencia podremos ir a un solo municipio, si el vehículo sale en ese viaje:

$$\sum_{j=1}^{NP} x_{NP+1,j,k,v} \leq 1, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{2..NV\}$$

RESTRICCIÓN 02: Rama de llegada

A cualquier población solo podemos llegar desde otra, con un determinado vehículo y viaje:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{NP} x_{ijkv} \leq 1, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

A la Estación de Transferencia solo se puede llegar desde una única población excepto en el viaje de regreso:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,NP+1,k,v} \leq 1, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

El primer viaje nunca se llega a la Base de vehículos:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,0,k,1} \leq 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

RESTRICCIÓN 03: Recorridos inconexos

Para evitar recorridos inconexos entre poblaciones como $3 \rightarrow 7, 7 \rightarrow 3$. Lo que evitamos con esta restricción es que si un tramo $i-j$ se recorre no se pueda hacer el inverso: $j-i$. Hemos exceptuado el índice $NP+1$ ya que sí admitimos ir desde la Estación de Transferencia a un municipio y volver:

$$u_i - u_j + NP \cdot x_{ijkv} \leq NP - 1, \forall i, j \in \{0..NP\}, i \neq j, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 04: Gestión de la demanda

Se ha de recoger toda la basura generada en cada municipio. La suma de los productos de y_{jkv} (cantidad de basura que el vehículo k en su viaje v recoge del municipio j) por x_{ijkv} (que nos indica que el vehículo k en su viaje v llega al municipio j procedente del punto i) para todos los vehículos y durante todos los viajes se debe ser igual a la demanda del municipio j . Es necesario multiplicar los valores de y por x para que esta variable no trabaje de forma independiente de x . Si no lo hiciéramos así, estaríamos contabilizando basura recogida de los municipios sin haber pasado por ellos:

$$\sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv} \cdot x_{ijkv} = RM_j \forall i \in \{0..NP+1\}, \forall j \in \{1..NP\}, j \neq i$$

El problema que nos encontramos es que el producto de dos variables (una entera y la otra binaria) ya no nos permite plantear un sistema de ecuaciones lineales. Podemos cambiar esta restricción por las siguientes cuatro restricciones lineales, utilizando una variable auxiliar z :

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+1} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} z_{ijkv} = RM_j, \forall j \in \{1..NP\}$$

$$z_{ijkv} \leq U \cdot x_{ijkv}, \forall i \in \{0..NP+1\}, \forall j \in \{1..NP, j \neq i\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+1} z_{ijkv} \leq y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+1} z_{ijkv} \geq y_{jkv} - U \cdot (1 - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+1} x_{ijkv}), \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

Además, se debe satisfacer:

$$\sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv} = RM_i \forall j \in \{1..NP\}$$

RESTRICCIÓN 05: No ir sin recoger

Para evitar recorrer lugares donde no se recoge basura, es decir para evitar situaciones como $y = 0$ con $\sum x = 1$ (no recojo basura a pesar de haber llegado):

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+1} x_{ijkv} \leq y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 06: Ramas muertas

Para evitar tramos de recorridos que no sean consecutivos, es decir llegar a un municipio determinado y luego no salir de él. Imponemos la siguiente restricción:

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq s}}^{NP+1} x_{iskv} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq s}}^{NP+1} x_{sjkv}, \forall s \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

Que viene a indicar que para un vehículo y viaje determinado, se sale del municipio s si y solo si se llega a él.

RESTRICCIÓN 07: Capacidad de los vehículos

Introduzcamos ahora la limitación de la capacidad de los vehículos haciendo que la suma de las cantidades recogidas por los vehículos no supere su capacidad máxima:

$$c_veh_{kv} \leq C \text{ arg } aMax_k, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

En cada viaje de cada vehículo, todas las cantidades de basura recogidas en los diferentes municipios no pueden superar la capacidad máxima del vehículo.

RESTRICCIÓN 08: Tiempos

El tiempo que emplea cada vehículo no puede superar su tiempo de disponibilidad, que si va asociado a un conductor específico, este tiempo coincidiría con la jornada de trabajo:

$$t_veh_k \leq T\text{Jor}_k, \forall k \in \{1..NC\}$$

RESTRICCIÓN 09: Vuelta a la estación

En el primer viaje, cada vehículo que sale de la Base, regresa a la Estación de Transferencia:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,NP+1,k,1} = \sum_{j=1}^{NP} x_{0,jk1}, \forall k \in \{1..NC\}$$

En los viajes siguientes, excepto el último, cada vehículo sale y vuelve a la Estación de Transferencia:

$$\sum_{j=1}^{NP} x_{NP+1,j,k,v} = \sum_{i=1}^{NP} x_{i,NP+1,k,v}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{2..NV\}$$

El primer miembro representa la salida y el segundo la llegada. Si el primer miembro vale 1 (el vehículo en ese viaje salió) el segundo miembro también valdrá 1 (el vehículo en ese viaje, regresa).

RESTRICCIÓN 14: Recorrido Base a Estación de Transferencia

Los vehículos nunca van de la base a la estación (ya salen vacíos):

$$x_{0,NP+1,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 15: Regreso a la Base de vehículos

El último viaje (**NV+1**), cada vehículo lo emplea, exclusivamente, en volver a la base desde la Estación de Transferencia, ya vacío:

$$x_{NP+1,0,k,v+1} = 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

Y ninguno, en el último viaje (**NV+1**) vuelve a la Estación de Transferencia:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,NP+1,k,v+1} = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

En el resto de viajes, ninguno se realiza desde la estación de Transferencia a la Base de vehículos:

$$x_{NP+1,0,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 16: Recorrido poblaciones a Base

Los vehículos no vuelven a la base desde ningún municipio (con basura):

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} x_{i,0,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

RESTRICCIÓN 17: Salida desde la Base

Solo en el primer viaje se sale de la base:

$$\sum_{j=1}^{NP} x_{0,j,k,1} = 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

En el resto de viajes, ningún vehículo sale de la Base de vehículos:

$$\sum_{j=1}^{NP} \sum_{v=2}^{NV} x_{0,j,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

Tercer MODELO

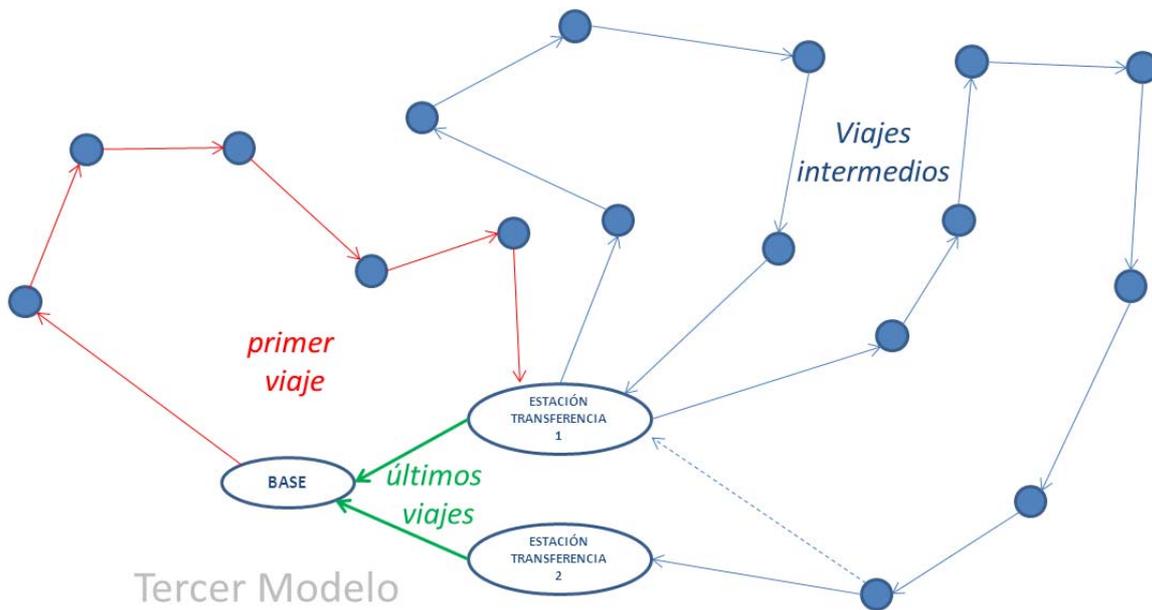


Tabla 4.3: Bases de vehículos asociadas al Tercer Modelo

Consideraciones particulares del modelo:

En la figura 4.3 vemos una representación de este modelo, en el que en este caso:

- La diferencia con el segundo modelo es que en este, los vehículos de recogida pueden descargar en DOS Estaciones de Transferencia.
- No limitamos la cantidad descargada en cada Estación de Transferencia
- A partir del segundo viaje, el vehículo inicia su recorrido en la Estación de Transferencia donde llegó en el viaje anterior.
- En este modelo podríamos incluir las bases de vehículos recogidas en la tabla 4.3.

<u>Base</u>	<u>Estaciones de Transferencia</u>
Andévalo	Andévalo y La Redondela
Punta Umbría (NORD)	Huelva y La Redondela
Punta Umbría (TRASERA)	Huelva y La Redondela

Figura 4.3: Esquema Tercer Modelo

PARÁMETROS

Son los mismos que el segundo modelo

PARÁMETROS CALCULADOS MEDIANTE SCRIPT

Son los mismos que el segundo modelo

VARIABLES DE DECISIÓN

Son las mismas que el segundo modelo

FUNCIÓN OBJETIVO

Es la misma que el segundo modelo.

VARIABLES AUXILIARES

Estas variables las utilizamos para recoger datos que nos indican el funcionamiento del servicio y que algunas de ellas las volcamos en la hoja de cálculo auxiliar.

$t_{rec_{kv}}$ float **Tiempo empleado para recorrer todos los tramos** (incluidos Base de vehículos y Estaciones de Transferencia), por cada vehículo k en cada viaje v , excluyendo el de regreso a la base:

$$t_{rec_{kv}} = \sum_{i=0}^{NP+2} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP+2} d_{ij} \cdot \frac{x_{ijkv}}{VM_k}$$

t_{reg_k} float **Tiempo empleado en regresar a la Base de vehículos** (desde las Estaciones de Transferencia) una vez terminada la recogida:

$$t_{reg_k} = \frac{d_{NP+1,0} \cdot \sum_{v=1}^{NV} x_{NP+1,0,k,v} + d_{NP+2,0} \cdot \sum_{v=1}^{NV} x_{NP+2,0,k,v}}{VM_k}$$

t_{con_k} float **Tiempo empleado por cada vehículo (k)** en recoger los contenedores

de las poblaciones que recorre y durante todos sus viajes.:

$$t_{con_k} = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv} \cdot TR_k$$

t_vac_k float **Tiempo que emplea cada vehículo en estar disponible.**
Observemos que contamos las veces que se llega a la Estación de Transferencia (siempre con el vehículo cargado) y lo multiplicamos por el tiempo medio de vaciado de un vehículo.

$$t_{vac_k} = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} (x_{i,NP+1,k,v} + x_{i,NP+2,k,v}) \cdot T_{Vaciado}$$

t_pob_k float **Tiempo de recorrido por vehículo en el interior de las poblaciones.**
Excluimos el tiempo dedicado a recoger los contenedores:

$$t_{pob_k} = \frac{d_{pob_k}}{VP}$$

t_veh_k float **Tiempo total empleado por cada vehículo**

$$t_{veh_k} = \sum_{v=1}^{NV} t_{rec_{kv}} + t_{con_k} + t_{vac_k} + t_{reg_k} + t_{pob_k}$$

c_veh_{kv} int **Carga (número de contenedores) recogida por un vehículo k en cada viaje v:**

$$c_{veh_{kv}} = \sum_{j=1}^{NP} y_{jkv}$$

d_veh_{kv} float **Distancia recorrida (en kms) por el vehículo k en cada viaje v:**

$$d_{veh_{kv}} = \sum_{i=0}^{NP+2} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP+2} x_{ijkv} \cdot d_{ij}$$

d_veh_tot float **Distancia total recorrida (kms) por todos los vehículos en todos sus viajes en los recorridos de recogida:**

$$d_{veh_tot} = \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} d_{veh_{kv}}$$

d_pob_k float **Distancia recorrida por vehículo dentro de poblaciones.** Desde que entra hasta que sale de cada una de ellas. Sumamos las visitas del vehículo a cada población (por la distancia de entrada a cada una) y el recorrido por la población recogiendo los contenedores:

$$d_{pob_k} = \sum_{j=1}^{NP} n_{vis_{jk}} \cdot DiamMed_j + \sum_{j=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} \frac{RecPob_{jv}}{RM_j} \cdot y_{jkv}$$

d_reg_tot float **Distancia recorrida por todos los vehículos al regresar a la Base de vehículos (desde las Estaciones de Transferencia):**

$$d_{reg_tot} = d_{NP+1,0} \cdot \sum_{k=1}^{NC} x_{NP+1,0,k,NV+1} + d_{NP+2,0} \cdot \sum_{k=1}^{NC} x_{NP+2,0,k,NV+1}$$

d_Recorrida float **Distancia total recorrida por todos los vehículos y durante todos los viajes, incluido el de regreso a la base:**

$$d_Recorrida = d_veh_tot + d_reg_tot + \sum_{k=1}^{NC} d_pob_k$$

y_TV_{ik} int **Cantidad recogida en cada municipio por población y vehículo.**
Almacenamos el número de contenedores que recogemos por cada camión y en cada municipio:

$$y_TV_{ik} = \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}$$

n_viaj int **Número total de viajes.** Es el número total de viajes realizados por todos los vehículos, incluidos los de vuelta a la Base de vehículos. Lo calculamos con tres sumandos: Los que salen de la Base (primer viajes, todos: NC), los que salen de las Estaciones de Transferencia (a partir del segundo viaje) para continuar la recogida y los que regresan a la Base desde las Estaciones (todos: NC):

$$n_viaj = NC + \sum_{j=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=2}^{NV} (x_{NP+1,j,k,v} + x_{NP+2,j,k,v}) + NC$$

Otra manera de calcularlo es con dos sumandos: número de llegadas a las Estaciones de Transferencia (para descargar) más los viajes de regreso a la Base de vehículos (todos: NC):

$$n_viaj = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=2}^{NV} (x_{i,NP+1,k,v} + x_{i,NP+2,k,v}) + NC$$

n_vis_{jk} Int **Número de visitas a la población.** El número de veces que una población j es visitada por un vehículo k para que le recojan toda o parte de la basura:

$$n_vis_{jk} = \sum_{i=0}^{NP+2} \sum_{v=1}^{NV} x_{ijkv}$$

n_vis_tot Int **Número total de visitas a las poblaciones.** Sencillamente, totalzamos todas la visitas de todos los vehículos a todas las poblaciones:

$$n_vis_tot = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} n_vis_{jk}$$

Y_kx Int **Cantidades recogidas por cada vehículo y viaje.** Para poder sacar a la hoja auxiliar las cantidades recogidas en cada población por cada vehículo y viaje. La x se sustituye por el número de vehículo:

$$y_k1_{j,v} = y_{j,veh1,v}$$

RESTRICCIONES

RESTRICCIÓN 01: Rama de salida

Desde cualquier población solo podremos ir a otra, con un determinado vehículo y viaje:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{NP} x_{ijkv} \leq 1, \forall i \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

Desde la Base de vehículos, con cada vehículo y en el primer viaje, iremos a una población y solo a una:

$$\sum_{j=1}^{NP} x_{0,jk1} = 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

En el resto de viajes, desde una Estación de Transferencia podremos ir a un solo municipio, si el vehículo sale en ese viaje y de esa Estación:

$$\sum_{j=1}^{NP} (x_{NP+1,j,k,v} + x_{NP+2,j,k,v}) \leq 1, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{2..NV\}$$

RESTRICCIÓN 02: Rama de llegada

A cualquier población solo podemos llegar desde otra, con un determinado vehículo y viaje:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{NP} x_{ijkv} \leq 1, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

A una Estación de Transferencia solo se puede llegar desde una única población excepto en el viaje de regreso:

$$\sum_{i=1}^{NP} (x_{i,NP+1,k,v} + x_{i,NP+2,k,v}) \leq 1, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

El primer viaje nunca se llega a la Base de vehículos:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,0,k,1} \leq 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

RESTRICCIÓN 03: Recorridos inconexos

Para evitar recorridos inconexos entre poblaciones como $3 \rightarrow 7, 7 \rightarrow 3$. Lo que evitamos con esta restricción es que si un tramo $i-j$ se recorre no se pueda hacer el inverso: $j-i$. Hemos exceptuado el índice $NP+1$ ya que sí admitimos ir desde la Estación de Transferencia a un municipio y volver.

Esta restricción es la misma que en Segundo Modelo:

$$u_i - u_j + NP \cdot x_{ijkv} \leq NP - 1, \forall i, j \in \{0..NP\}, i \neq j, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 04: Gestión de la demanda

Se ha de recoger toda la basura generada en cada municipio. La suma de los productos de y_{jkv} (cantidad de basura que el vehículo k en su viaje v recoge del municipio j) por x_{ijkv} (que nos indica que el vehículo k en su viaje v llega al municipio j procedente del punto i) para todos los vehículos y durante todos los viajes debe ser igual a la demanda del municipio j . Es necesario multiplicar los valores de y por x para que esta variable no trabaje de forma independiente de x . Si no lo hicieramos así, estaríamos contabilizando basura recogida de los municipios sin haber pasado por ellos:

$$\sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv} \cdot x_{ijkv} = RM_j \forall i \in \{0..NP+2\}, \forall j \in \{1..NP\}, j \neq i$$

El problema que nos encontramos es que el producto de dos variables (una entera y la otra binaria) ya no nos permite plantear un sistema de ecuaciones lineales. Podemos cambiar esta restricción por las siguientes cuatro restricciones lineales, utilizando una variable auxiliar z :

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+2} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} z_{ijkv} = RM_j, \forall j \in \{1..NP\}$$

$$z_{ijkv} \leq U \cdot x_{ijkv}, \forall i \in \{0..NP+2\}, \forall j \in \{1..NP, j \neq i\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+2} z_{ijkv} \leq y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+2} z_{ijkv} \geq y_{jkv} - U \cdot \left(1 - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+2} x_{ijkv}\right), \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

Además, se debe satisfacer:

$$\sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv} = RM_j \forall j \in \{1..NP\}$$

RESTRICCIÓN 05: No ir sin recoger

Para evitar recorrer lugares donde no se recoge basura es decir, para evitar situaciones como : $y = 0$ con $\sum x = 1$ (no recojo basura a pesar de haber llegado) introducimos la siguiente restricción:

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+2} x_{ijkv} \leq y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 06: Ramas muertas

Para evitar tramos de recorridos que no sean consecutivos, es decir llegar a un municipio determinado y luego no salir de él. Impondríamos la siguiente restricción:

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq s}}^{NP+2} x_{iskv} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq s}}^{NP+2} x_{sjkv}, \forall s \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

Que viene a indicar que para un vehículo y viaje determinado, salgo del municipio s si y solo si llego a él.

