

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se ha tratado en el capítulo de objetivos de la tesis, la herramienta basada en el algoritmo metaheurístico debe permitir caracterizar las estrategias de distribución eficientes para minimizar los costes logísticos en distintos escenarios.

La metodología seguida en este análisis de resultados queda reflejada en la Figura 6.1. En primer lugar, será necesaria la generación de un conjunto de problemas p_i ($i=1,..P$) que incluyan distintos escenarios identificados en la realidad para estimar las configuraciones de red más eficientes con el uso de la herramienta matemática propuesta. Los problemas se agruparán por la presencia de atributos comunes $A_j, j=1,..M$ en la configuración de la red, en los recursos utilizados o en los costes asociados.

Estas resoluciones podrán permitir un estudio estadístico y nivel de correlación de las variables del sistema para determinar unas funciones de previsión de los costes logísticos de un sistema en la fase de planificación. Sin embargo, la resolución de estas baterías de problemas también se utilizará para analizar aspectos del diseño estratégico y operacional de la red de distribución de una empresa de paquetería: el número de *hubs* óptimo h a ubicar en la región de servicio R_s y el tamaño C de los vehículos de reparto.

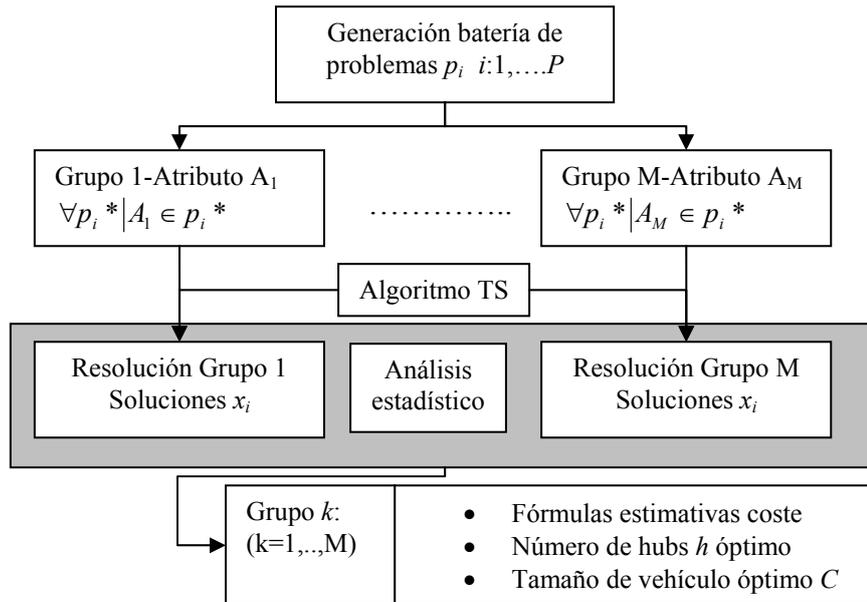


Fig.6.1. Esquema del análisis de soluciones planteado

6.1. GENERACIÓN DE BATERÍAS DE PROBLEMAS

Para el análisis de cada uno de los aspectos que se detallan en los objetivos, se generarán varias baterías de problemas que sirvan de base para la aplicación del algoritmo y la modelización de la distribución. Estos problemas se generan a partir de valores medios reales proporcionados por observatorios y empresas del sector que se han entrevistado aplicando una simulación de Montecarlo a distribuciones probabilísticas de los atributos principales. Las baterías de problemas diferirán básicamente en cinco aspectos o grupos de atributos fundamentales:

- Número de delegaciones del sistema de distribución, N_T .

Se sigue el mismo criterio de clasificación propuesto en el subcapítulo de ajuste del algoritmo de tres grupos principales de problemas: tamaño reducido (2-20 delegaciones), tamaño medio (21-60 delegaciones) y gran tamaño (superior a 61 delegaciones).

- Generación del volumen de mercancía a transportar entre delegaciones, W_{ij} .

Se ha considerado la posibilidad de que el volumen de mercancía W_{ij} a transportar entre una delegación i y otra delegación j siga una distribución uniforme en un

intervalo factible $[a,b]$ según marca la ecuación (6.1). En estos casos el límite a correspondería al volumen mínimo a partir del cual la empresa ofrecería transporte y b el volumen máximo entre un origen y destino fijados. Los parámetros a y b también pueden ser fijados en función de un análisis estadístico de los valores máximos y mínimos que se dan en una empresa real. En el caso que el tamaño del envío superara la capacidad, el volumen de mercancía se podría descomponer en diversos envíos a carga completa y un solo envío a carga parcial. Debido a que las mayores ineficiencias se deben a los envíos a carga parcial (inferior a la capacidad), en esta tesis se considerarán baterías de problemas que fundamentalmente tengan envíos a carga parcial.