RESTRICCIÓN 07: Capacidad de los vehículos

Introduzcamos ahora la limitación de la capacidad de los vehículos haciendo que la suma de las cantidades recogidas por los vehículos no supere su capacidad máxima:

$$c_veh_{kv} \leq C \text{ arg } aMax_k, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

En cada viaje de cada vehículo, todas las cantidades de basura recogidas en los diferentes municipios no pueden superar la capacidad máxima del vehículo.

Esta restricción es la misma que en el Segundo Modelo.

RESTRICCIÓN 08: Tiempos

El tiempo que emplea cada vehículo no puede superar su tiempo de disponibilidad, que si va asociado a un conductor específico, este tiempo coincidiría con la jornada de trabajo:

$$t_veh_k \leq TJor_k, \forall k \in \{1..NC\}$$

Esta restricción es la misma que en el Segundo Modelo.

RESTRICCIÓN 09: Vuelta a la estación

En el primer viaje, cada vehículo que sale de la Base, llega a una de las Estaciones de Transferencia, después de hacer el recorrido:

$$\sum_{i=1}^{NP} (x_{i.NP+1,k,1} + x_{i.NP+2,k,1}) = \sum_{j=1}^{NP} x_{0,jk1}, \forall k \in \{1..NC\}$$

En los viajes siguientes, excepto el último de cada vehículo, cada uno sale de una Estación de transferencia llega a la misma o a otra:

$$\sum_{j=1}^{NP} (x_{NP+1,j,k,v} + x_{NP+2,j,k,v}) = \sum_{i=1}^{NP} (x_{i,NP+1,k,v} + x_{i,NP+2,k,v}), \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{2..NV\}$$

El primer miembro representa la salida y el segundo la llegada. Si el primer miembro vale 1 (el vehículo en ese viaje salió de una Estación de Transferencia) el segundo miembro también valdrá 1 (el vehículo en ese viaje llega a una u otra Estación de Transferencia).

RESTRICCIÓN 14: Recorrido Base a Estaciones de Transferencia

Los vehículos nunca van de la base a una Estación de Transferencia directamente (ya salen vacíos):

$$x_{0,NP+1,k,v} + x_{0,NP+2,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 15: Regreso a la Base de vehículos

El último viaje (**NV+1**), cada vehículo lo emplea, exclusivamente, en volver a la base desde una de las Estaciones de Transferencia, ya vacío:

$$x_{NP+1,0,k,v+1} + x_{NP+2,0,k,v+1} = 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

Y ninguno, en el último viaje (**NV+1**) vuelve a una Estación de Transferencia:

$$\sum_{i=1}^{NP} (x_{i,NP+1,k,NV+1} + x_{i,NP+2,k,NV+1}) = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

En el resto de viajes, ninguno se realiza desde una Estación de Transferencia a la Base de vehículos:

$$x_{NP+1,0,k,v} + x_{NP+2,0,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

En el último viaje a la base solo se puede llegar desde una Estación de Transferencia, nunca desde las poblaciones:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,0,k,NV+1} = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

RESTRICCIÓN 16: Recorrido poblaciones a Base

Los vehículos no vuelven a la base desde ningún municipio (con basura):

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} x_{i,0,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

Esta restricción es la misma que en el Segundo Modelo.

RESTRICCIÓN 17: Salida desde la Base

Solo en el primer viaje se sale de la base:

$$\sum_{j=1}^{NP} x_{0,j,k,1} = 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

En el resto de viajes, ningún vehículo sale de la Base de vehículos:

$$\sum_{j=1}^{NP} \sum_{v=2}^{NV} x_{0,j,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

Esta restricción es la misma que en el Segundo Modelo.

RESTRICCIÓN 18: Viajes entre Estaciones de Transferencia

No existen viajes directos entre Estaciones de Transferencia:

$$x_{NP+1,NP+2,k,v} + x_{NP+2,NP+1,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV+1\}$$

RESTRICCIÓN 19: Continuidad en las Estaciones de Transferencia

No puedo salir de una si no he llegado previamente. Puedo no salir:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,NP+1,k,v} \geq \sum_{j=1}^{NP} x_{NP+1,j,k,v}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,NP+2,k,v} \geq \sum_{j=1}^{NP} x_{NP+2,j,k,v}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 20: Balance de viajes en las Estaciones

El número de vehículos que llegan a las estaciones de Transferencia es igual que el que sale:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq NP+1}}^{NP+2} \sum_{v=1}^{NV+1} x_{i,NP+1,k,v} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq NP+1}}^{NP+2} \sum_{v=1}^{NV+1} x_{NP+1,j,k,v}, \forall k \in \{1..NC\}$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq NP+2}}^{NP+2} \sum_{v=1}^{NV+1} x_{i,NP+2,k,v} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq NP+2}}^{NP+2} \sum_{v=1}^{NV+1} x_{NP+2,j,k,v}, \forall k \in \{1..NC\}$$

RESTRICCIÓN 21: Obligación de usar ambas estaciones de transferencia

Esta restricción la hemos usado de forma opcional, concretamente en las opciones **B** de cada Base de este modelo:

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} x_{i,NP+1,k,v} \geq 1$$

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} x_{i,NP+2,k,v} \geq 1$$

Cuarto MODELO

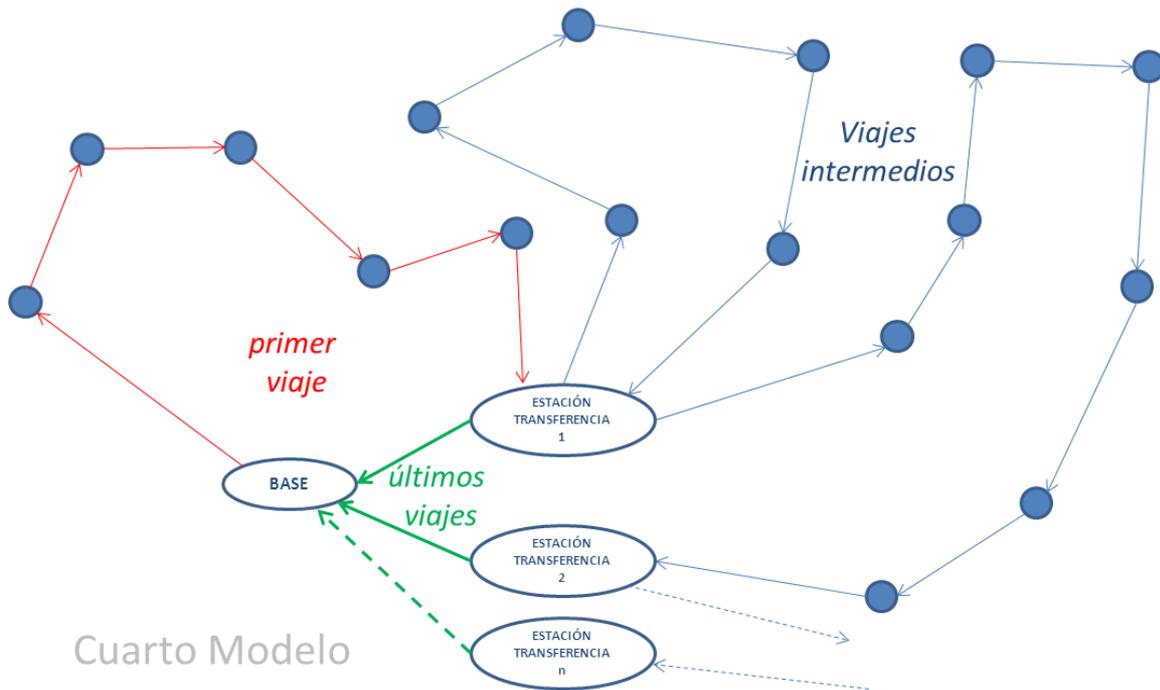


Figura 4.4: Esquema del Cuarto Modelo

Consideraciones particulares del modelo:

Multi-estaciones de Transferencia. En la figura 4.4 vemos un esquema de este modelo y en la tabla 4.4, la base que al relacionarse con tres Estaciones de Transferencia se adapta a este modelo.

En este modelo el número de estaciones es un parámetro de entrada. Diríamos que este modelo podría abarcar, conceptualmente, todos los casos tratados con los modelos anteriores pero añadiría complejidad innecesaria.

El único caso en el que es imprescindible utilizarlo es con la Base de Trigueros que actualmente trabaja con tres Estaciones de Transferencia.

La función objetivo, las variables de decisión y los parámetros calculados son como en el modelo 2 y 3, pero las restricciones y las variables auxiliares cambian. Se incluye a continuación los nuevos parámetros que habría que añadir a los que ya usábamos en el modelo 3 y la lista completa de variables auxiliares y restricciones.

<u>Base</u>	<u>Estaciones de Transferencia</u>
Trigueros	Huelva, Linares de la Sierra y Villarrasa

Tabla 4.4: Bases de vehículos asociadas al Cuarto Modelo

PARÁMETROS

Son los mismos que el segundo y tercer modelo, añadiendo las siguientes:

NE	int	Número de Estaciones de Transferencia
esta	range	1..NE. Estaciones de Transferencia
aEsta	string	Array con las Estaciones de Transferencia
sEsta	{string}	Conjunto con las Estaciones de Transferencia

PARÁMETROS CALCULADOS MEDIANTE SCRIPT

Son los mismos que el segundo y tercer modelo.

VARIABLES DE DECISIÓN

Son las mismas que el segundo y tercer modelo.

FUNCIÓN OBJETIVO

Es la misma que el segundo y tercer modelo.

VARIABLES AUXILIARES

Estas variables las utilizamos para recoger datos que nos indican el funcionamiento del servicio y que algunas de ellas las volcamos en la hoja de cálculo auxiliar.

t_{rec_{kv}} float **Tiempo empleado para recorrer todos los tramos** (incluidos Base de Vehículos y Estaciones de Transferencia), por cada vehículo **k** en cada viaje **v**, excluyendo el de regreso a la base:

$$t_{rec_{kv}} = \sum_{i=0}^{NP+2} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP+2} d_{ij} \cdot \frac{x_{ijkv}}{VM_k}$$

t_{reg_k} float **Tiempo empleado en regresar a la Base de vehículos** (desde las Estaciones de Transferencia) una vez terminada la recogida y en el último viaje (NV+1):

$$t_{reg_k} = \frac{\sum_{e=1}^{NE} d_{e,0} \cdot x_{e,0,k,NV+1}}{VM_k}$$

t_{con_k} float **Tiempo empleado por cada vehículo (k)** en recoger los contenedores

de las poblaciones que recorre y durante todos sus viajes:

$$t_con_k = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv} \cdot TR_k$$

t_vac_k float **Tiempo que emplea cada vehículo en estar disponible.**
Observemos que contamos las veces que se llega a la Estación de Transferencia (siempre con el vehículo cargado) y lo multiplicamos por el tiempo medio de vaciado de un vehículo:

$$t_vac_k = T_Vaciado \cdot \sum_{i=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} \sum_{e=1}^{NE} x_{i,e,k,v}$$

t_pob_k float **Tiempo de recorrido por vehículo dentro de las poblaciones.**
Excluimos el tiempo dedicado a recoger los contenedores:

$$t_pob_k = \frac{d_pob_k}{VP}$$

t_veh_k float **Tiempo total empleado por cada vehículo:**

$$t_veh_k = \sum_{v=1}^{NV} t_rec_{kv} + t_con_k + t_vac_k + t_reg_k + t_pob_k$$

c_veh_{kv} int **Carga (número de contenedores) recogida por un vehículo k en cada viaje v:**

$$c_veh_{kv} = \sum_{j=1}^{NP} y_{jkv}$$

d_veh_{kv} float **Distancia recorrida (en kms) por el vehículo k en cada viaje v:**

$$d_veh_{kv} = \sum_{i=0}^{NP+2} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{NP+2} x_{ijkv} \cdot d_{ij}$$

d_veh_tot float **Distancia total recorrida (kms) por todos los vehículos en todos sus viajes en los recorridos de recogida:**

$$d_veh_tot = \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} d_veh_{kv}$$

d_pob_k float **Distancia recorrida por vehículo dentro de poblaciones.** Desde que entra hasta que sale de cada una de ellas. Sumamos las visitas del vehículo a cada población (por la distancia de entrada a cada una) y el recorrido por la población recogiendo los contenedores:

$$d_pob_k = \sum_{j=1}^{NP} n_vis_{jk} \cdot DiamMed_j + \sum_{j=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} \frac{RecPob_{jv}}{RM_j} \cdot y_{jkv}$$

d_reg_tot float **Distancia recorrida por todos los vehículos al regresar a la Base de Vehículos (desde las Estaciones de Transferencia):**

$$d_reg_tot = \sum_{k=1}^{NC} d_{e,0} \cdot x_{e,0,k,NV+1}$$

d_Recorrida float **Distancia total recorrida por todos los vehículos y durante todos los viajes, incluido el de regreso a la base:**

			$d_Recorrida = d_veh_tot + d_reg_tot + \sum_{k=1}^{NC} d_pob_k$
y_TV_{ik}	int	Cantidad recogida en cada municipio por población y vehículo. Almacenamos el número de contenedores que recogemos por cada camión y en cada municipio:	$y_TV_{ik} = \sum_{v=1}^{NV} y_{j_{kv}}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}$
n_viaj	int	Número total de viajes. Es el número total de viajes realizados por todos los vehículos, incluidos los de vuelta a la Base de vehículos. Lo calculamos con tres sumandos: Los que salen de la Base (primer viajes, todos: NC), los que salen de las Estaciones de Transferencia (a partir del segundo viaje) para continuar la recolección y los que regresan a la Base desde las Estaciones (todos: NC):	$n_viaj = NC + \sum_{j=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=2}^{NV} \sum_{e=1}^{NE} x_{e,j,k,v} + NC$
		Otra manera de calcularlo es con dos sumandos: número de llegadas a las Estaciones de Transferencia (para descargar) más los viajes de regreso a la Base de vehículos (todos: NC):	$n_viaj = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=2}^{NV} \sum_{e=1}^{NE} x_{i,e,k,v} + NC$
n_vis_{jk}	Int	Número de visitas a la población. El número de veces que una población j es visitada por un vehículo k para que le recojan toda o parte de la basura:	$n_vis_{jk} = \sum_{i=0}^{NP+2} \sum_{v=1}^{NV} x_{ijkv}$
n_vis_tot	Int	Número total de visitas a las poblaciones. Sencillamente, totalizamos todas la visitas de todos los vehículos a todas la poblaciones:	$n_vis_tot = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} n_vis_{jk}$
Y_kx	Int	Cantidades recogidas por cada vehículo y viaje. Para poder sacar a la hoja auxiliar las cantidades recogidas en cada población por cada vehículo y viaje. La x se sustituye por el número de vehículo:	$y_k1_{j,v} = y_{j,veh1,v}$

RESTRICCIONES

Las restricciones en este nuevo modelo quedan como sigue:

RESTRICCIÓN 01: Rama de salida

Desde cualquier población solo podremos ir a otra, con un determinado vehículo y viaje:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{NP} x_{ijkv} \leq 1, \forall i \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

Desde la Base de vehículos, con cada vehículo y en el primer viaje, iremos a una población y solo a una:

$$\sum_{j=1}^{NP} x_{0,jk1} = 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

En el resto de viajes, desde una Estación de Transferencia podremos ir a un solo municipio, si el vehículo sale en ese viaje y de esa Estación:

$$\sum_{j=1}^{NP} \sum_{e=1}^{NE} x_{e,j,k,v} \leq 1, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{2..NV\}$$

RESTRICCIÓN 02: Rama de llegada

A cualquier población solo podemos llegar desde otra, con un determinado vehículo y viaje:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{NP} x_{ijkv} \leq 1, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

A una Estación de Transferencia solo se puede llegar desde una única población excepto en el viaje de regreso:

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{e=1}^{NE} x_{i,e,k,v} \leq 1, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

El primer viaje nunca se llega a la Base de vehículos:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,0,k,1} \leq 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

RESTRICCIÓN 03: Recorridos inconexos

Para evitar recorridos inconexos entre poblaciones como $3 \rightarrow 7, 7 \rightarrow 3$. Lo que evitamos con esta restricción es que si un tramo $i-j$ se recorre no se pueda hacer el inverso: $j-i$. Hemos exceptuado el índice **NP+1** ya que sí admitimos ir desde la Estación de Transferencia a un municipio y volver.