$$W_{ij} \sim Unif(a, b) \quad (6.1)$$

Sin embargo, en los problemas reales no siempre existe un servicio diario entre todas las delegaciones de una región de servicio. En algunos casos, si no existe un volumen de mercancía significativo entre dos delegaciones, su envío se demora a periodos operacionales posteriores (día siguiente), almacenando la carga en la propia delegación hasta generar un volumen suficiente entre (i,j) por envío directo. Otra alternativa operacional es encaminar la carga hacia otras terminales de consolidación en el mismo periodo operacional aunque por la desviación infligida el envío llegue en plazos de entrega superiores al resto de envíos. En este punto, queda claro que debe haber una relación directa entre la calidad de servicio ofrecida (plazos de entrega de la empresa) y la demanda o flujos de mercancía asociados.

Por este motivo, se ha asumido que la probabilidad de existir un envío de mercancía entre i y j en el día de estudio viene marcada por el valor de un parámetro p_{ij} , $0 < p_{ij} < 1$. De esta forma, únicamente se considerarán todos aquellos envíos W_{ij} que tengan un valor de $p_{ij} > \theta_p$, ya que los demás tendrán una carga asociada igual a 0. En este sentido, se puede definir la variable entera X^p_{ij} que tomará valores iguales a 1 en el caso que $p_{ij} > \theta_p$ y 0 en caso contrario según se muestra en la ecuación (6.2).

$$X^p_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } p_{ij} > \theta_p \\ 0 & \text{si } p_{ij} \leq \theta_p \end{cases} \quad (6.2)$$

Con todo, el valor final del volumen de mercancía a transportar entre (k,j) vendrá determinado por la expresión (6.3) a partir de las ecuaciones (6.1) y (6.2).

$$W_{ij} = X_{ij}^p W_{ij} \quad (6.3)$$

Uno de los puntos más importantes para definir el problema tipo será como se calcula la expresión p_{ij} y cual es el umbral de referencia θ_p . En este punto se han propuesto dos tipos distintos de procedimientos de generación de problemas. El primer procedimiento plantea que la probabilidad p_{ij} siga una distribución uniforme entre $[0,1]$ de forma que todos los pares (i,j) tengan la misma probabilidad de superar θ_p .

No obstante, se ha definido un segundo procedimiento de asignación de volumen de mercancía entre delegaciones que depende del nivel de importancia de la delegación. En estos casos, la importancia de cada delegación se puede expresar como la suma total de mercancía atraída y generada por cada delegación en episodios pasados (registros históricos). El potencial de atracción y generación de volúmenes de cargas de cada delegación i se define por la variable B_i y se ha supuesto que sigue una distribución de probabilidad continua asimétrica como podría ser una distribución *Weibull* o *Gamma* de parámetros α , $\theta > 0$. De este modo, esta variable B_i vendrá determinada por el volumen total de mercancía gestionada por la delegación en una escala temporal determinada. Para simplificar el proceso de generación, se ha supuesto que la distribución es una distribución *Weibull* de parámetro θ_2 y α_2 y se ha comprobado su ajuste a un caso particular de una empresa de paquetería, dando unos resultados satisfactorios (ver Anexo A4). De este modo, la existencia de un volumen de carga entre delegaciones (i,j) vendrá determinada por la expresión (6.3), pero en este caso el parámetro p_{ij} dependerá de esta potencialidad de generación y atracción de cargas de la delegación i y j , calculándose por la expresión (6.4), semejante a una función de producción de tipo *Cobb-Douglas*. Este procedimiento pretende reproducir que las delegaciones con mayor valor de B_i siempre tendrán mayor probabilidad de existir un envío en un día en concreto.

$$p_{ij} = k(B_i B_j)^\alpha \quad (6.4)$$

El parámetro θ_p de la expresión (6.2) únicamente regula el número de envíos (i,j) a considerar en el problema y su valor dependerá de la capacidad computacional del algoritmo y del tamaño deseado de problema que se quiera analizar. En particular, la implementación realizada del algoritmo planteaba como restricciones 10000 envíos (i,j) y 600 rutas de vehículos.

- Parámetros de costes unitarios

Para todas las baterías de problemas se utilizarán unos parámetros de costes estándar a excepción del análisis del número óptimo de *hubs* y tamaño óptimo del vehículo en el que se estudiará la evolución de los costes y estrategias de ruta en función de estos parámetros.

A nivel general, se han considerado los costes unitarios detallados en la Tabla 6.1. Los costes c_d y F se han calculado según lo expuesto en Generalitat de Catalunya (2005) donde se resumen los resultados de un observatorio periódico de los costes de transporte de mercancías en el contexto catalán.

Tabla 6.1. Resumen de costes unitarios utilizados en la generación de los problemas generales

Flota V_1 ($C=80m^3$)	Coste fijo de prestación de vehículo en ruta	$F=$ 260 €/veh
	Coste kilométrico	$c_d=$ 0,4 €/km
Coste unitario de parada		$c_p=$ 15 €/parada
Coste unitario de transferencia en <i>hub</i>		$c_t=$ 10 €/m ³
Coste espera en delegación por congestión		$c_w=$ 0 €/m ³

Un aspecto a comentar es la consideración de los costes de inventario de la mercancía y de los costes de manipulación en terminales no *hub* como nulos. En relación al coste de inventario nulo, las empresas de paquetería no son la propietaria de la mercancía transportada por ser un agente subcontratado para el transporte y por tanto, no sufre directamente ningún coste asociado. No obstante, las empresas de producción repercuten los costes de inventario de la mercancía a las empresas de paquetería industrial en forma de la exigencia de unos plazos de reparto asociados al valor y urgencia de la mercancía.

De este modo, en la tesis se ha supuesto que $c_t=0$ €/m³ y que la empresa de paquetería cumple estrictamente todos los plazos máximos para el transporte de la carga que determina la empresa contratadora del servicio. Un aspecto que no se ha tratado en esta tesis es si la estructura de costes y tarifas asociada a un nivel de servicio (plazo de reparto) es rentable para la empresa de distribución.

La consideración de costes de manipulación en delegaciones no *hub* igual a 0 responde a que si éstos se integraran en la ecuación (3.4) siempre serían un término constante suponiendo que el número de delegaciones del problema N_T no varía. De

este modo, si los envíos de mercancía W_{ij} y el número de delegaciones N_T están fijados, no hay ninguna estrategia de envío que varíe los costes de manipulación en estas delegaciones, y por tanto no afecta al proceso de optimización. Es por este motivo que únicamente se han considerado los costes de manipulación en terminales *hub*, ya que el volumen de mercancía a manipular es variable con las estrategias (soluciones) de distribución del problema. La única forma de variar los costes de manipulación en delegaciones estándar sería realizando un planteamiento integrado entre diseño de red troncal y de red capilar, de forma que el número de delegaciones (*hub* y estándar) no estuviera fijado de antemano y fuesen las variables de decisión del problema.

Adicionalmente, se han considerado como nulos los costes de espera de vehículo debido a congestión. Esta hipótesis se justifica porque existen suficientes muelles de *cross-docking* para realizar la carga/descarga de la mercancía de forma que no se producen tiempos muertos de espera. Sin embargo, en el siguiente capítulo se abordará el caso de congestión de muelles de carga debido a un dimensionamiento insuficiente de las instalaciones. En este caso, se aplicará un coeficiente de coste unitario de espera no nulo.

Los vehículos utilizados en los problemas generales y cuyos costes asociados se detallan en la Tabla 6.1. son los de mayor tamaño y gálibo permitidos por el Código de Circulación. Éstos, referenciados en esta tesis como V_1 , tienen una capacidad de transporte de 80 m^3 y un peso máximo autorizado de 25 ton. En el caso de análisis del número óptimo de terminales *hub* h^* y de la capacidad óptima de los vehículos de transporte, se han generado problemas adicionales con otros parámetros y vehículos de transporte. En particular se han considerado 2 familias de vehículos de transporte adicionales: vehículos V_2 de $52,5 \text{ m}^3$ de capacidad y vehículos V_3 de $33,5 \text{ m}^3$ de capacidad con parámetros de coeficientes de costes que se detallan en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Resumen de costes unitarios utilizados en la generación de problemas de estudio de número óptimo de hubs y tamaño óptimo del vehículo

Flota V_2 ($C=52,5\text{m}^3$)	Coste fijo de prestación de vehículo en ruta	$F= 241 \text{ €/veh}$
	Coste kilométrico	$c_d= 0,384 \text{ €/km}$
Flota V_3 ($C=33,5\text{m}^3$)	Coste fijo de prestación de vehículo en ruta	$F= 213 \text{ €/veh}$
	Coste kilométrico	$c_d= 0,291\text{€/km}$
Coste unitario de parada		$c_p= 1-50 \text{ €/parada}$
Coste unitario de transferencia en <i>hub</i>		$c_t= 0,1-10 \text{ €/m}^3$

- Número de terminales de transferencia (*hubs*), h .