Esta restricción es la misma que en Segundo Modelo:

$$u_i - u_j + NP \cdot x_{ijkv} \leq NP - 1, \forall i, j \in \{0..NP\}, i \neq j, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 04: Gestión de la demanda

Se ha de recoger toda la basura generada en cada municipio. La suma de los productos de y_{jkv} (cantidad de basura que el vehículo k en su viaje v recoge del municipio j) por x_{ijkv} (que nos indica que el vehículo k en su viaje v llega al municipio j procedente del punto i) para todos los vehículos y durante todos los viajes se debe ser igual a la demanda del municipio j . Es necesario multiplicar los valores de y por x para que esta variable no trabaje de forma independiente de x . Si no lo hicieramos así, estaríamos contabilizando basura recogida de los municipios sin haber pasado por ellos:

$$\sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv} \cdot x_{ijkv} = RM_i \forall i \in \{0..NP+2\}, \forall j \in \{1..NP\}, j \neq i$$

El problema que nos encontramos es que el producto de dos variables (una entera y la otra binaria) ya no nos permite plantear un sistema de ecuaciones lineales. Podemos cambiar esta restricción por las siguientes cuatro restricciones lineales, utilizando una variable auxiliar z :

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+2} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} z_{ijkv} = RM_j, \forall j \in \{1..NP\}$$

$$z_{ijkv} \leq U \cdot x_{ijkv}, \forall i \in \{0..NP+2\}, \forall j \in \{1..NP, j \neq i\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+2} z_{ijkv} \leq y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+2} z_{ijkv} \geq y_{jkv} - U \cdot \left(1 - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+2} x_{ijkv}\right), \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

Además, se debe satisfacer:

$$\sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} y_{jkv} = RM_j \forall j \in \{1..NP\}$$

RESTRICCIÓN 05: No ir sin recoger

Para evitar recorrer lugares donde no se recoge basura, es decir para evitar situaciones como : $y = 0$ con $\sum x = 1$ (no recojo basura a pesar de haber llegado):

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NP+2} x_{ijkv} \leq y_{jkv}, \forall j \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 06: Ramas muertas

Para evitar tramos de recorridos que no sean consecutivos, es decir llegar a un municipio determinado y luego no salir de él. Impondríamos la siguiente restricción:

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq s}}^{NP+2} x_{iskv} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq s}}^{NP+2} x_{sjkv}, \forall s \in \{1..NP\}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

Que viene a indicar que para un vehículo y viaje determinado, salgo del municipio s si y solo si llego a él.

RESTRICCIÓN 07: Capacidad de los vehículos

Introduzcamos ahora la limitación de la capacidad de los vehículos haciendo que la suma de las cantidades recogidas por los vehículos no supere su capacidad máxima:

$$c_veh_k \leq C \text{ arg } aMax_k, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

En cada viaje de cada vehículo, todas las cantidades de basura recogidas en los diferentes municipios no pueden superar la capacidad máxima del vehículo. Esta restricción es la misma que en el Segundo Modelo.

RESTRICCIÓN 08: Tiempos

El tiempo que emplea cada vehículo no puede superar su tiempo de disponibilidad, que si va asociado a un conductor específico, este tiempo coincidiría con la jornada de trabajo:

$$t_veh_k \leq T\text{Jor}_k, \forall k \in \{1..NC\}$$

Esta restricción es la misma que en el Segundo Modelo.

RESTRICCIÓN 09: Vuelta a la estación

En el primer viaje, cada vehículo que sale de la Base, llega a una de las Estaciones de Transferencia, después de hacer el recorrido:

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{e=1}^{NE} x_{i,e,k,1} = \sum_{j=1}^{NP} x_{0,jk1}, \forall k \in \{1..NC\}$$

En los viajes siguientes, excepto el último de cada vehículo, cada uno sale de una Estación de Transferencia llega a la misma o a otra:

$$\sum_{j=1}^{NP} \sum_{e=1}^{NE} x_{e,j,k,v} = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{e=1}^{NE} x_{i,e,k,v}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{2..NV\}$$

El primer miembro representa la salida y el segundo la llegada. Si el primer miembro vale 1 (el vehículo en ese viaje salió de una Estación de Transferencia) el segundo miembro también valdrá 1 (el vehículo en ese viaje llega a una u otra Estación de Transferencia).

RESTRICCIÓN 14: Recorrido Base a Estaciones de Transferencia

Los vehículos nunca van de la base a una Estación de Transferencia directamente (ya salen vacíos):

$$\sum_{e=1}^{NE} x_{0,e,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

RESTRICCIÓN 15: Regreso a la Base de vehículos

El último viaje (**NV+1**), cada vehículo lo emplea, exclusivamente, en volver a la base desde una de las Estaciones de Transferencia, ya vacío:

$$\sum_{e=1}^{NE} x_{e,0,k,v+1} = 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

Y en el último viaje (**NV+1**) ninguno vuelve a una Estación de Transferencia:

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{e=1}^{NE} x_{i,e,k,NV+1} = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

En el resto de viajes, ninguno se realiza desde una Estación de Transferencia a la Base de vehículos:

$$\sum_{e=1}^{NE} x_{e,0,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}$$

En el último viaje a la base solo se puede llegar desde una Estación de Transferencia, nunca desde las poblaciones:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,0,k,NV+1} = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

RESTRICCIÓN 16: Recorrido poblaciones a Base

Los vehículos no vuelven a la base desde ningún municipio (con basura):

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{v=1}^{NV} x_{i,0,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

Esta restricción es la misma que en el Segundo Modelo.

RESTRICCIÓN 17: Salida desde la Base

Solo en el primer viaje se sale de la base:

$$\sum_{j=1}^{NP} x_{0,j,k,1} = 1, \forall k \in \{1..NC\}$$

En el resto de viajes, ningún vehículo sale de la Base de vehículos:

$$\sum_{j=1}^{NP} \sum_{v=2}^{NV} x_{0,j,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}$$

Esta restricción es la misma que en el Segundo Modelo.

RESTRICCIÓN 18: Viajes entre Estaciones de Transferencia

No existen viajes directos entre Estaciones de Transferencia:

$$x_{e1,e2,k,v} = 0, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV+1\}, \forall e1 \in \{1..NE\}, \forall e2 \in \{1..NE, e2 \neq e1\}$$

RESTRICCIÓN 19: Continuidad en las Estaciones de Transferencia

No puedo salir de una si no he llegado previamente. Puedo no salir:

$$\sum_{i=1}^{NP} x_{i,e,k,v} \geq \sum_{j=1}^{NP} x_{e,j,k,v}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall v \in \{1..NV\}, \forall e \in \{1..NE\}$$

RESTRICCIÓN 20: Balance de viajes en las Estaciones

El número de vehículos que llegan a las estaciones de Transferencia es igual que el que sale:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq NP+1}}^{NP+2} \sum_{v=1}^{NV+1} x_{i,e,k,v} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq NP+1}}^{NP+2} \sum_{v=1}^{NV+1} x_{e,j,k,v}, \forall k \in \{1..NC\}, \forall e \in \{1..NE\}$$

RESTRICCIÓN 21: Obligación de usar ambas estaciones de transferencia

Esta restricción la hemos usado de forma opcional. En caso de la Base de Trigueros, no la hemos utilizado. El modelo por sí mismo ya utiliza las tres Estaciones de Transferencia:

$$\sum_{i=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NC} \sum_{v=1}^{NV} x_{i,e,k,v} \geq 1, \forall e \in \{1..NE\}$$

5. Resultados

En las **tablas 5.xA** ($x = 1..10$) indicamos los parámetros del modelo:

- Los valores de **epgap** y **epagap** son parámetros de CPLEX con el que le indicamos la tolerancia, el primero en tanto por ciento y el segundo en valor absoluto, deteniendo la búsqueda del valor óptimo en cuanto sobrepase cualquiera de estos límites.
- **NV** es el número máximo de viajes que puede realizar cualquier vehículo.
- **U** es el máximo número de contenedores que puede ser recogido en una población y se utiliza para linealizar la cuarta restricción.
- **PesoNumViajes** y **PesoNumVisitas** son los pesos que le damos al número de viajes y al número de visitas, respectivamente, en la función objetivo.

En las **tablas 5.xB** ($x=1..10$) mostramos los valores resultante de la variable x_{ijkv} (igual a 1) que nos indica los tramos que recorren los vehículos y en qué viaje.

En las **figuras 5.xA** ($x=1..10$) mostramos la estadística que nos indica cómo convergen las soluciones enteras y relajada, así como el tiempo empleado.

En las **figuras 5.xB** ($x=1..10$) mostramos la hoja de cálculo que recoge en la cabecera superior los datos relacionados con los vehículos y en la cabecera inferior los datos de entrada relativos a las poblaciones. El cuerpo que comienza con el texto “RESULTADOS” nos da:

- El valor de la distancia recorrida óptima
- La cantidad de contenedores recogidos por vehículo y viaje
- La distancia recorrida por vehículo y viaje
- El tiempo empleado en los recorridos, por vehículo y viaje además del tiempo empleado en:
 - vaciado de los vehículos (tiempo de descarga)
 - Recogida de contenedores
 - Interno por las poblaciones y
 - Regreso a la Base desde la Estación de Transferencia donde se encontraba cada vehículo.
- Cantidades recogidas por vehículo y población
- Número de visitas por vehículo y población
- A partir del tercer modelo se incluyen las cantidades (número de contenedores) recogidas por vehículo, viaje y población.

Por último, en las **figuras 5.xC** ($x=1..10$), mostramos los recorridos que hacen los vehículos en cuestión y su número de viaje. Cada color es un vehículo.

Base de vehículos: ARACENA (Segundo Modelo)

Estación de Transferencia: **Linares de la Sierra**

epgap	= 0.0001;
epagap	= 60;
NV	= 5;
U	= 1000;
PesoNumViajes	= 5;
PesoNumVisitas	= 10;

Tabla 5.1A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: ARACENA

sPunt (tamaño 16)	sPunt (tamaño 16)	sVehi (tamaño 3)	viaT (tamaño 6)	Valor
"ESTACION"	"Puerto Moral"	"4234-GML"	2	1
"ESTACION"	"Navahermo...alaroza)"	"0594-DNY"	3	1
"ESTACION"	"Fuenteheridos"	"2868-DNL"	5	1
"ESTACION"	"BASE"	"4234-GML"	6	1
"ESTACION"	"BASE"	"2868-DNL"	6	1
"ESTACION"	"BASE"	"0594-DNY"	6	1
"Zufre"	"La Umbria (Aracena)"	"4234-GML"	2	1
"Valdelarco"	"Galaroza"	"0594-DNY"	3	1
"Santa Olalla del Cala"	"Zufre"	"4234-GML"	2	1
"Puerto Moral"	"Cala"	"4234-GML"	2	1
"Navahermo...alaroza)"	"Valdelarco"	"0594-DNY"	3	1
"Linares de la Sierra"	"ESTACION"	"4234-GML"	1	1
"La Umbria (Aracena)"	"ESTACION"	"4234-GML"	2	1
"Hinojales"	"Cañaverál de León"	"2868-DNL"	5	1
"Galaroza"	"ESTACION"	"0594-DNY"	3	1
"Fuenteheridos"	"Alájar"	"2868-DNL"	5	1
"Cañaverál de León"	"ESTACION"	"2868-DNL"	5	1
"Cala"	"Santa Olalla del Cala"	"4234-GML"	2	1
"Aracena"	"ESTACION"	"2868-DNL"	1	1
"Aracena"	"ESTACION"	"0594-DNY"	1	1
"Alájar"	"Hinojales"	"2868-DNL"	5	1
"BASE"	"Linares de la Sierra"	"4234-GML"	1	1
"BASE"	"Aracena"	"2868-DNL"	1	1
"BASE"	"Aracena"	"0594-DNY"	1	1

Tabla 5.1B: Recorrido Vehículos Base Aracena (Variable x_{ijkv})

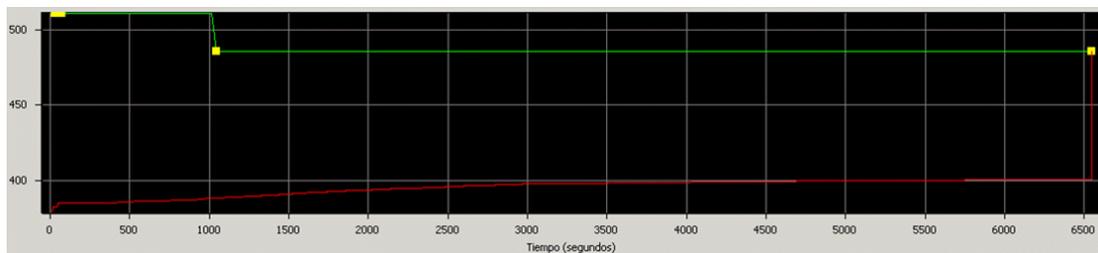


Figura 5.1A Estadística: Base de vehículos de ARACENA

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base: Aracena									
Num.Veh:		Factor de compresión:			Vel.Pob:				
3		15			15				
Vehículo	Carga Max	Horas Max	Velocidad Media carretera	Tiempo Vaciado Vehículo	Carga máxima Vehículo (m3)	Tiempo Recogida contenedor (hrs)	Observ.		
0594-DNY	135	8	40	0,25	9	0,015	Carga trasera		
2868-DNL	180	8	50	0,25	12	0,015	Carga trasera		
4234-GML	210	8	50	0,25	14	0,015	Carga trasera		
TOTAL POBLACIONES:									
14									
Población	LatGr	LonGr	Número Contenedores	Diametro medio (kms)	Recorrido Poblacion (kms)	Est.Transferencia			
BASE	37,898215	-6,569686			Exacto				
Alájar	37,874390	-6,666078	30	0,50	4,50	Linares de la Sierra			
Aracena	37,894170	-6,561207	292	2,00	18,00	Linares de la Sierra			
Cala	37,972170	-6,316490	87	0,80	7,20	Linares de la Sierra			
Cañaveral de León	38,014540	-6,527808	21	0,36	3,24	Linares de la Sierra			
Fuenteheridos	37,903270	-6,660661	26	0,50	4,50	Linares de la Sierra			
Galaroza	37,927570	-6,709221	54	0,80	7,20	Linares de la Sierra			
Hinojales	38,008430	-6,589147	20	0,54	4,86	Linares de la Sierra			
La Umbria (Aracena)	37,861440	-6,459909	3	0,40	3,60	Linares de la Sierra			
Linares de la Sierra	37,880090	-6,621002	13	0,36	3,24	Linares de la Sierra			
Navahermosa (Galaroza)	37,930569	-6,669578	2	0,17	1,53	Linares de la Sierra			
Puerto Moral	37,892080	-6,478770	10	0,33	2,97	Linares de la Sierra			
Santa Olalla del Cala	37,906510	-6,229617	75	0,90	8,10	Linares de la Sierra			
Valdelarco	37,950440	-6,683222	14	0,20	1,80	Linares de la Sierra			
Zufre	37,833840	-6,338613	22	0,50	4,50	Linares de la Sierra			
ESTACION	37,840411	-6,583656			Exacto				
TOTAL:			669						

D
A
T
O
S

R E S U L T A D O S											
Minima distancia:		290,8									
Carga/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Total					
Vehículo 1	135		70			205					
Vehículo 2	157				97	254					
Vehículo 3	13	197				210					
Vehículo 4						0					
Vehículo 5						0					
Total	305	197	70	0	97	669					
Distancia/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Interior pobl.	Viaje regr.	Total			
Vehículo 1	7,2		33,1			22,0	--	62,3			
Vehículo 2	7,2				54,7	30,7	--	92,6			
Vehículo 3	10,4	72,9				32,9	--	116,2			
Vehículo 4						--	--	0,0			
Vehículo 5						--	--	0,0			
Total	24,8	72,9	33,1	0,0	54,7	85,6	19,6	290,8			
					Tot. Recorrido:	185,5					
Tiempo recorrido/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	t.descarga	contenedores	t.poblaciones	t.regreso	Total	t.veh
Vehículo 1	0,2		0,8			0,5	3,1	1,5	0,2	6,2	6,2
Vehículo 2	0,1				1,1	0,5	3,8	2,0	0,1	7,7	7,7
Vehículo 3	0,2	1,5				0,5	3,2	2,2	0,1	7,6	7,6
Vehículo 4										0,0	
Vehículo 5										0,0	
Total	0,5	1,5	0,8	0,0	1,1	1,5	10,0	5,7	0,4	21,6	21,6
					Tot. Recorrido:	3,9					
Cantidades recogidas (y TV):	Veh 1	Veh 2	Veh 3	Total	Número de visitas				Total		
Alájar		30		30	Alájar				1		
Aracena	135	157		292	Aracena				1		
Cala			87	87	Cala				1		
Cañaveral de León		21		21	Cañaveral de León				1		
Fuenteheridos		26		26	Fuenteheridos				1		
Galaroza	54			54	Galaroza				1		
Hinojales		20		20	Hinojales				1		
La Umbria (Aracena)			3	3	La Umbria (Aracena)				1		
Linares de la Sierra			13	13	Linares de la Sierra				1		
Navahermosa (Galaroza)	2			2	Navahermosa (Galaroza)				1		
Puerto Moral			10	10	Puerto Moral				1		
Santa Olalla del Cala			75	75	Santa Olalla del Cala				1		
Valdelarco	14			14	Valdelarco				1		
Zufre			22	22	Zufre				1		
Total	205	254	210	669	Total	4	5	6	15		