El número de terminales de transferencia h es variable y puede oscilar entre 0 y N_T . El caso de $h=0$ representaría que las estrategias de envío *hub* no se permitirían en la red de distribución, mientras que si $h=N_T$ todas las terminales estándar podrían realizar rotura de carga y consolidar mercancía. Como criterio de generación en los problemas generales (a excepción del análisis de número de *hub* óptimo) se ha seguido que el número de terminales de transferencia h se calcula por $h = \sqrt{N}$. Sin embargo, en el subcapítulo 6.2 se realiza un análisis de sensibilidad en el que se estudian los efectos que tiene en la distribución el incremento o disminución del número de terminales de consolidación.

- Número de muelles en cada delegación, m_i

En la mayoría de problemas se ha considerado que todas las delegaciones se han dimensionado correctamente y que no ocurren fenómenos de saturación de los muelles de carga. En estas baterías de problemas, se ha adoptado un valor del parámetro m_i superior a 50 para tener suficiente capacidad para todos los envíos. No obstante, en el capítulo 7 se hará un estudio de los efectos que desencadena el hecho de tener una o varias delegaciones con un número de muelles que limite las cargas y descargas de los vehículos.

En todos los problemas generados se han supuesto unas variables comunes que se han mantenido invariables. En particular, las coordenadas (x_i, y_i) de cada delegación $i = 1, \dots, N_T$ se han generado aleatoriamente en una zona de servicio cuadrada de 25000 km². Todas las delegaciones de la región de servicio tienen un plazo temporal para realizar la distribución es de 10 horas, de forma que toda delegación $i = 1, \dots, N_T$ presenta el tiempo de apertura $h_{1,i}=0$ y el tiempo máximo de recepción $h_{2,i}=10$ horas. Finalmente, los tiempos unitarios de carga y descarga de cada delegación son iguales a 0,01horas/m³ y 0,005 horas/m³ respectivamente.

6.2. ANÁLISIS DEL NÚMERO ÓPTIMO DE TERMINALES DE CONSOLIDACIÓN (*HUBS*)

El objetivo de este apartado se centra en el estudio del *trade-off* existente entre las potencialidades de consolidación de carga en terminales y el incremento de costes de

amortización o alquiler derivados de la construcción de una terminal de consolidación *hub*. Por un lado, el incremento del número de terminales donde se permite la rotura y consolidación de la carga podrá incrementar la productividad de los vehículos y reducir rutas aunque introducirá unos costes adicionales en las operaciones de manipulación y transferencia en los *hubs*. Adicionalmente este hecho introducirá unos costes adicionales de creación de *hubs* por la adaptación de la tecnología y *layout* de la terminal a los procesos de rotura y consolidación de la carga.

6.2.1. Inclusión de los costes de alquiler de las terminales en la formulación

La formulación del problema desarrollada en el capítulo 3 tenía como datos de entrada el número y localización de las delegaciones origen y destino de los envíos y el número óptimo de *hubs* h^* con el que se debía operar. Aunque las metodologías de resolución del problema $P1$ y $P2$ deben proporcionar una localización óptima de los h *hubs*, en la función de costes (3.4) no se introducía ningún coste fijo de alquiler de instalación *hub*. Su inclusión representaría un término constante en la función objetivo que no afectaría a la minimización de costes del problema (h constante).

De este modo, si se analiza una optimización del número de terminales *hub* en función del coste de distribución total del sistema se deberá introducir un término que evalúe el incremento en el coste de amortización-alquiler de la delegación. Se asume que el coste de alquiler-amortización de una delegación i estándar es $c_{r,i}^t = c_{r,i}$ ($i=1, N_T$) cuando $i \notin H$; mientras que la misma delegación i presentaría un coste de alquiler $c_{r,i}^h$ ($c_{r,i}^h > c_{r,i}$) si esta delegación pasara a ser *hub*, es decir $i \in H$.

En este caso, el nuevo coste de alquiler o amortización de la instalación *hub* debería depender del incremento de flujo o incremento de volumen de mercancía que gestionara la nueva terminal (por ser origen o destino de los envíos o por ser punto de transferencia). Si W_i^t es el volumen total de mercancía con origen o destino en i cuando $i \notin H$ y W_i^h el volumen total de mercancía con origen, destino o transferencia en i cuando $i \in H$, la variable $c_{r,i}^h$ se debería definir en función del incremento de volumen sufrido por la terminal, el coste inicial de amortización $c_{r,i}^t$ y el intervalo de tiempo disponible para realizar la recepción y entrega de envíos en la propia terminal ($h_{1,i}; h_{2,i}$).

De este modo, el incremento de costes que se debería añadir al valor $Z1$ de la ecuación (3.4) viene determinado por la ecuación (6.5).

$$\Delta c_{r,i} = c_{r,i}^h - c_{r,i}^t = f\left((W_i^h - W_i^t); c_{r,i}^t; (h_{2,i} - h_{1,i})\right) \quad (6.5)$$

Este incremento de coste de la instalación depende del volumen total de mercancía que se pretende gestionar a escala diaria-semanal y se debería analizar *ad hoc* para cada terminal de la empresa de distribución. La justificación se basa en que los costes constructivos, tecnológicos e incluso de compra de solar (ampliación del sistema) presentan una gran variación en función de la zona geográfica.

Sin embargo, para simplificar el estudio del *trade-off* del número de *hubs* en relación a este coeficiente, se ha aproximado el dominio de resultados de la función de incremento de coste definida anteriormente (ecuación 6.5) a únicamente dos valores.

En aquellas delegaciones $i \notin H$ en que la transformación a terminal *hub* no suponga un incremento significativo del volumen de mercancía a gestionar, los costes incrementales de ampliación y adaptación de la terminal $\Delta c_{r,i}$ tendrán un valor reducido e igual a c_r^{\min} . Se asume que la propia terminal tiene suficiente capacidad de respuesta para gestionar el incremento de demanda con una inversión moderada c_r^{\min} . No obstante, cuando la creación de un *hub* en una delegación estándar genere un incremento de volumen que implique cambios significativos en la estructura de la terminal, un nuevo sistema tecnológico de gestión e incluso la ampliación de la superficie, los costes incrementales del cambio se representan por c_r^g . La aproximación de la función incremento de coste quedaría definida por la expresión (6.6), definiendo un umbral de volumen gestionado W^* que limita los dos dominios de comportamiento del sistema.

$$\Delta c_{r,i} = \begin{cases} c_r^{\min} & \text{si } (W_i^h - W_i^t) < W^* \\ c_r^g & \text{si } (W_i^h - W_i^t) \geq W^* \end{cases} \quad (6.6)$$

6.2.2. Determinación del número óptimo de terminales *hub*

Se han planteado distintos escenarios de ejecución del algoritmo en problemas de dimensión pequeña y mediana con una distribución uniforme y no uniforme de la carga entre delegaciones. Las cargas de los envíos se han considerado inferiores a la capacidad del

vehículo, de forma que sean problemas *LTL*. En particular se han generado 3 tipologías de problemas con un intervalo propio de variación de la carga. En estos casos, los volúmenes se han escogido para representar situaciones con envíos muy inferiores a la capacidad del vehículo hasta situaciones con pocas posibilidades de consolidar carga en el vehículo.

Adicionalmente, también se han considerado 3 valores de costes unitarios de transferencia que representan distintos niveles de operación y manipulación de la carga en los *hubs* tal y como queda definido en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Resumen de valores adoptados en la resolución de los problemas

Asignación uniforme			
N_T	Tipo de carga	Coste transfer c_t (€/m ³)	Incremento de coste instalación, $\Delta c_{r,i}$ (€/hub-día)
17	Carga w_{ij} uniforme entre [20,40] m ³	0,1; 2; 10	a) $c_r^{\min} = c_r^g = 200$, c) $c_r^{\min} = 200$ $c_r^g = 2000$, b) $c_r^{\min} = c_r^g = 2000$, d) $c_r^{\min} = 700$ $c_r^g = 2000$
38	Carga w_{ij} uniforme entre [0,20] m ³		
	Carga w_{ij} uniforme entre [0,80] m ³		
Asignación no uniforme			
N_T	Tipo de carga	Coste transfer c_t (€/m ³)	Incremento de coste instalación, $\Delta c_{r,i}$ (€/hub-día)
25	Carga w_{ij} no uniforme entre [20,40] m ³	0,1; 2; 10	a) $c_r^{\min} = c_r^g = 200$, c) $c_r^{\min} = 200$ $c_r^g = 2000$, b) $c_r^{\min} = c_r^g = 2000$, d) $c_r^{\min} = 700$ $c_r^g = 2000$
41	Carga w_{ij} no uniforme entre [0,20] m ³		
	Carga w_{ij} no uniforme entre [0,80] m ³		

Las baterías de problemas con los atributos mostrados en la Tabla 6.3 han sido resueltas con la aplicación del algoritmo TS para distintos valores de la variable *número de hubs* (h). En particular, se han analizado especialmente los casos en que el número de *hubs* es reducido en relación al número de delegaciones y el caso específico en que no existe ningún *hub* en la región de servicio.