R
E
S
U
L
T
A
D
O
S

Número viajes:	9
Número visitas:	15

Figura 5.1B Resultado Base de vehículos de ARACENA

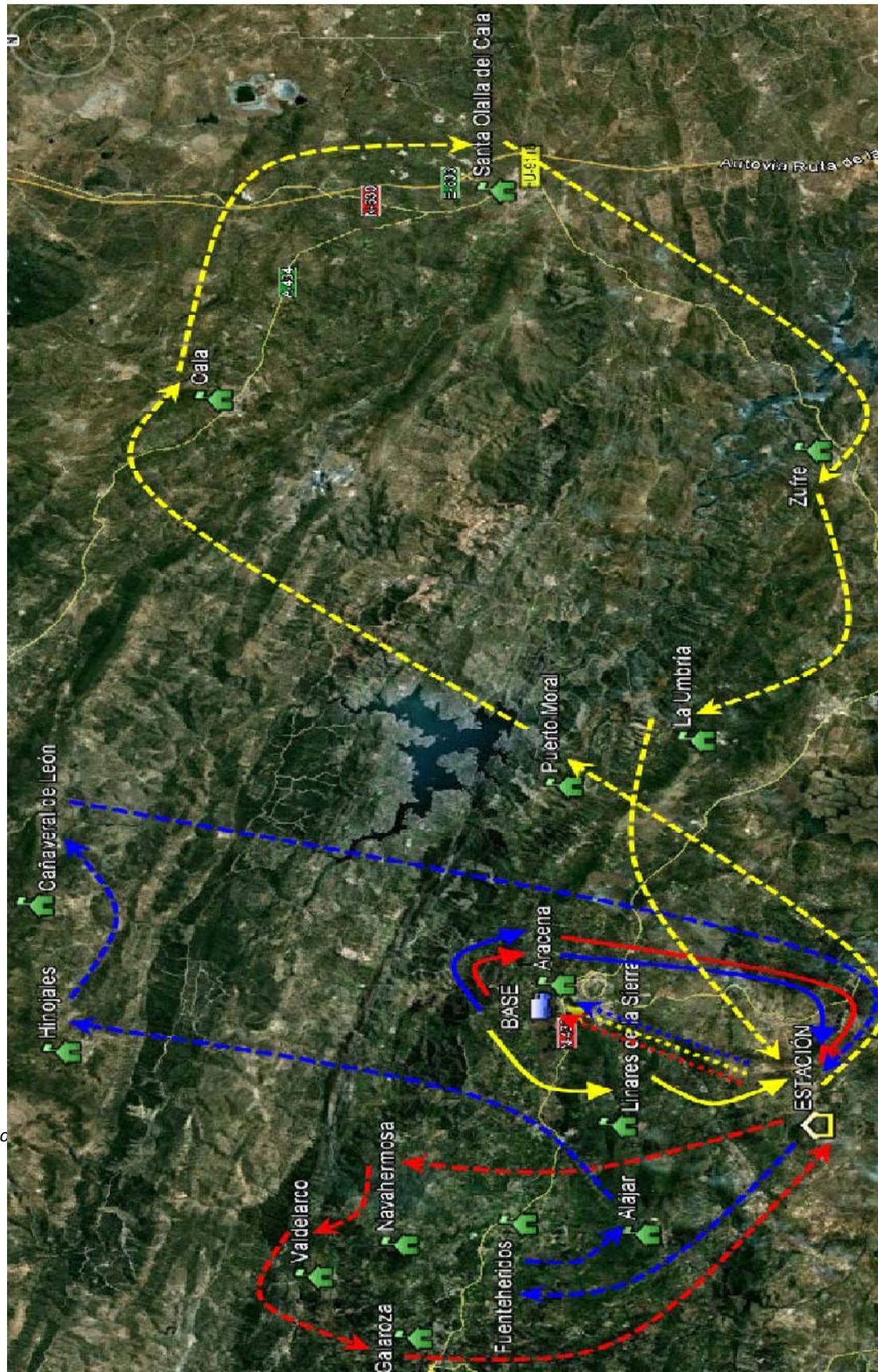


Figura 5.1C Recorrido de vehículo

Base de vehículos: CONDADO (Segundo Modelo)

Estación de Transferencia: **Villarrasa**

epgap	= 0.0001;
epagap	= 0;
NV	= 5;
U	= 1000;
PesoNumViajes	= 5;
PesoNumVisitas	= 10;

Tabla 5.2A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: CONDADO

sPunt (tamaño 8)	sPunt (tamaño 8)	sVehi (tamaño 2)	viaT (tamaño 6)	Valor
ESTACION	BASE	9461-GLS	6	1
ESTACION	BASE	2285-GNH	6	1
Villarrasa	ESTACION	2285-GNH	1	1
Villalba del Alcor	Villarrasa	2285-GNH	1	1
Paterna del Campo	ESTACION	9461-GLS	1	1
Manzanilla	Villalba del Alcor	2285-GNH	1	1
Escacena del Campo	Paterna del Campo	9461-GLS	1	1
Chucena	Escacena del Campo	9461-GLS	1	1
BASE	Manzanilla	2285-GNH	1	1
BASE	Chucena	9461-GLS	1	1

Tabla 5.2B: Recorrido Vehículos Base Condado (Variable x_{ijkv})

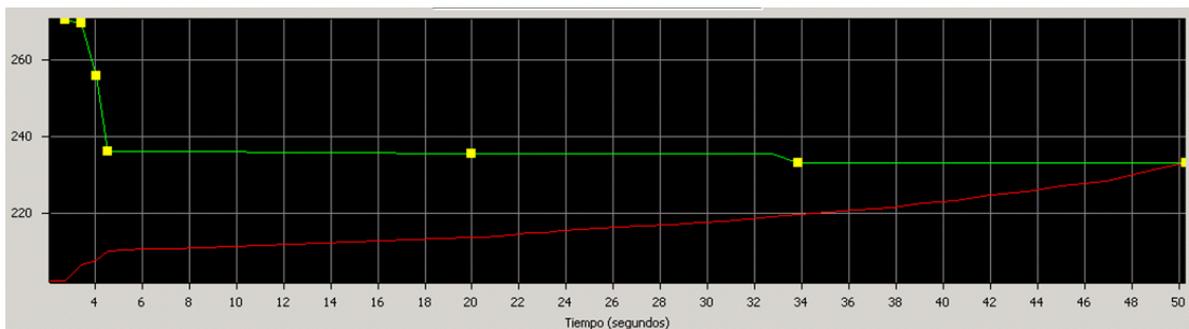


Figura 5.2A Estadística: Base de vehículos de CONDADO

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base: Condado								
Num.Veh:	2		Factor de compresión:	15		Vel.Pob:	15	
Vehículo	Carga Max	Horas Max	Velocidad Media carretera	Tiempo Vaciado Vehículo	Carga máxima Vehículo (m3)	Tiempo Recogida contenedor (hrs)	Observ.	
2285-GNH	270	8	50	0,25	18	0,015	Carga trasera	
9461-GLS	345	8	50	0,25	23	0,015	Carga trasera	
TOTAL POBLACIONES: 6								
Población	LatGr	LonGr	Número Contenedores	Diametro medio (kms)	Poblacion (kms)	Est.Transferencia		
BASE	37,387845	-6,553400						
Chucena	37,361570	-6,393946	75	0,80	7,20	Villarrasa		
Escacena del Campo	37,410330	-6,389561	73	0,80	7,20	Villarrasa		
Manzanilla	37,387730	-6,429422	82	1,10	9,90	Villarrasa		
Paterna del Campo	37,420960	-6,401431	95	1,00	9,00	Villarrasa		
Villalba del Alcor	37,397290	-6,476595	86	1,10	9,90	Villarrasa		
Villarrasa	37,389450	-6,606914	76	0,80	7,20	Villarrasa		
ESTACION	37,451310	-6,636752						
TOTAL:			487					

D
A
T
O
S

R E S U L T A D O S

Mínima distancia:		153,0									
Carga/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Total					
2285-GNH	244					244					
9461-GLS	243					243					
Total	487					487					
Distancia/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Interior pobl.	Viaje regr.	Total			
2285-GNH	34,2					30,0	--	64,2			
9461-GLS	42,5					26,0	--	68,5			
Total	76,6		44,9			56,0	20,4	197,9			
Tot. Recorrido:					121,5						
Tiempo recorrido/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	t.descarga	contenedores	t.poblaciones	t.regreso	Total	t. veh
2285-GNH	0,7					0,3	3,7	2,0	0,2	6,8	6,8
9461-GLS	0,8					0,3	3,6	1,7	0,2	6,7	6,7
Total	1,5					0,5	7,3	3,7	0,4	13,5	13,5
Tot. Recorrido:					1,5						
Cantidades recogidas (y TV):	2285-GNH	9461-GLS	Total	Número de visitas	2285-GNH	9461-GLS	Total				
Chucena		75	75	Chucena		1	1				
Escacena del Campo		73	73	Escacena del Campo		1	1				
Manzanilla	82		82	Manzanilla	1		1				
Paterna del Campo		95	95	Paterna del Campo		1	1				
Villalba del Alcor	86		86	Villalba del Alcor	1		1				
Villarrasa	76		76	Villarrasa	1		1				
Total	244	243	487	Total	3	3	6				
Número viajes: 4											
Número visitas: 6											

R
E
S
U
L
T
A
D
O
S

Figura 5.2B Resultado Base de vehículos de CONDADO



Figura 5.2C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos de CONDADO

1 9461-GLS Viaje 1

Base de vehículos: CUENCA MINERA (Segundo Modelo)

Estación de Transferencia: **El Campillo**

epgap	= 0.0001;
epagap	= 35;
NV	= 5;
U	= 1000;
PesoNumViajes	= 5;
PesoNumVisitas	= 10;

Tabla 5.3A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: CUENCA MINERA

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

sPunt (tamaño 18)	sPunt (tamaño 18)	sVehi (tamaño 2)	viaT (tamaño 6)	Valor
ESTACION	Minas de Riotinto	7273-GLR	5	1
ESTACION	Buitron (Zalamea la Real)	8977-GLY	4	1
ESTACION	BASE	8977-GLY	6	1
ESTACION	BASE	7273-GLR	6	1
Zalamea la Real	ESTACION	7273-GLR	1	1
Traslasierra (El Campillo)	El Villar (Zalamea la Real)	8977-GLY	4	1
Nerva	ESTACION	8977-GLY	4	1
Monte Sorromero (Zalamea la Real)	Las Delgadas (Zalamea la Real)	7273-GLR	5	1
Minas de Riotinto	Monte Sorromero (Zalamea la Real)	7273-GLR	5	1
Membrillo (Zalamea la Real)	Zalamea la Real	7273-GLR	1	1
Marigenta (Zalamea la Real)	ESTACION	7273-GLR	5	1
Las Delgadas (Zalamea la Real)	Marigenta (Zalamea la Real)	7273-GLR	5	1
La Granada de Riotinto	Membrillo (Zalamea la Real)	7273-GLR	1	1
La Dehesa (Minas de Riotinto)	Nerva	8977-GLY	4	1
El Villar (Zalamea la Real)	Berrocal	8977-GLY	4	1
El Pozuelo (Zalamea la Real)	La Granada de Riotinto	7273-GLR	1	1
El Campillo	ESTACION	8977-GLY	1	1
Campofrío	La Dehesa (Minas de Riotinto)	8977-GLY	4	1
Buitron (Zalamea la Real)	Traslasierra (El Campillo)	8977-GLY	4	1
Berrocal	Campofrío	8977-GLY	4	1
BASE	El Pozuelo (Zalamea la Real)	7273-GLR	1	1
BASE	El Campillo	8977-GLY	1	1

Tabla 5.3B: Recorrido Vehículos Base CUENCA MINERA (Variable x_{ijkv})

Valores de entrada y resultados, tal y como quedan reflejados en la hoja de cálculo auxiliar:

(Observamos que hemos tenido que emplear turnos de diez horas en cada vehículo para poder realizar el recorrido, según las premisas planteadas):

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base: Cuenca Minera							
Num.Veh:	Factor de compresión:			Vel.Pob: 15			
Vehículo	Carga Max	Horas Max	Velocidad Media carretera	Tiempo Vaciado Vehículo	Carga máxima Vehículo (m3)	Tiempo Recogida contenedor (hrs)	Observ.
7273-GLR	180	10	50	0,25	12	0,015	Carga trasera
8977-GLY	270	10	50	0,25	18	0,015	Carga trasera
TOTAL POBLACIONES: 16							
Población	LatGr	LongR	Número Contenedores	Diametro medio (kms)	Reconocido Poblacion (kms)	Est.Transferencia	
BASE	37,690360	-6,628625				Aprox	
Berrocal	38,000000	-6,883333	13	0,32	2,88		El Campillo
Buitron (Zalamea la Real)	37,682397	-6,650078	3	0,11	0,99		El Campillo
Campofrío	37,767760	-6,573099	31	0,60	5,40		El Campillo
El Campillo	37,693320	-6,630814	72	0,75	6,75		El Campillo
El Pozuelo (Zalamea la Real)	37,612378	-6,677104	3	0,20	1,80		El Campillo
El Villar (Zalamea la Real)	37,693863	-6,739133	3	0,25	2,25		El Campillo
La Dehesa (Minas de Riotinto)	37,710000	-6,580000	3	0,35	3,15		El Campillo
La Granada de Riotinto	37,231560	-6,918230	11	0,30	2,70		El Campillo
Las Delgadas (Zalamea la Real)	37,658779	-6,576082	1	0,25	2,25		El Campillo
Marigenta (Zalamea la Real)	37,623694	-6,582180	3	0,15	1,35		El Campillo
Membrillo (Zalamea la Real)	37,637313	-6,644148	3	0,15	1,35		El Campillo
Minas de Riotinto	37,693910	-6,591848	125	1,50	13,50		El Campillo
Monte Sorromero (Zalamea la Real)	37,671476	-6,578077	3	0,12	1,08		El Campillo
Nerva	37,695110	-6,550632	173	1,50	13,50		El Campillo
Traslasierra (El Campillo)	37,698831	-6,658914	3	0,17	1,53		El Campillo
Zalamea la Real	37,678910	-6,660578	99	0,9	8,10		El Campillo
ESTACION	37,689947	-6,644921				Aprox	
TOTAL:			549				

R E S U L T A D O S

Mínima distancia: 319,4											
Carga/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Total					
7273-GLR	116				132	248					
8977-GLY	72			229		301					
Total	188			229	132	549					
Distancia/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Interior pobl.	Viaje regr.	Total			
7273-GLR	115,0				22,0	35,7	--	172,7			
8977-GLY	1,7			101,7		40,5	--	143,9			
Total	116,6			101,7	22,0	76,2	2,9	319,4			
Tot. Recorrido: 240,4											
Tiempo recorrido/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	t.des.carga	contenedores	t.poblaciones	t regreso	Total	t. veh
7273-GLR	2,3				0,4	0,5	3,7	2,4	0,0	9,4	9,4
8977-GLY	0,0			2,0		0,5	4,5	2,7	0,0	9,8	9,8
Total	2,3			2,0	0,4	1,0	8,2	5,1	0,1	19,2	19,2
Tot. Recorrido: 4,8											
Cantidades recogidas (y_TV):	7273-GLR	8977-GLY	Total	Número de visitas				7273-GLR	8977-GLY	Total	
Berrocal		13	13						1	1	
Buitron (Zalamea la Real)		3	3						1	1	
Campofrío		31	31						1	1	
El Campillo		72	72						1	1	
El Pozuelo (Zalamea la Real)	3		3					1		1	
El Villar (Zalamea la Real)		3	3						1	1	
La Dehesa (Minas de Riotinto)		3	3						1	1	
La Granada de Riotinto	11		11					1		1	
Las Delgadas (Zalamea la Real)	1		1					1		1	
Marigenta (Zalamea la Real)	3		3					1		1	
Membrillo (Zalamea la Real)	3		3					1		1	
Minas de Riotinto	125		125					1		1	
Monte Sorromero (Zalamea la Real)	3		3					1		1	
Nerva		173	173						1	1	
Traslasierra (El Campillo)		3	3						1	1	
Zalamea la Real	99		99					1		1	
Total	248	301	549					8	8	16	
Número viajes:										6	
Número visitas:										16	

Figura 5.3B Resultado Base de vehículos de CUENCA MINERA



— 7273-GLR Viaje 1
- - 7273-GLR Viaje 2
— 8977-GLY Viaje 1
- - 8977-GLY Viaje 2

Figura 5.3C Recorrido de vehículo

Base de vehículos: Isla Cristina (Segundo Modelo)

Estación de Transferencia: **La Redondela**

epgap	= 0.0001;
epagap	= 15;
NV	= 5;
U	= 1000;
PesoNumViajes	= 5;
PesoNumVisitas	= 10;

Tabla 5.4A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: ISLA CRISTINA

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

sPunt (tamaño 9)	sPunt (tamaño 9)	sVehi (tamaño 4)	viaT (tamaño 6)	Valor
ESTACION	Islantilla (Isla Cristina)	2276-GNH	2	1
ESTACION	Isla Cristina	2276-GNH	3	1
ESTACION	BASE	9469-GLS	6	1
ESTACION	BASE	9481-GLS	6	1
ESTACION	BASE	9487-GLS	6	1
ESTACION	BASE	2276-GNH	6	1
Villablanca	ESTACION	9487-GLS	1	1
Urbasur (Isla Cristina)	La Redondela (Isla Cristina)	2276-GNH	2	1
Pozo Camino (Ayamonte)	ESTACION	2276-GNH	2	1
La Redondela (Isla Cristina)	Pozo Camino (Ayamonte)	2276-GNH	2	1
Islantilla (Isla Cristina)	Urbasur (Isla Cristina)	2276-GNH	2	1
Isla Cristina	ESTACION	2276-GNH	3	1
Isla Cristina	ESTACION	2276-GNH	1	1
Ayamonte	ESTACION	9469-GLS	1	1
Ayamonte	ESTACION	9481-GLS	1	1
BASE	Villablanca	9487-GLS	1	1
BASE	Isla Cristina	2276-GNH	1	1
BASE	Ayamonte	9469-GLS	1	1
BASE	Ayamonte	9481-GLS	1	1

Tabla 5.4B: Recorrido Vehículos Base ISLA CRISTINA (Variable x_{ijkv})

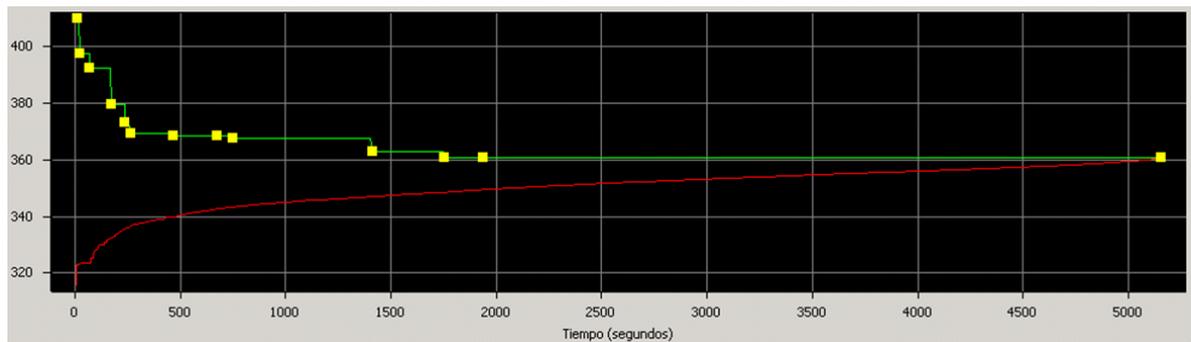


Figura 5.4A Estadística: Base de vehículos de ISLA CRISTINA

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base: Isla Cristina								D A T O S	
Num.Veh:	4		Factor de compresión:		15		Vel.Pob:		15
Vehículo	Carga Max	Horas Max	Velocidad Media carretera	Tiempo Vaciado Vehículo	Carga máxima Vehículo (m3)	Tiempo Recogida contenedor (hrs)	Observ.		
2276-GNH	270	16	50	0,25	18	0,015	Carga trasera		
9487-GLS	270	3	50	0,25	18	0,015	Carga trasera		
9481-GLS	345	8	50	0,25	23	0,015	Carga trasera		
9469-GLS	345	8	50	0,25	23	0,015	Carga trasera		
TOTAL POBLACIONES:									
Población	LatGr	LonGr	Número Contenedores	Diametro medio (kms)	Recorrido Poblacion (kms)		Est.Transferencia		
BASE	37,205097	-7,326566				Aprox			
Ayamonte	37,214660	-7,409819	648	2,20	19,80		La Redondela		
Isla Cristina	37,199430	-7,325246	517	1,90	17,10		La Redondela		
Islantilla (Isla Cristina)	37,207569	-7,236660	43	2,40	21,60		La Redondela		
La Redondela (Isla Cristina)	37,222802	-7,270816	43	0,60	5,40		La Redondela		
Pozo Camino (Ayamonte)	37,224552	-7,315185	44	0,50	4,50		La Redondela		
Urbasur (Isla Cristina)	37,206607	-7,247178	7	0,90	8,10		La Redondela		
Villablanca	37,303730	-7,341905	62	0,90	8,10		La Redondela		
ESTACION	37,244781	-7,275703				Aprox			
TOTAL:			1.364						