Así mismo, en la resolución de los problemas se ha considerado que el umbral W^* que diferencia el incremento de carga con un alto coste de inversión en la terminal *hub* de incrementos no significativos es $W^* = 0,7 W_i^t$. Es decir, se considerará un coste c_r^{\min} siempre que la apertura de la terminal *hub* genere un incremento de carga gestionada en la delegación inferior al 70% del volumen correspondiente a la situación sin terminal *hub*.

Distribución uniforme

En un primer lugar, las Figuras 6.2.a) y b) muestran el porcentaje de envíos que se gestionan vía *hub* en relación al número de *hubs* (h) en las distintas baterías de problemas. Esta relación es independiente del coste de instalación de cada terminal *hub*, ya que la asignación de envíos se ha realizado sin considerar el número de *hubs* como variable de decisión del problema (h variable de entrada). Se puede comprobar que, a nivel general, la curva asociada al porcentaje de envíos es estrictamente creciente en prácticamente todo el dominio de número de terminales *hub* considerado, a excepción del problema de 17 delegaciones cuando $0 \leq h \leq 2$. En este último caso, el hecho de pasar de 1 a 2 *hubs* hace que su localización se efectúe en los extremos de la región de servicio y que existan menos envíos con potencialidades físicas de consolidación en *hub*.

A nivel general, los problemas con una carga menor o los que tiene asociado un menor indicador de ocupación (expresión 5.3) son los que presentan un mayor porcentaje de envíos *hub*. Se puede comprobar en las dos figuras mencionadas que las curvas con mayor porcentaje de envíos *hub* corresponden a problemas con cargas $w_{ij} \in [0,20]m^3$, con valores superiores al 10 % en todas las curvas asociadas a distintos costes de transferencia c_t . En estos casos, se podría llegar a más del 50 % de envíos a través de *hubs* cuando $h > 6$ y $c_t \leq 2 \text{ €/m}^3$. Posteriormente, las curvas asociadas a cargas $w_{ij} \in [20,40]m^3$ se encontrarían en la segunda posición de porcentajes de envíos *hub* y finalmente las curvas con $w_{ij} \in [0,80]m^3$ consolidarían un porcentaje muy reducido de envíos en las terminales. Adicionalmente, en problemas con un mismo dominio de variación del volumen de carga, se puede comprobar que el coste unitario de transferencia juega un papel muy importante. Si bien no se detecta un comportamiento diferencial cuando $c_t = 0,1-2 \text{ €/m}^3$, el hecho de considerar $c_t = 10 \text{ €/m}^3$ es muy limitativo para los movimientos *hub*.

En el caso de envíos uniformes entre delegaciones, se destaca la importancia del coeficiente de coste unitario de transferencia c_t conjuntamente con la relación entre el tamaño de envío y la capacidad del vehículo (dimensión de envíos *LTL*).

Este efecto se reproduce en la determinación de los costes totales del sistema de distribución, si bien en este caso el incremento del número de *hubs* viene acompañado de un incremento de coste de terminal *hub* $\Delta c_{r,i}$.

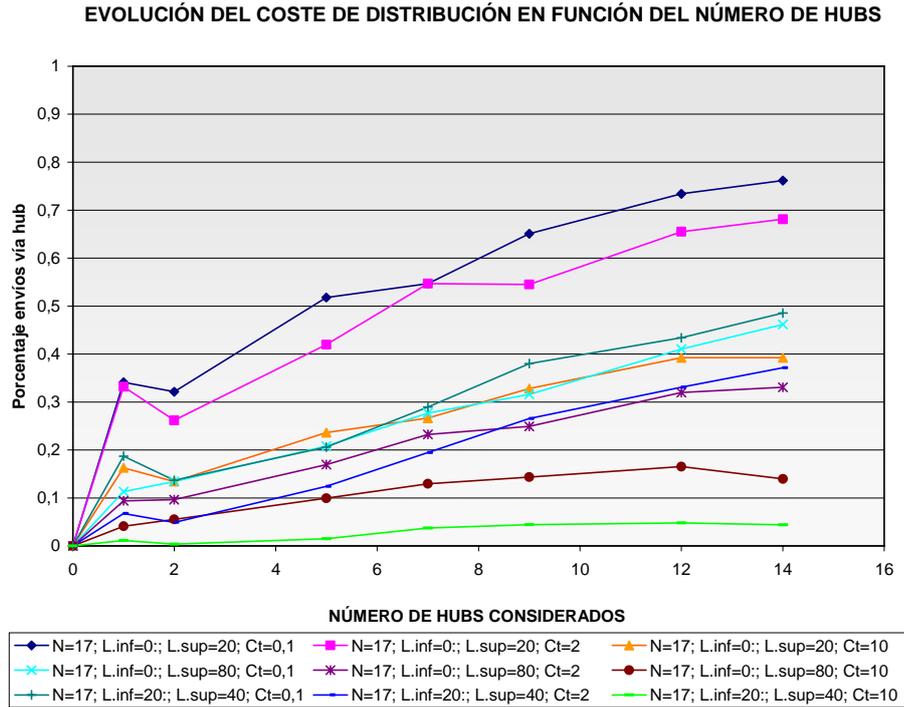


Fig.6.2a. Porcentaje de envíos a través de hub en el problema de 17 delegaciones

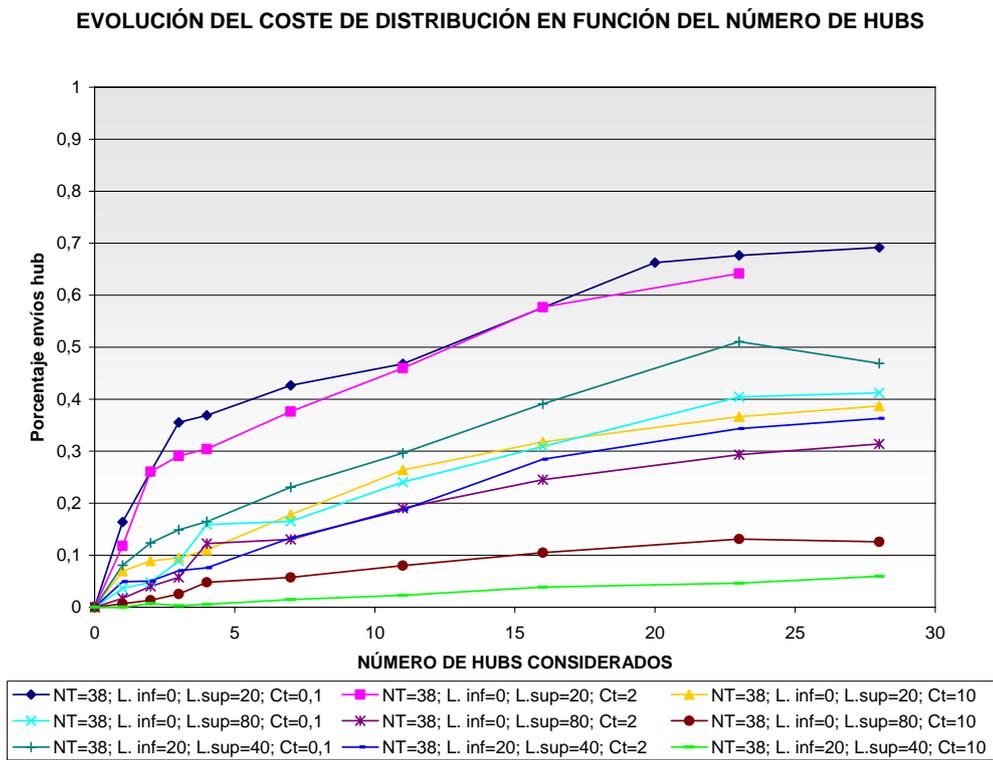


Fig.6.2b. Porcentaje de envíos a través de hub en el problema de 38 delegaciones

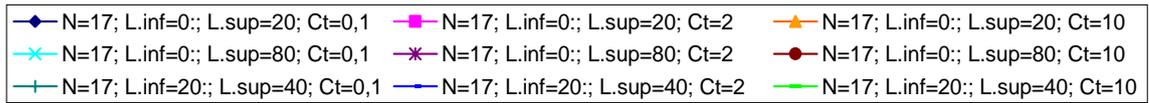
En este sentido, en las Figuras 6.3 a), b), c) y d) se ilustra la curva de coste total del sistema (suma del valor de la función de costes $Z1$ de la ecuación 3.3 y $\Delta c_{r,i}$) para el problema con 17 delegaciones con los distintos escenarios de variación de parámetros.

A nivel general, el paso de una distribución sin terminales *hub* a un sistema con una terminal reduce significativamente el coste global en todos los escenarios. Cuando $c_r^{\min} = c_r^g = 200$ €/día, el sistema con una sola terminal *hub* ($h=1$) suele presentar los mejores resultados, especialmente para los casos en que se presentaba un menor número de envíos *hub* en las Figuras 6.3.a) y b). Estos casos se asocian a problemas con cargas similares a la capacidad del vehículo y un coeficiente $c_t = 10$ €/m³. Sin embargo, se puede comprobar que las curvas con $w_{ij} \in [0,20]$ m³ y $c_t = 0,1$ ó 2 €/m³ presentan valores mínimos de coste para altos valores de *hub* ($h > 12$). En estos casos, el crecimiento de los costes es prácticamente insensible al número de *hubs*. El motivo de este comportamiento se basa en que el número de *hubs* con un incremento de volumen superior a $W^* = 0,7 W_i^t$ es en todos los casos inferior o igual a 4.