R E S U L T A D O S											
Mínima distancia:		220,6									
Carga/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Total					
2276-GNH	247	137	270			654					
9487-GLS	62					62					
9481-GLS	303					303					
9469-GLS	345					345					
Total	957	137	270			1.364					
Distancia/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Interior pobl.	Viaje regr.	Total			
2276-GNH	7,3	17,2	13,4			64,9	--	102,8			
9487-GLS	19,8					9,0	--	28,8			
9481-GLS	19,8					11,5	--	31,2			
9469-GLS	19,8					12,7	--	32,5			
Total	66,7	17,2	13,4			98,1	25,2	220,6			
Tot. Recorrido: 97,3											
Tiempo recorrido/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	t.descarga	contenedores	t.poblaciones	t.regreso	Total	t. veh
2276-GNH	0,1	0,3	0,3			0,8	9,8	4,3	0,1	15,8	15,8
9487-GLS	0,4					0,3	0,9	0,6	0,1	2,3	2,3
9481-GLS	0,4					0,3	4,5	0,8	0,1	6,1	6,1
9469-GLS	0,4					0,3	5,2	0,8	0,1	6,8	6,8
Total	1,3	0,3	0,3			1,5	20,5	6,5	0,5	31,0	31,0
Tot. Recorrido: 1,9											
Cantidades recogidas (y_TV):	2276-GNH	9487-GLS	9481-GLS	9469-GLS	Total	Número de visitas				Total	
Ayamonte			303	345	303					1	1
Isla Cristina					517						2
Islantilla (Isla Cristina)	43				43						1
La Redondela (Isla Cristina)	43				43						1
Pozo Camino (Ayamonte)	44				44						1
Urbasur (Isla Cristina)	7				7						1
Villablanca		62			62					1	1
Total	654	62	303	345	1364	6	1	1	1	9	9

Número viajes:	10
Número visitas:	9

Figura 5.4B Resultado Base de vehículos de ISLA CRISTINA

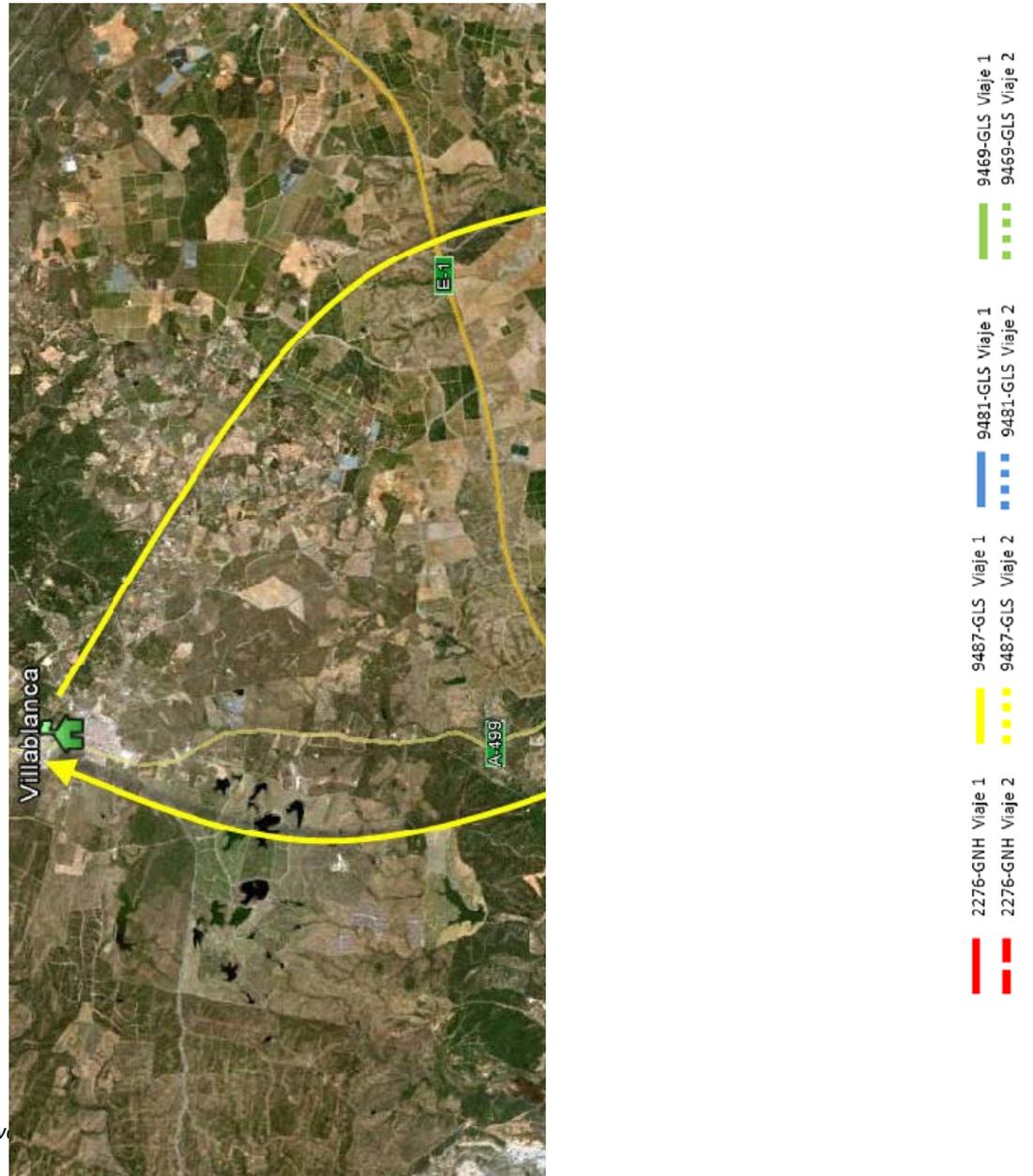


Figura 5.4C Recorrido de v

Base de vehículos: ANDÉVALO (Tercer Modelo)

Estaciones de Transferencia: **Andévalo y La Redondela**

epgap	= 0.0001;
epagap	= 160;
NV	= 5;
U	= 1000;
PesoNumViajes	= 10;
PesoNumVisitas	= 10;

Tabla 5.5A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: ANDÉVALO

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

sPunt (tamaño 20)	sPunt (tamaño 20)	sVehi (tamaño 2)	viaT (tamaño 6)	Valor
ESTACION_1	Villanueva de las Cruces	7331-GLR	2	1
ESTACION_1	Paymogo	8950-GLY	2	1
ESTACION_1	BASE	8950-GLY	6	1
ESTACION_1	BASE	7331-GLR	6	1
Villanueva d... Castillejos	ESTACION_1	7331-GLR	2	1
Villanueva de las Cruces	La Puebla de Guzmán	7331-GLR	2	1
Sotiel Coro...a (Calañas)	Alosno	7331-GLR	1	1
Santa Bárbara de Casa	Cabezas Rubias	8950-GLY	2	1
Sanlúcar de Gadiana	El Almendro	8950-GLY	1	1
San Silvestre de Guzmán	Sanlúcar de Gadiana	8950-GLY	1	1
San Bartolo...de la Torre	Villanueva d... Castillejos	7331-GLR	2	1
Paymogo	Santa Bárbara de Casa	8950-GLY	2	1
La Zarza (Calañas)	El Perrunal (Calañas)	8950-GLY	1	1
La Puebla de Guzmán	El Granada	7331-GLR	2	1
El Perrunal (Calañas)	El Cerro de Andévalo	8950-GLY	1	1
El Granada	San Bartolo...de la Torre	7331-GLR	2	1
El Cerro de Andévalo	San Silvestre de Guzmán	8950-GLY	1	1
El Almendro	ESTACION_1	8950-GLY	1	1
Calañas	Sotiel Coro...a (Calañas)	7331-GLR	1	1
Cabezas Rubias	ESTACION_1	8950-GLY	2	1
Alosno	ESTACION_1	7331-GLR	1	1
BASE	La Zarza (Calañas)	8950-GLY	1	1
BASE	Calañas	7331-GLR	1	1

Tabla 5.5B: Recorrido Vehículos Base ANDÉVALO (Variable x_{ijkv})

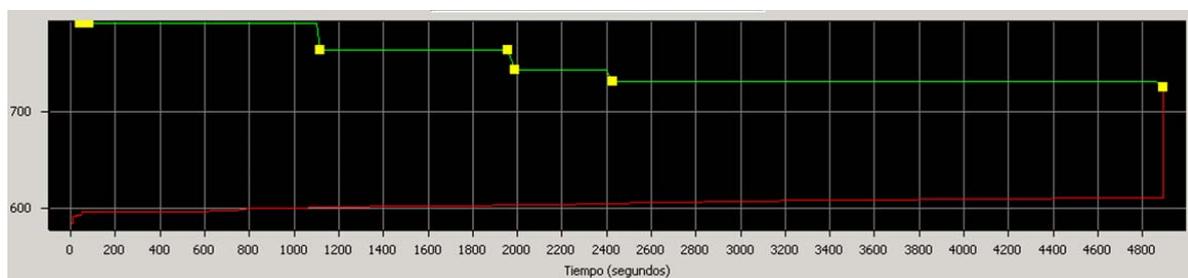


Figura 5.5A Estadística. Base de vehículos de ANDÉVALO

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base: Andévalo									
Num.Veh:		Factor de compresión:			Vel.Pob:				
2		15			15				
Vehículo	Carga Max	Horas Max	Velocidad Media carretera	Tiempo Vaciado Vehículo	Carga máxima Vehículo (m3)	Tiempo Recogida contenedor (hrs)	Observ.		
7331-GLR	270	18	40	0,25	18	0,015	Carga trasera		
8950-GLY	270	18	40	0,25	18	0,015	Carga trasera		
TOTAL POBLACIONES: 17									
Población	LatGr	LonGr	Numero Contendores	Diametro medio (kms)	Recorrido Poblacion (kms)	Est.Transferencia			
BASE	37,736454	-6,933326				Aprox			
Alosno	37,549360	-7,115428	136	0,80	7,20	Andévalo			
Cabezas Rubias	37,726500	-7,087451	29	0,40	3,60	Andévalo			
Calañas	37,654820	-6,878683	111	0,90	8,10	Andévalo			
El Almendro	37,506930	-7,270019	22	0,40	3,60	Andévalo			
El Cerro de Andévalo	37,735190	-6,938734	105	0,80	7,20	Andévalo			
El Granado	37,264690	-6,926992	23	0,36	3,24	Andévalo			
El Perrunal (Calañas)	37,709990	-6,869013	21	0,40	3,60	Andévalo			
La Puebla de Guzmán	37,387840	-6,553400	75	0,96	8,64	Andévalo			
La Zarza (Calañas)	37,712524	-6,853573	22	0,70	6,30	Andévalo			
Paymogo	37,740630	-7,345994	31	0,55	4,95	Andévalo			
San Bartolomé de la Torre	37,445960	-7,106683	82	0,75	6,75	Andévalo			
San Silvestre de Guzmán	37,388400	-7,350305	17	0,43	3,87	La Redondela			
Sanlúcar de Guadiana	37,473180	-7,467861	15	0,36	3,24	Andévalo			
Santa Bárbara de Casa	37,796550	-7,188633	34	0,55	4,95	Andévalo			
Sotiel Coronada (Calañas)	37,601456	-6,850437	3	0,45	4,05	Andévalo			
Villanueva de las Cruces	37,627620	-7,024521	14	0,35	3,15	Andévalo			
Villanueva de los Castillejos	37,500460	-7,272443	74	0,90	8,10	Andévalo			
ESTACION_1	37,607909	-7,174455				Aprox	ESTACION ANDEVALO		
ESTACION_2	37,229628	-7,274425					ESTACION REDONDELA		
TOTAL:			814						

D
A
T
O
S

R E S U L T A D O S											
Minima distancia:		533,5									
Carga/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Total					
7331-GLR	250	268				518					
8950-GLY	202	94				296					
Total	452	362				814					
Distancia/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Interior pobl.	Viaje regr.	Total			
7331-GLR	49,1	154,8				54,7	--	258,6			
8950-GLY	114,5	63,3				45,9	--	223,7			
Total	163,6	218,1				100,6	51,2	533,5			
		Tot. Recorrido:			381,7						
Tiempo recorrido/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	t.descarga	contenedores	t.poblaciones	t regreso	Total	t_veh
7331-GLR	1,2	3,9				0,5	7,8	3,6		17,0	17,0
8950-GLY	2,9	1,6				0,5	4,4	3,1		12,4	12,4
Total	4,1	5,5				1,0	12,2	6,7		29,5	29,5
		Tot. Recorrido:			9,5						
Cantidades recogidas (y TV):	7331-GLR	8950-GLY	Total		Número de visitas		7331-GLR	8950-GLY	Total		
Alosno	136		136		Alosno		1		1		
Cabezas Rubias		29	29		Cabezas Rubias			1	1		
Calañas	111		111		Calañas		1		1		
El Almendro		22	22		El Almendro			1	1		
El Cerro de Andévalo		105	105		El Cerro de Andévalo			1	1		
El Granado	23		23		El Granado		1		1		
El Perrunal (Calañas)		21	21		El Perrunal (Calañas)			1	1		
La Puebla de Guzmán	75		75		La Puebla de Guzmán		1		1		
La Zarza (Calañas)		22	22		La Zarza (Calañas)			1	1		
Paymogo		31	31		Paymogo			1	1		
San Bartolomé de la Torre	82		82		San Bartolomé de la Torre		1		1		
San Silvestre de Guzmán		17	17		San Silvestre de Guzmán			1	1		
Sanlúcar de Guadiana		15	15		Sanlúcar de Guadiana			1	1		
Santa Bárbara de Casa		34	34		Santa Bárbara de Casa			1	1		
Sotiel Coronada (Calañas)	3		3		Sotiel Coronada (Calañas)		1		1		
Villanueva de las Cruces	14		14		Villanueva de las Cruces		1		1		
Villanueva de los Castillejos	74		74		Villanueva de los Castillejos		1		1		
Total	518	296	814		Total		8	9	17		

R
E
S
U
L
T
A
D
O
S

Número viajes:	6
Número visitas:	17

Figura 5.5B Resultado Base de vehículos de ANDÉVALO



Figura 5.5C Recorrido de vehículo

Base de vehículos: ANDÉVALO. Opción B (Tercer Modelo)

Observamos que en el caso anterior, el algoritmo no ha necesitado utilizar la Estación de Transferencia de La Redondela. En esta opción forzamos a que se visite ambas Estaciones de Transferencia. Lógicamente la distancia recorrida es menos óptima.

Estaciones de Transferencia: **Andévalo y La Redondela**

epgap	= 0.0001;
epagap	= 70;
NV	= 5;
U	= 1000;

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS
URBANOS

PesoNumViajes = 10; PesoNumVisitas = 10;

Tabla 5.6A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: ANDÉVALO Opción B

sPunt (tamaño 20)	sPunt (tamaño 20)	sVehi (tamaño 2)	viaT (tamaño 6)	Valor
ESTACION_2	San Bartolomé de la Torre	7331-GLR	2	1
ESTACION_1	El Almendo	8950-GLY	2	1
ESTACION_1	BASE	8950-GLY	6	1
ESTACION_1	BASE	7331-GLR	6	1
Villanueva de los Castillejos	ESTACION_1	8950-GLY	2	1
Villanueva de las Cruces	ESTACION_1	7331-GLR	2	1
Sotiel Coronada (Calañas)	La Puebla de Guzmán	7331-GLR	1	1
Santa Bárbara de Casa	Paymogo	8950-GLY	1	1
Sanlúcar de Guadiana	ESTACION_1	8950-GLY	1	1
San Silvestre de Guzmán	Sanlúcar de Guadiana	8950-GLY	1	1
San Bartolomé de la Torre	Alosno	7331-GLR	2	1
Paymogo	San Silvestre de Guzmán	8950-GLY	1	1
La Zarza (Calañas)	Calañas	7331-GLR	1	1
La Puebla de Guzmán	El Granado	7331-GLR	1	1
El Perrunal (Calañas)	La Zarza (Calañas)	7331-GLR	1	1
El Granado	ESTACION_2	7331-GLR	1	1
El Cerro de Andévalo	Cabezas Rubias	8950-GLY	1	1
El Almendo	Villanueva de los Castillejos	8950-GLY	2	1
Calañas	Sotiel Coronada (Calañas)	7331-GLR	1	1
Cabezas Rubias	Santa Bárbara de Casa	8950-GLY	1	1
Alosno	Villanueva de las Cruces	7331-GLR	2	1
BASE	El Perrunal (Calañas)	7331-GLR	1	1
BASE	El Cerro de Andévalo	8950-GLY	1	1

Tabla 5.6B: Recorrido Vehículos Base ANDÉVALO Opción B (Variable x_{ijkv})

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base: Andévalo (Opción B)									
Num.Veh:		Factor de compresión:			Vel.Pob:		Observ.		
Vehículo	Carga Max	Horas Max	Velocidad Media carretera	Tiempo Vaciado Vehículo	Carga máxima Vehículo (m3)	Tiempo Recogida contenedor (hrs)			
7331-GLR	270	18	40	0,25	18	0,015	Carga trasera		
8950-GLY	270	18	40	0,25	18	0,015	Carga trasera		
TOTAL POBLACIONES:									
Población	LatGr	LonGr	Contenedores	Diametro medio (kms)	Recorrido (kms)	Est.Transferencia			
BASE	37,736454	-6,933326				Aprox			
Alosno	37,549360	-7,115428	136	0,80	7,20	Andévalo			
Cabezas Rubias	37,726500	-7,087451	29	0,40	3,60	Andévalo			
Calañas	37,654820	-6,878683	111	0,90	8,10	Andévalo			
El Almendro	37,506930	-7,270019	22	0,40	3,60	Andévalo			
El Cerro de Andévalo	37,735190	-6,938734	105	0,80	7,20	Andévalo			
El Granado	37,264690	-6,926992	23	0,36	3,24	Andévalo			
El Perrunal (Calañas)	37,709990	-6,869013	21	0,40	3,60	Andévalo			
La Puebla de Guzmán	37,387840	-6,553400	75	0,96	8,64	Andévalo			
La Zarza (Calañas)	37,712524	-6,853573	22	0,70	6,30	Andévalo			
Paymogo	37,740630	-7,345994	31	0,55	4,95	Andévalo			
San Bartolomé de la Torre	37,445960	-7,106683	82	0,75	6,75	Andévalo			
San Silvestre de Guzmán	37,388400	-7,350305	17	0,43	3,87	La Redondeña			
Sanlúcar de Guadiana	37,473180	-7,467861	15	0,36	3,24	Andévalo			
Santa Bárbara de Casa	37,796550	-7,188633	34	0,55	4,95	Andévalo			
Sotiel Coronada (Calañas)	37,601456	-6,850437	3	0,45	4,05	Andévalo			
Villanueva de las Cruces	37,627620	-7,024521	14	0,35	3,15	Andévalo			
Villanueva de los Castillejos	37,500460	-7,272443	74	0,90	8,10	Andévalo			
ESTACION_1	37,607909	-7,174455				Aprox	ESTACION ANEVALO		
ESTACION_2	37,229628	-7,274425					ESTACION REDONDELA		
TOTAL:			814						

R E S U L T A D O S									
Minima distancia:		493,1							
Carga/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Total			
7331-GLR	255	232				487			
8950-GLY	231	96				327			
Total	486	328				814			
Distancia/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Interior pobl.	Viaje regr.	Total	
7331-GLR	123,1	65,0				56,7	--	244,8	
8950-GLY	123,7	29,5				43,9	--	197,1	
Total	246,8	94,5				100,6	51,2	493,1	
Tot. Recorrido: 341,3									
Tiempo recorrido/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	t_descarga	contenedores	t_poblaciones	t_registro
7331-GLR	3,1	1,6				0,5	7,3	3,8	0,6
8950-GLY	3,1	0,7				0,5	4,9	2,9	0,6
Total	6,2	2,4				1,0	12,2	6,7	1,3
Tot. Recorrido: 8,5									
Total: 29,7 29,7									
Cantidades recogidas (y_TV):	7331-GLR	8950-GLY	Total		Número de visitas		7331-GLR	8950-GLY	Total
Alosno	136		136		Alosno		1		1
Cabezas Rubias		29	29		Cabezas Rubias			1	1
Calañas	111		111		Calañas		1		1
El Almendro		22	22		El Almendro			1	1
El Cerro de Andévalo		105	105		El Cerro de Andévalo			1	1
El Granado	23		23		El Granado		1		1
El Perrunal (Calañas)	21		21		El Perrunal (Calañas)		1		1
La Puebla de Guzmán	75		75		La Puebla de Guzmán		1		1
La Zarza (Calañas)	22		22		La Zarza (Calañas)		1		1
Paymogo		31	31		Paymogo			1	1
San Bartolomé de la Torre	82		82		San Bartolomé de la Torre		1		1
San Silvestre de Guzmán		17	17		San Silvestre de Guzmán			1	1
Sanlúcar de Guadiana		15	15		Sanlúcar de Guadiana			1	1
Santa Bárbara de Casa		34	34		Santa Bárbara de Casa			1	1
Sotiel Coronada (Calañas)	3		3		Sotiel Coronada (Calañas)		1		1
Villanueva de las Cruces	14		14		Villanueva de las Cruces		1		1
Villanueva de los Castillejos		74	74		Villanueva de los Castillejos			1	1
Total	487	327	814		Total		9	8	17
Número viajes: 6									
Número visitas: 17									

Figura 5.6B Resultado Base de vehículos de ANDÉVALO (Opción B)

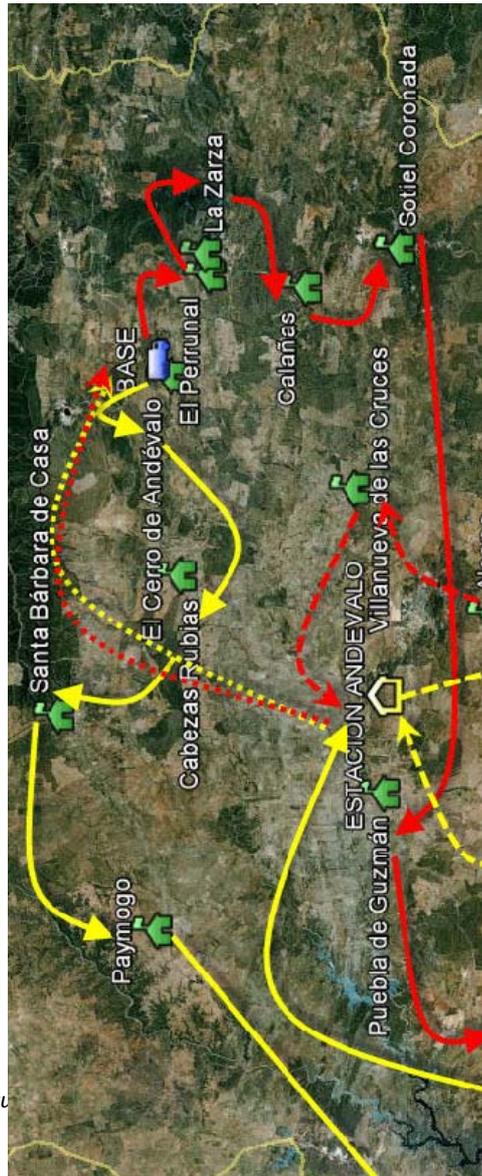


Figura 5.6C Recorrido de vehículos (Opción B)

7331-GLR Viaje 1 █ 8950-GLY Viaje 1 █

Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA. Sist. NORD. VERANO (Tercer Modelo)

Utilizamos los cuatro vehículos de esta base que disponen del sistema Nord. Para trabajar con simulación de verano, establecemos el nivel de compresión en 5, en esta primera opción en la que no forzamos utilicen ambas Estaciones de Transferencia.

Estaciones de Transferencia: **Huelva y La Redondela**

epgap	= 0.0001;
epagap	= 150;
NV	= 5;
U	= 1000;
PesoNumViajes	= 10;
PesoNumVisitas	= 10;

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Tabla 5.7A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA Nord Verano

sPunt (tamaño 10)	sPunt (tamaño 10)	sVehi (tamaño 4)	viaT (tamaño 6)	Valor
ESTACION_2	El Portil (Cartaya)	1673 GPP	2	1
ESTACION_1	Dehesa Golf (Aljaraque)	7238-GMY	2	1
ESTACION_1	Corrales (Aljaraque)	0868-GMY	3	1
ESTACION_1	Aljaraque	0868-GMY	2	1
ESTACION_1	BASE	1673 GPP	6	1
ESTACION_1	BASE	7238-GMY	6	1
ESTACION_1	BASE	0856-GMY	6	1
ESTACION_1	BASE	0868-GMY	6	1
Punta Umbría	ESTACION_1	7238-GMY	1	1
Punta Umbría	ESTACION_1	0856-GMY	1	1
Punta Umbría	ESTACION_1	0868-GMY	1	1
Punta Umbría	El Rompido (Cartaya)	1673 GPP	1	1
El Rompido (Cartaya)	ESTACION_2	1673 GPP	1	1
El Portil (Cartaya)	Bellavista (Aljaraque)	1673 GPP	2	1
Dehesa Golf (Aljaraque)	Aljaraque	7238-GMY	2	1
Corrales (Aljaraque)	ESTACION_1	0868-GMY	3	1
Bellavista (Aljaraque)	ESTACION_1	1673 GPP	2	1
Bellavista (Aljaraque)	ESTACION_1	0868-GMY	2	1
Aljaraque	ESTACION_1	7238-GMY	2	1
Aljaraque	Bellavista (Aljaraque)	0868-GMY	2	1
BASE	Punta Umbría	1673 GPP	1	1
BASE	Punta Umbría	7238-GMY	1	1
BASE	Punta Umbría	0856-GMY	1	1
BASE	Punta Umbría	0868-GMY	1	1

Tabla 5.7B: Recorrido Vehículos Base PUNTA UMBRÍA Nord Verano (Variable x_{ijkw})

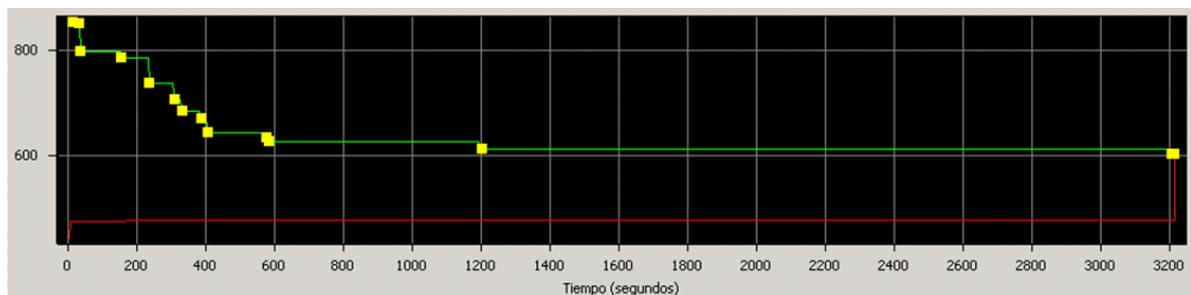


Figura 5.7A Estadística: Base de vehículos de PUNTA UMBRÍA (NORD-VERANO)

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base: Punta Umbría (Sistema Nord)										VERANO		Opción A	
Num.Veh:		Factor de compresión:				Vel.Pob:							
Vehículo	Carga Max	Horas Max	Velocidad Media carretera	Tiempo Vaciado Vehículo	Carga máxima Vehículo (m3)	Tiempo Recogida contenedor (hrs)	Observ.	Esta. Transf.					
0868-GMY	80	8	50	0,25	16	0,015	Sist. NORD	REDONDELA/HUELVA					
0856-GMY	80	8	50	0,25	16	0,015	Sist. NORD	REDONDELA/HUELVA					
7238-GMY	80	8	50	0,25	16	0,015	Sist. NORD	HUELVA					
1673 GPP	80	8	50	0,25	16	0,015	Sist. NORD	HUELVA					

TOTAL POBLACIONES:		Número Contenedores		Diametro medio (kms)		Recorrido Poblacion (kms)		Est.Transferencia	
BASE	37,192870	LonGr	-6,976498					Aprox	
Aljaraque	37,271110	LonGr	-7,021585	110	1,25	11,25		Huelva	
Bellavista (Aljaraque)	37,277638	LonGr	-7,000591	86	0,90	8,10		Huelva	
Corrales (Aljaraque)	37,273292	LonGr	-6,989012	72	1,10	9,90		Huelva	
Dehesa Golf (Aljaraque)	37,288000	LonGr	-7,009000	3	0,75	6,75		Huelva	
El Portil (Cartaya)	37,209946	LonGr	-7,046824	14	1,40	12,60		La Redondela	
El Rompido (Cartaya)	37,218280	LonGr	-7,122502	56	1,15	10,35		La Redondela	
Punta Umbría	37,182480	LonGr	-6,967148	256	3,85	34,65		Huelva	
ESTACION_1	37,291870	LonGr	-6,879929				Aprox	ESTACION HUELVA	
ESTACION_2	37,244781	LonGr	-7,275703				Aprox	ESTACION REDONDELA	
TOTAL:				597					

R E S U L T A D O S											
Mínima distancia:		369,8									
Carga/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Total					
0868-GMY	80	72				152					
0856-GMY	80	80				160					
7238-GMY	72	80				152					
1673 GPP	80	53				133					
Total	312	285				597					
Distancia/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Interior pobl.	Viaje regr.	Total			
0868-GMY	15,8	19,7				25,7	--	61,2			
0856-GMY	15,8	27,5				31,8	--	75,2			
7238-GMY	29,3	35,6				26,9	--	91,8			
1673 GPP	15,8	36,7				33,3	--	85,8			
Total	76,7	119,6				117,7	55,8	369,8			
Tot. Recorrido:						196,3					
Tiempo recorrido/	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	tiempo en descarga	t.recogida contenedores	tiempo int. poblaciones	tiempo regreso	Total	t_veh
0868-GMY	0,3	0,4				0,5	2,3	1,7	0,3	5,5	5,5
0856-GMY	0,3	0,6				0,5	2,4	2,1	0,3	6,2	6,2
7238-GMY	0,6	0,7				0,5	2,3	1,8	0,3	6,2	6,2
1673 GPP	0,3	0,7				0,5	2,0	2,2	0,3	6,0	6,0
Total	1,5	2,4				2,0	9,0	7,8	1,1	23,8	23,8
Tot. Recorrido:						3,9					
Cantidades recogidas (y TV):	0868-GMY	0856-GMY	7238-GMY	1673 GPP	Total	Número de visitas					Total
Aljaraque		30	80		110	Aljaraque					2
Bellavista (Aljaraque)		47		39	86	Bellavista (Aljaraque)					2
Corrales (Aljaraque)	72				72	Corrales (Aljaraque)					1
Dehesa Golf (Aljaraque)		3			3	Dehesa Golf (Aljaraque)					1
El Portil (Cartaya)				14	14	El Portil (Cartaya)					1
El Rompido (Cartaya)			56		56	El Rompido (Cartaya)					1
Punta Umbría	80	80	16	80	256	Punta Umbría					4
Total	152	160	152	133	597	Total	2	4	3	3	12
Número viajes:										12	
Número visitas:										12	

**D
A
T
O
S**

**R
E
S
U
L
T
A
D
O
S**

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Cantidad recogida por vehículo y viaje												
0868-GMY						0856-GMY						
	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5		Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	
Aljaraque						Aljaraque		30				
Bellavista (Aljaraque)						Bellavista (Aljaraque)		47				
Corrales (Aljaraque)		72				Corrales (Aljaraque)						
Dehesa Golf (Aljaraque)						Dehesa Golf (Aljaraque)		3				
El Portil (Cartaya)						El Portil (Cartaya)						
El Rompido (Cartaya)						El Rompido (Cartaya)						
Punta Umbría	80					Punta Umbría	80					
TOTAL	80	72				TOTAL	80	80				
7238-GMY						1673 GPP						
	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5		Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	
Aljaraque		80				Aljaraque						
Bellavista (Aljaraque)						Bellavista (Aljaraque)		39				
Corrales (Aljaraque)						Corrales (Aljaraque)						
Dehesa Golf (Aljaraque)						Dehesa Golf (Aljaraque)						
El Portil (Cartaya)						El Portil (Cartaya)		14				
El Rompido (Cartaya)	56					El Rompido (Cartaya)						
Punta Umbría	16					Punta Umbría	80					
TOTAL	72	80				TOTAL	80	53				

Figura 5.7B Resultado Base de vehículos de PUNTA UMBRÍA (NORD-VERANO)

Vemos que la distancia total recorrida es de 369 kms, se emplea en total unas 24 horas de las 32 disponibles y no se utiliza la Estación de Transferencia de La Redondela.

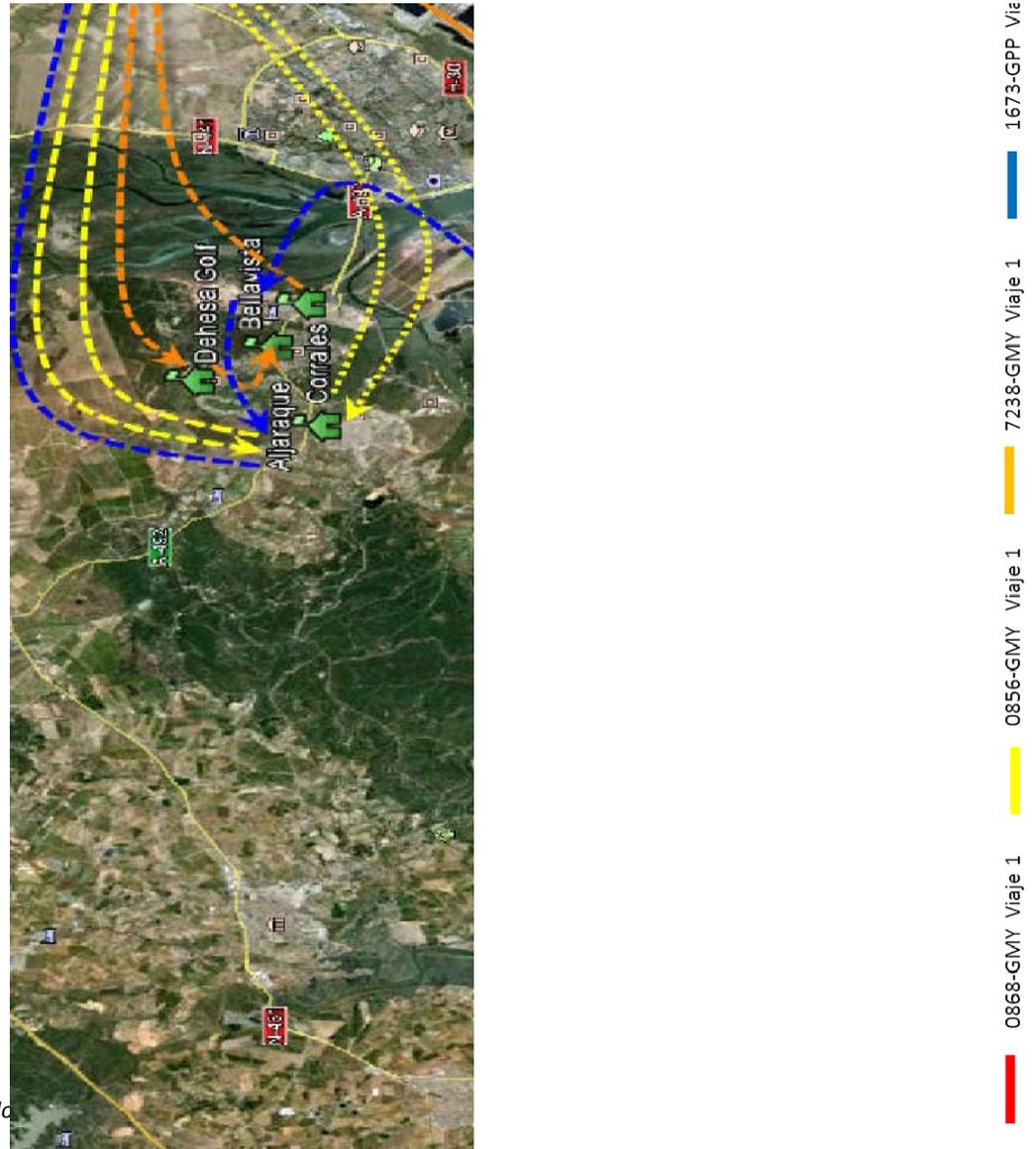


Figura 5.7C Recorrido de vehículo UMBRÍA (NORD-VERANO)

Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA. Sistema NORD. VERANO. Opción B (Tercer Modelo)

Utilizamos los cuatro vehículos de esta base que disponen del sistema Nord. Para trabajar con simulación de verano, establecemos el nivel de compresión en 5. En esta segunda opción forzamos que se utilicen ambas Estaciones de Transferencia.

Estaciones de Transferencia: **Huelva y La Redondela**

epgap	= 0.0001;
epagap	= 135;
NV	= 5;
U	= 1000;

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS
URBANOS

PesoNumViajes = 10; PesoNumVisitas = 10;

Tabla 5.8A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA Nord Verano Opción B

sPunt (tamaño 10)	sPunt (tamaño 10)	sVehi (tamaño 4)	viaT (tamaño 6)	Valor
ESTACION_2	Aljaraque	7238-GMY	2	1
ESTACION_1	Dehesa Golf (Aljaraque)	0856-GMY	2	1
ESTACION_1	Corrales (Aljaraque)	0868-GMY	2	1
ESTACION_1	Bellavista (Aljaraque)	1673 GPP	2	1
ESTACION_1	BASE	1673 GPP	6	1
ESTACION_1	BASE	7238-GMY	6	1
ESTACION_1	BASE	0856-GMY	6	1
ESTACION_1	BASE	0868-GMY	6	1
Punta Umbría	ESTACION_1	1673 GPP	1	1
Punta Umbría	ESTACION_1	0856-GMY	1	1
Punta Umbría	ESTACION_1	0868-GMY	1	1
Punta Umbría	El Rompido (Cartaya)	7238-GMY	1	1
El Rompido (Cartaya)	ESTACION_2	7238-GMY	1	1
El Portil (Cartaya)	ESTACION_1	1673 GPP	2	1
Dehesa Golf (Aljaraque)	Bellavista (Aljaraque)	0856-GMY	2	1
Corrales (Aljaraque)	ESTACION_1	0868-GMY	2	1
Bellavista (Aljaraque)	El Portil (Cartaya)	1673 GPP	2	1
Bellavista (Aljaraque)	Aljaraque	0856-GMY	2	1
Aljaraque	ESTACION_1	7238-GMY	2	1
Aljaraque	ESTACION_1	0856-GMY	2	1
BASE	Punta Umbría	1673 GPP	1	1
BASE	Punta Umbría	7238-GMY	1	1
BASE	Punta Umbría	0856-GMY	1	1
BASE	Punta Umbría	0868-GMY	1	1

Tabla 5.8B: Recorrido Vehículos Base PUNTA UMBRÍA Nord Verano Opción B (Variable x_{ijkv})

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base: Punta Umbra (Sistema Nord)										VERANO	Opción B								
Num.Veh:		4		Factor de compresión:		5		Vel.Pob:		15									
Vehículo	Carga Max	Horas Max	Velocidad Media carretera	Tiempo Vaciado Vehículo	Carga máxima Vehículo (m3)	Tiempo Recogida contenedor (hrs)	Observ.	Esta. Transf.											
0868-GMY	80	8	50	0,25	16	0,015	Sist. NORD	REDONDELA/HUELVA											
0856-GMY	80	8	50	0,25	16	0,015	Sist. NORD	REDONDELA/HUELVA											
7238-GMY	80	8	50	0,25	16	0,015	Sist. NORD	HUELVA											
1673 GPP	80	8	50	0,25	16	0,015	Sist. NORD	HUELVA											

TOTAL POBLACIONES: 7																			
Población	LatGr	LonGr	Número Contenedores	Diametro medio (kms)	Recorrido Poblacion (kms)	Est.Transferencia													
BASE	37,192870	-6,976498				Aprox													
Aljaraque	37,271110	-7,021585	110	1,25	11,25	Huelva													
Bellavista (Aljaraque)	37,277638	-7,000591	86	0,90	8,10	Huelva													
Corrales (Aljaraque)	37,273292	-6,989012	72	1,10	9,90	Huelva													
Dehesa Golf (Aljaraque)	37,288000	-7,009000	3	0,75	6,75	Huelva													
El Portil (Cartaya)	37,209946	-7,046824	14	1,40	12,60	La Redondela													
El Rompido (Cartaya)	37,218280	-7,122502	56	1,15	10,35	La Redondela													
Punta Umbria	37,182480	-6,967148	256	3,85	34,65	Huelva													
ESTACION_1	37,291870	-6,879929				Aprox		ESTACION HUELVA											
ESTACION_2	37,229628	-7,274425				Aprox		ESTACION REDONDELA											
TOTAL:			597																

R E S U L T A D O S											
Mínima distancia:		369,8									
Carga/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Total					
0868-GMY	80	72				152					
0856-GMY	80	80				160					
7238-GMY	72	80				152					
1673 GPP	80	53				133					
Total	312	285				597					
Distancia/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Interior pobl.	Viaje regr.	Total			
0868-GMY	15,8	19,7				25,7	--	61,2			
0856-GMY	15,8	27,5				31,8	--	75,2			
7238-GMY	29,3	35,6				26,9	--	91,8			
1673 GPP	15,8	36,7				33,3	--	85,8			
Total	76,7	119,6				117,7	55,8	369,8			
Tot. Recorrido: 196,3											
Tiempo recorrido/	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	tiempo en descarga	t.recogida contenedores	tiempo int. poblaciones	tiempo regreso	Total	t_veh
0868-GMY	0,3	0,4				0,5	2,3	1,7	0,3	5,5	5,5
0856-GMY	0,3	0,6				0,5	2,4	2,1	0,3	6,2	6,2
7238-GMY	0,6	0,7				0,5	2,3	1,8	0,3	6,2	6,2
1673 GPP	0,3	0,7				0,5	2,0	2,2	0,3	6,0	6,0
Total	1,5	2,4				2,0	9,0	7,8	1,1	23,8	23,8
Tot. Recorrido: 3,9											
Cantidades recogidas (y TV):	0868-GMY	0856-GMY	7238-GMY	1673 GPP	Total	Número de visitas					Total
Aljaraque		30	80		110	Aljaraque					2
Bellavista (Aljaraque)		47		39	86	Bellavista (Aljaraque)					2
Corrales (Aljaraque)	72				72	Corrales (Aljaraque)					1
Dehesa Golf (Aljaraque)		3			3	Dehesa Golf (Aljaraque)					1
El Portil (Cartaya)				14	14	El Portil (Cartaya)					1
El Rompido (Cartaya)			56		56	El Rompido (Cartaya)					1
Punta Umbria	80	80	16	80	256	Punta Umbria					4
Total	152	160	152	133	597	Total					12

Número viajes:	12
Número visitas:	12

D A T O S

R E S U L T A D O S

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Cantidad recogida por vehículo y viaje												
0868-GMY						0856-GMY						
	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5		Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	
Aljaraque						Aljaraque	30					
Bellavista (Aljaraque)						Bellavista (Aljaraque)	47					
Corrales (Aljaraque)		72				Corrales (Aljaraque)						
Dehesa Golf (Aljaraque)						Dehesa Golf (Aljaraque)	3					
El Portil (Cartaya)						El Portil (Cartaya)						
El Rompido (Cartaya)						El Rompido (Cartaya)						
Punta Umbría	80					Punta Umbría	80					
TOTAL	80	72				TOTAL	80	80				
7238-GMY						1673 GPP						
	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5		Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	
Aljaraque		80				Aljaraque						
Bellavista (Aljaraque)						Bellavista (Aljaraque)	39					
Corrales (Aljaraque)						Corrales (Aljaraque)						
Dehesa Golf (Aljaraque)						Dehesa Golf (Aljaraque)						
El Portil (Cartaya)						El Portil (Cartaya)	14					
El Rompido (Cartaya)	56					El Rompido (Cartaya)						
Punta Umbría	16					Punta Umbría	80					
TOTAL	72	80				TOTAL	80	53				

Figura 5.8B Resultado Base de vehículos de PUNTA UMBRÍA (NORD-VERANO)(Opción B)

En esta última parte podemos indicarle a cada conductor la cantidad de contenedores que ha de recoger en cada población en cada viaje.

Ahora realizamos unos 370 kms, un kilómetro más que antes con un tiempo similar: 24h y empleando también doce viajes, aunque en esta ocasión realizando dos por cada vehículo.

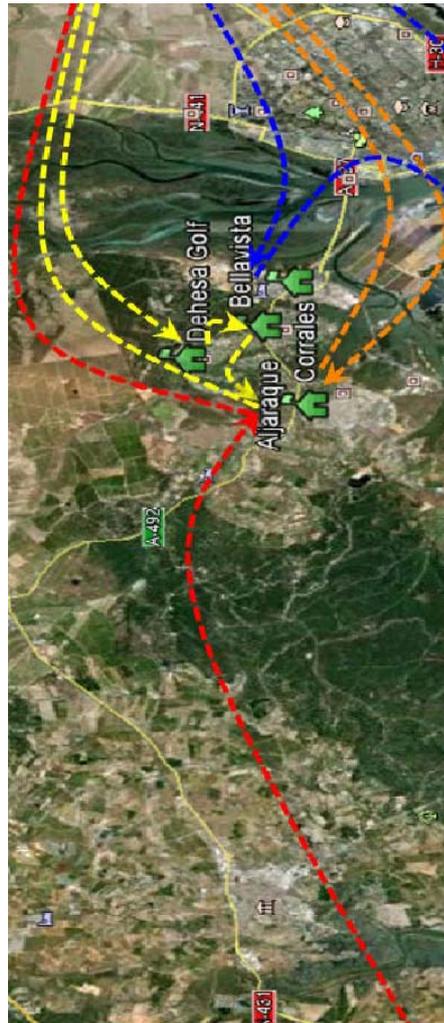


Figura 5.8C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos de PUNTA UMBRÍA (NORD-VERANO) (Op. B)

Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA. Carga Trasera. VERANO. (Op.B) (Tercer Modelo)

Utilizamos los tres vehículos de esta base que disponen de carga trasera en época de verano. Para trabajar con simulación de verano, establecemos el nivel de compresión en 6.

En este caso son iguales ambas opciones, es decir, no es necesario forzar el uso de ambas Estaciones de Transferencia. Ya se utilizan aún sin forzarlo.

Estaciones de Transferencia: **Huelva y La Redondela**

epgap	= 0.0001;
epagap	= 0;
NV	= 5;
U	= 1000;
PesoNumViajes	= 10;

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

PesoNumVisitas = 10;

Tabla 5.9A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: PUNTA UMBRÍA Carga Trasera- Verano

↓ sPunt (tamaño 5)	↓ sPunt (tamaño 5)	↓ sVehi (tamaño 3)	↓ viaT (tamaño 6)	↓ Valor
ESTACION_2	Cartaya	2294-GNH	4	1
ESTACION_2	Cartaya	2294-GNH	3	1
ESTACION_1	Cartaya	5632-CGK	2	1
ESTACION_1	Cartaya	9478-GNK	2	1
ESTACION_1	Cartaya	2294-GNH	2	1
ESTACION_1	BASE	5632-CGK	6	1
ESTACION_1	BASE	9478-GNK	6	1
ESTACION_1	BASE	2294-GNH	6	1
Punta Umbría	ESTACION_1	5632-CGK	2	1
Punta Umbría	ESTACION_1	5632-CGK	1	1
Punta Umbría	ESTACION_1	9478-GNK	1	1
Punta Umbría	ESTACION_1	2294-GNH	1	1
Cartaya	ESTACION_2	2294-GNH	3	1
Cartaya	ESTACION_2	2294-GNH	2	1
Cartaya	ESTACION_1	9478-GNK	2	1
Cartaya	ESTACION_1	2294-GNH	4	1
Cartaya	Punta Umbría	5632-CGK	2	1
BASE	Punta Umbría	5632-CGK	1	1
BASE	Punta Umbría	9478-GNK	1	1
BASE	Punta Umbría	2294-GNH	1	1

Tabla 5.9B: Recorrido Vehículos Base PUNTA UMBRÍA Carga Trasera- Verano (Variable x_{ijkv})

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base: Punta Umbría (Carga Trasera)										VERANO	
Num.Veh:		Factor de compresión:			Vel.Pob:						
Vehículo	Carga Max	Horas Max	Velocidad Media carretera	Tiempo Vaciado Vehículo	Carga máxima Vehículo (m3)	Tiempo Recogida contenedor (hrs)	Observ.	Esta. Transf.			
2294-GNH	36	8	40	0,25	6	0,015	Carg.Tras	REDONDELA/HUELVA			
9478-GNK	108	6	50	0,25	18	0,015	Carg.Tras	HUELVA			
5632-CGK	108	8	50	0,25	18	0,015	Carg.Tras	HUELVA			
TOTAL POBLACIONES:										2	
Población	LatGr	LonGr	Número Contenedores	Diametro medio (kms)	Recorrido Poblacion (kms)	Est.Transferencia					
BASE	37,192870	-6,976498				Aprox					
Cartaya	37,283140	-7,154979	272	1,70	15,30	La Redondela					
Punta Umbría	37,182480	-6,967148	256	3,85	34,65	Huelva					
ESTACION_1	37,291870	-6,879929				Aprox ESTACION HUELVA					
ESTACION_2	37,229628	-7,274425				Aprox ESTACION REDONDELA					
TOTAL:			528								

D
A
T
O
S

R E S U L T A D O S										
Mínima distancia:		367,9								
Carga/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Total				
2294-GNH	36	36	36	36		144				
9478-GNK	60	108				168				
5632-CGK	108	108				216				
Total	204	252	36	36		528				
Distancia/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Interior pobl.	Viaje regr.	Total		
2294-GNH	15,8	36,5	24,3	36,5		19,9	--	133,0		
9478-GNK	15,8	48,7				19,7	--	84,3		
5632-CGK	15,8	58,8				34,2	--	108,8		
Total	47,5	114,0	65,3	28,8		73,9	41,8	371,3		
Tot. Recorrido: 255,6										
Tiempo recorrido/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	t.recogida contenedores	tiempo int. poblaciones	tiempo regreso Base	Total	t_veh
2294-GNH	0,4	0,9	0,6	0,9		1,0	2,2	1,3	0,3	7,7
9478-GNK	0,3	1,0				0,5	2,5	1,3	0,3	5,9
5632-CGK	0,3	1,2				0,5	3,2	2,3	0,3	7,8
Total	1,0	3,1	0,6	0,9		2,0	7,9	4,9	0,9	21,4
Tot. Recorrido: 5,6										
Cantidades recogidas (y TV):	2294-GNH	9478-GNK	5632-CGK	Total		Número de visitas			Total	
Cartaya	108	108	56	272		Cartaya	3	1	1	5
Punta Umbria	36	60	160	256		Punta Umbria	1	1	2	4
Total	144	168	216	528		Total	4	2	3	9

R
E
S
U
L
T
A
D
O
S

Número viajes:	11
Número visitas:	9

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Cantidad recogida por vehículo y viaje											
2294-GNH	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	9478-GNK	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5
Cartaya		36	36	36	36	Cartaya		108			
Punta Umbría	36					Punta Umbría	60				
TOTAL	36	36	36	36		TOTAL	60	108			
5632-CGK	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5						
Cartaya		56									
Punta Umbría	108	52									
TOTAL	108	108									

Figura 5.9B Resultado Base de vehículos de PUNTA UMBRÍA (CARGA TRASERA-VERANO)



Figura 5.9C Recorrido de vehículos y viajes: Base de vehículos PUNTA UMBRÍA (Cga. TRASERA-VERANO)

Base de vehículos: TRIGUEROS (Cuarto Modelo)

Estaciones de Transferencia: **Andévalo** y **La Redondela**

epgap	= 0.0001;
epagap	= 69;
NV	= 4;
U	= 1000;
PesoNumViajes	= 10;
PesoNumVisitas	= 10;

Tabla 5.10A: Parámetros del modelo. Base de vehículos: TRIGUEROS

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

sPunt (tamaño 16)	sPunt (tamaño 16)	sVehi (tamaño 5)	viaT (tamaño 5)	Valor
EST.LINARES	BASE	7322-GLR	5	1
EST.HUELVA	San Juan del Puerto	2190-DDC	2	1
EST.HUELVA	BASE	2190-DDC	5	1
EST.HUELVA	BASE	7255-GLR	5	1
EST.HUELVA	BASE	9466-GLR	5	1
Valverde del Camino	Navahermosa (Galaroza)	7322-GLR	1	1
Trigueros	Bonares	9466-GLR	1	1
San Juan del Puerto	EST.HUELVA	2190-DDC	2	1
Rociana del Condado	EST.VILLARRASA	7279-GLR	1	1
Niebla	Bonares	7255-GLR	1	1
Navahermosa (Beas)	Valverde del Camino	7322-GLR	1	1
Navahermosa (Galaroza)	EST.LINARES	7322-GLR	1	1
Lucena del Puerto	EST.HUELVA	7255-GLR	1	1
Fuente de la Corcha (Beas)	Navahermosa (Beas)	7322-GLR	1	1
Candón (Beas)	Rociana del Condado	7279-GLR	1	1
Bonares	EST.HUELVA	9466-GLR	1	1
Bonares	Lucena del Puerto	7255-GLR	1	1
Beas	EST.HUELVA	2190-DDC	1	1
BASE	Trigueros	9466-GLR	1	1
BASE	Niebla	7255-GLR	1	1
BASE	Fuente de la Corcha (Beas)	7322-GLR	1	1
BASE	Candón (Beas)	7279-GLR	1	1
BASE	Beas	2190-DDC	1	1

Tabla 5.10B: Recorrido Vehículos Base TRIGUEROS (Variable x_{ijkv})

El gráfico de la estadística donde observamos la convergencia de las soluciones enteras y la solución relajada.

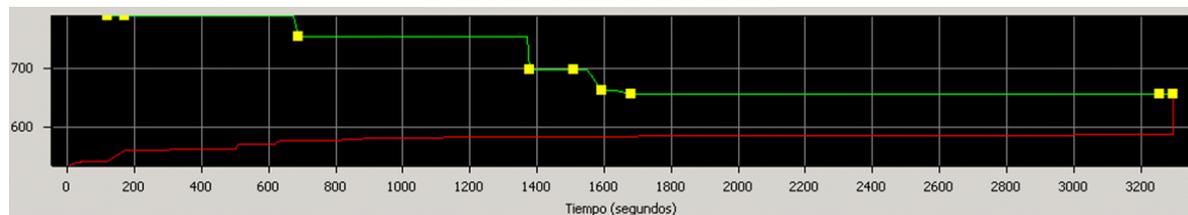


Figura 5.10A Estadística. Base de vehículos de TRIGUEROS

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Base: Trigueros VERANO-INVIERNO

Num.Veh:	Factor de compresión:		Vel.Pob:				
5	15		15				
Vehículo	Carga Max	Horas Max	Velocidad Media carretera	Tiempo Vaciado Vehículo	Carga máxima Vehículo (m3)	Tiempo Recogida contenedor (hrs)	Observ.
9466-GLR	270	8	50	0,25	18	0,015	Carga trasera
7322-GLR	345	10	50	0,25	23	0,015	Carga trasera
7255-GLR	270	8	50	0,25	18	0,015	Carga trasera
2190-DDC	210	8	40	0,25	14	0,015	Carga trasera
7279-GLR	270	8	50	0,25	18	0,015	

TOTAL POBLACIONES:	12	Número Contenedores	Diametro medio (kms)	Recorrido Poblacion (kms)	Est.Transferencia:
BASE	37,388437	-6,835571		Aprox	
Beas	37,425920	-6,792988	120	0,80	7,20
Bonares	37,321900	-6,680697	130	0,85	7,65
Candón (Beas)	37,390314	-6,738711	6	0,40	3,60
Fuente de la Corcha (Beas)	37,484688	-6,859961	3	0,20	1,80
Lucena del Puerto	37,303940	-6,730086	72	0,50	4,50
Navahermosa (Galaroza)	37,930569	-6,669578	2	0,10	0,90
Navahermosa (Beas)	37,494292	-6,786846	3	0,10	0,90
Niebla	37,360100	-6,679200	155	1,10	9,90
Rociana del Condado	37,307810	-6,598672	187	1,50	13,50
San Juan del Puerto	37,314160	-6,840784	189	0,90	8,10
Trigueros	37,383190	-6,833752	178	1,20	10,80
Valverde del Camino	37,573390	-6,753376	280	1,25	11,25
EST.HUELVA	37,291870	-6,879929		Aprox	
EST.LINARES	37,881032	-6,624195		Aprox	
EST.VILLARRASA	37,451310	-6,636752			
TOTAL:		1.325			

D
A
T
O
S

R E S U L T A D O S

Mínima distancia: 416,2

Carga/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Total
9466-GLR	270					270
7322-GLR	288					288
7255-GLR	265					265
2190-DDC	120	189				309
7279-GLR	193					193
Total	1.136	189				1.325

Distancia/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	Interior pobl.	Viaje regr.	Total
9466-GLR	33,7					18,3	--	52,0
7322-GLR	73,9					16,5	--	90,4
7255-GLR	36,5					19,1	--	55,6
2190-DDC	22,4	8,5				17,0	--	47,9
7279-GLR	40,3					19,0	--	59,3
Total	206,8	8,5				89,9	111,0	416,2

Tiempo recorrido/Veh:	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5	tiempo en descarga	t.recogida contenedores	tiempo int. poblaciones	tiempo regreso Base	Total	t_veh
9466-GLR	0,7					0,3	4,1	1,2	0,2	6,4	6,4
7322-GLR	1,5					0,3	4,3	1,1	1,2	8,3	8,3
7255-GLR	0,7					0,3	4,0	1,3	0,2	6,5	6,5
2190-DDC	0,6	0,2				0,5	4,6	1,1	0,3	7,3	7,3
7279-GLR	0,8					0,3	2,9	1,3	0,4	5,6	5,6
Total										34,1	34,1

Cantidades recogidas (y_TV):	9466-GLR	7322-GLR	7255-GLR	2190-DDC	7279-GLR	Total	Número de visitas	9466-GLR	7322-GLR	7255-GLR	2190-DDC	7279-GLR	Total
Beas				120		120	Beas				1		1
Bonares	92		38			130	Bonares	1		1			2
Candón (Beas)					6	6	Candón (Beas)					1	1
Fuente de la Corcha (Beas)		3				3	Fuente de la Corcha (Beas)		1				1
Lucena del Puerto			72			72	Lucena del Puerto			1			1
Navahermosa (Galaroza)		2				2	Navahermosa (Galaroza)	1					1
Navahermosa (Beas)		3				3	Navahermosa (Beas)	1					1
Niebla			155			155	Niebla			1			1
Rociana del Condado					187	187	Rociana del Condado					1	1
San Juan del Puerto							San Juan del Puerto				1		1
Trigueros	178					178	Trigueros	1					1
Valverde del Camino		280				280	Valverde del Camino		1				1
Total	270	288	265	309	193	1132	Total	2	4	3	2	2	11

Número viajes: 11
Número visitas: 13

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Cantidad recogida por vehículo y viaje					
9466-GLR	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5
Beas					
Bonares	92				
Candón (Beas)					
Fuente de la Corcha (Beas)					
Lucena del Puerto					
Navahermosa (Galaroza)					
Navahermosa (Beas)					
Niebla					
Rociana del Condado					
San Juan del Puerto					
Trigueros	178				
Valverde del Camino					
TOTAL	92				
7322-GLR	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5
Beas					
Bonares					
Candón (Beas)					
Fuente de la Corcha (Beas)	3				
Lucena del Puerto					
Navahermosa (Galaroza)	2				
Navahermosa (Beas)	3				
Niebla					
Rociana del Condado					
San Juan del Puerto					
Trigueros					
Valverde del Camino	280				
TOTAL	8				
7255-GLR	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5
Beas					
Bonares	38				
Candón (Beas)					
Fuente de la Corcha (Beas)					
Lucena del Puerto	72				
Navahermosa (Galaroza)					
Navahermosa (Beas)					
Niebla	155				
Rociana del Condado					
San Juan del Puerto					
Trigueros					
Valverde del Camino					
TOTAL	110				
2190-DDC	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5
Beas	120				
Bonares					
Candón (Beas)					
Fuente de la Corcha (Beas)					
Lucena del Puerto					
Navahermosa (Galaroza)					
Navahermosa (Beas)					
Niebla					
Rociana del Condado					
San Juan del Puerto		189			
Trigueros					
Valverde del Camino					
TOTAL	120				
7279-GLR	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5
Beas					
Bonares					
Candón (Beas)	6				
Fuente de la Corcha (Beas)					
Lucena del Puerto					
Navahermosa (Galaroza)					
Navahermosa (Beas)					
Niebla					
Rociana del Condado	187				
San Juan del Puerto					
Trigueros					
Valverde del Camino					
TOTAL	6				

Figura 5.10B Resultado Base de vehículos de TRIGUEROS



Figura 5.10C Recorrido de vehículos y TRIGUEROS

466-GLR Viaje 1
7322-GLR Viaje 1
7279-GLR Viaje 1
7255-GL

6. Conclusiones y trabajos futuros

Observamos que en el caso de la Mancomunidad de Servicios (MAS), tal y como tiene distribuidos las poblaciones por bases, no se nos plantea recorridos de más de veinte puntos. En este entorno los algoritmos exactos basados en MILP no nos han dado problemas. Con nuestro planteamiento utilizando MILP observamos que en alguno de los casos, como se puede ver en sus estadísticas, los tiempos de computación han llegado a varias horas para darnos un resultado coherente y en otros varios minutos, pero siempre hemos tenido una convergencia y por tanto una solución.

Este tipo de distribución de poblaciones por bases no es algo excepcional cuando se trata de recogida de residuos por poblaciones y, por tanto, nuestro acercamiento puede ser útil para otros casos similares y sin tener que recurrir a métodos metaheurísticos.

Cuando nos metamos en la optimización de los recorridos dentro de una población de tamaño medio-grande, cada contenedor o cada cruce de calle es un punto y por tanto podemos estar hablando de miles. Es muy probable que el empleo de algoritmos metaheurísticos sea indispensable.

Como puntos para ser continuados en trabajos futuros podríamos considerar los siguientes.

Continuando el nivel operativo:

- Nuestro planteamiento parte de las coordenadas geográficas de las poblaciones, Bases y estaciones y las distancias que se calculan son geométricas. Una mejora es emplear distancias pasándole a Google Maps nuestras coordenadas geográficas para que nos devuelva las distancias reales a través del *web service* adecuado.
- Basándonos en la experiencia real, afinar los supuestos como el tiempo medio de recogida de un contenedor, el tiempo de descarga y vaciado de un vehículo en la Estación de Transferencia, la velocidad media de los vehículos en carretera, la distancia recorrida dentro de cada población, etc., que son parámetros de entrada de nuestro estudio.
- Elegir una o varias bases de las que han participado en este estudio y comparar los resultados actuales reales con los proporcionados en nuestro planteamiento llevándolo a la práctica.
- Trabajar en la optimización de los recorridos dentro de las poblaciones como Ayamonte, Almonte, Aljaraque, Punta Umbría, etc. con un número de contenedores importante.
- Complementar este trabajo con otros modelos basados en algoritmos metaheurísticos y compararlos.
- En nuestro planteamiento nos hemos centrado en la optimización de una función objetivo que se ha considerado fundamentalmente la distancia recorrida. Sabemos que esta distancia es solo parte del coste, quizá el más importante, pero hemos descartado otras consideraciones que se podrían abordar en una segunda fase. Desde un punto de vista del coste:
 - Trabajar con el coste del recorrido en vez del kilometraje. En este caso intervendría el consumo por tipo de vehículo, cotas de las poblaciones, Bases y Estaciones que influirían en el consumo con el vehículo cargado o no durante el incremento o decremento de la altura en el tramo del recorrido.
 - Disponibilidad del vehículo. Por el simple hecho de disponer de un vehículo se use poco o mucho tiene un coste asociado a su amortización si es propio o a un alquiler si es ajeno y un coste de operarios que es independiente de su uso.
 - Costes asociados al mantenimiento del vehículo que en algunos casos está relacionado con el kilometraje y, en otros, a las horas de utilización.

- Aunque el coste de vehículos podría inducirnos a utilizarlos en turnos durante las veinticuatro horas al día para minimizar el número de vehículos, tendríamos que relacionarlos con el coste de los operarios en los diferentes turnos y las limitaciones que tendríamos en determinadas horas del día. Este enfoque sería más abordable desde el nivel táctico que desde este nivel, donde ya partimos de los vehículos disponibles.
- Hacer un estudio de la influencia de los diferentes parámetros del modelo y parámetros internos de CPLEX en los tiempos de cómputo.
- Introducción de planos de corte en el algoritmo de *Branch and Bound* que acote los espacios de búsqueda y reduzcan el tiempo de cómputo.

Llevar a la práctica inicialmente un estudio a nivel táctico utilizando métodos exactos y meta-heurísticos y cambiar las asignaciones actuales de las poblaciones a sus Bases y Estaciones, así como el número y tipo de vehículos a utilizar en cada base.

Y, por último, realizar un estudio estratégico para optimizar las ubicaciones de las Estaciones de Transferencia y Bases de Vehículos actuales y futuras.

Referencias y Bibliografía

1. Williams, Hilary Paul (University of Edinburgh), *Model building in mathematical programming*. John Wiley & Sons 1978, p177-p180.
2. Gómez Cámara, José Rubén (Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos), *Diseño de un sistema de recogida de residuos urbanos: enfoque multiobjetivo y uso de metaheurísticos*. Tesis doctoral. 2010
3. Lucía Gorostegui López-Alonso (Universidad Complutense de Madrid, Universidad Nacional de Educación a Distancia) *Modelado, Optimización y Planificación de una Red de distribución de gas natural*. Máster en Ingeniería de Sistemas y de Control.
4. JJ Ruz, *Introducción a la Programación Matemática, Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas y de Control*. Universidad Complutense de Madrid y UNED.
5. Toth, P. y D. Vigo, *An Overview of Vehicle Routing Problems*, en *Discrete Mathematics and Applications. The Vehicle Routing Problem*. 2000, SIAM. p. 1-26.
6. Kulkarni, R.V. y P.R. Bhave, *Integer programming formulations of vehicle routing problems*. *European Journal of Operational Research*, 1985. 20(1): p. 58-67.
7. Russell, R. y W. Igo, *ASSIGNMENT ROUTING PROBLEM*. *Networks*, 1979. 9(1): p. 1-17.
8. Dror, M., G. Laporte y P. Trudeau, *VEHICLE-ROUTING WITH STOCHASTIC DEMANDS - PROPERTIES AND SOLUTION FRAMEWORKS*. *Transportation Science*, 1989. 23(3): p. 166-176.
9. Dror, M. y P. Trudeau, *SPLIT DELIVERY ROUTING*. *Naval Research Logistics*, 1990. 37(3): p.383-402.
10. Dror, M., G. Laporte y P. Trudeau, *VEHICLE-ROUTING WITH SPLIT DELIVERIES*. *Discrete Applied Mathematics*, 1994. 50(3): p. 239-254.
11. Archetti, C., R. Mansini y M.G. Speranza, *Complexity and reducibility of the skip delivery problem*. *Transportation Science*, 2005. 39(2): p. 182-187
12. Tillman, F., *The multiple terminal delivery problem with probabilistic demands*. *Transportation Science*, 1969. 3: p. 192-204.
13. Wilson, H., et al., *Scheduling algorithms for dial-a-ride systems*. . 1971, Urban system Laboratory, MIT. Technical Report USL TR-70-13: Cambridge, MA.
14. Kohl, N., et al., *2-path cuts for the vehicle routing problem with time windows*. *Transportation Science*, 1999. 33(1): p. 101-116.
15. du Merle, O., et al., *Stabilized column generation*. *Discrete Mathematics*, 1999. 194(1-3): p. 229- 237.
16. Knight, K.W. y J.P. Hofer, *VEHICLE SCHEDULING WITH TIMED AND CONNECTED CALLS - A CASE STUDY*. *Operational Research Quarterly*, 1968. 19(3): p. 299-&.
17. Kolen, A.W.J., A. Kan y H. Trienekens, *VEHICLE-ROUTING WITH TIME WINDOWS*. *Operations Research*, 1987. 35(2): p. 266-273.
18. Desrochers, M., J. Desrosiers y M. Solomon, *A NEW OPTIMIZATION ALGORITHM FOR THE VEHICLE-ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOWS*. *Operations Research*, 1992. 40(2): p. 342-354.
19. Laporte, G. y Y. Norbert, *Exact algorithms for the vehicle routing problem*. *Annals of Discrete Mathematics*, 1987. 31: p. 147-184.
20. Laporte, G., *The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms*. *European Journal of Operational Research*, 1992. 59: p. 345-358.

21. Clarke, G. y W. Wright, *Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points*. Operations Research, 1964. 12: p. 568-581.
22. Gillett, B.E. y L.R. Miller, *HEURISTIC ALGORITHM FOR VEHICLE-DISPATCH PROBLEM*. Operations Research, 1974. 22(2): p. 340-349.
23. Balinski, M. y R. Quandt, *On an Integer program for a delivery problem*. Operations Research, 1964. 12: p. 300-304.
24. Mole, R.H. y S.R. Jameson, *SEQUENTIAL ROUTE-BUILDING ALGORITHM EMPLOYING A GENERALIZED SAVINGS CRITERION*. Operational Research Quarterly, 1976. 27(2): p. 503-511.
25. Lin, S., *COMPUTER SOLUTIONS OF TRAVELING SALESMAN PROBLEM*. Bell System Technical Journal, 1965. 44(10): p. 2245-+.
26. Osman, I., *Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search for the Vehicle Routing Problem*. Annals of Operations Research, 1993. 41: p. 421-451
27. Rochat, Y. y E.D. Taillard, *Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing*. Journal of Heuristics, 1995. 1: p. 147-167.
28. Ghaziri, H., *Solving routing problem by a self-organizing map, en Artificial Neural networks*, T. Kohonen, et ál., Editors. 1991: North-Holland, Amsterdam. p. 829-834.
29. Schumann, M. y R. Retzko, *Self-organizing maps for vehicle routing problems-minimizing an explicit cost function, en Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks*, F. Fogelman-Soulie, Editor. 1995: Paris. p. 401-406.
30. Laporte, G., *What you should know about the vehicle routing problem*. Naval Research Logistics, 2007. 54(8): p. 811-819.
31. Reimann, M., K. Doerner y R.F. Hartl, *D-Ants: Savings Based Ants divide and conquer the vehicle routing problem*. Computers & Operations Research, 2004. 31(4): p. 563-591.