Por lo tanto, cualquier incremento del número de *hubs* comporta un incremento en los costes de instalación prácticamente insensible en la función de costes y que se justifica por el ahorro en rutas o costes de la distribución. En estos casos, cualquier incremento en la función de costes es debido a un cambio en la reestructuración de las redes y no a una variación de los costes de instalación al agregar *hubs*.

En el caso $c_r^{\min} = 200$ €/día y $c_r^g = 2000$ €/día se reproduce a nivel general el comportamiento anteriormente descrito, si bien se puede comprobar que en el dominio $h = \{2,3\}$ los problemas con $w_{ij} \in [0,20]$ m³ y $c_t = 0,1-2$ €/m³ presentan un incremento de coste mucho más marcado a las curvas del caso $c_r^{\min} = c_r^g = 200$ €/día. Esto es debido a que en estos problemas todos los *hubs* ($h < 4$) gestionan un gran volumen de mercancía y por lo tanto imputan el coste máximo de instalación $c_r^g = 2000$ €/día.

Para el caso, $c_r^{\min} = c_r^g = 2000$ €/día las representaciones de coste determinan una solución óptima para el caso de $h=1$. Se puede comprobar que el alto coste que inflige el incremento de una terminal *hub* no justifica el ahorro de ruteo del sistema. Finalmente, el caso caracterizado por $c_r^{\min} = 700$ y $c_r^g = 2000$ €/día presenta un comportamiento relativamente parecido al anterior con un mínimo del sistema para $h=1$ para todos los problemas con carga $w_{ij} \in [0,20]$ m³ y $w_{ij} \in [20,40]$ m³. En el caso que los problemas tengan cargas $w_{ij} \in [0,80]$ m³, la determinación del coste mínimo corresponde al dominio $h = \{2,3\}$.



EVOLUCIÓN DEL COSTE DE DISTRIBUCIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE HUBS

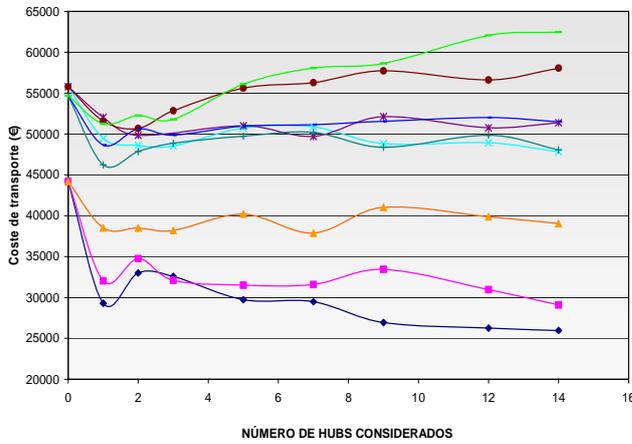


Fig.6.3a. Coste de transporte con $C_r^{\min} = 200 \text{ €/día}$; $C_r^g = 200 \text{ €/día}$ para el problema de 17 delegaciones

EVOLUCIÓN DEL COSTE DE DISTRIBUCIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE HUBS

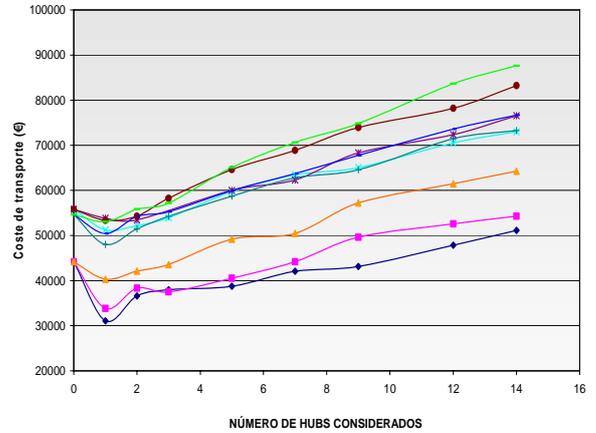


Fig.6.3b. Coste de transporte con $C_r^{\min} = 2000 \text{ €/día}$; $C_r^g = 2000 \text{ €/día}$ para el problema de 17 delegaciones

EVOLUCIÓN DEL COSTE DE DISTRIBUCIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE HUBS

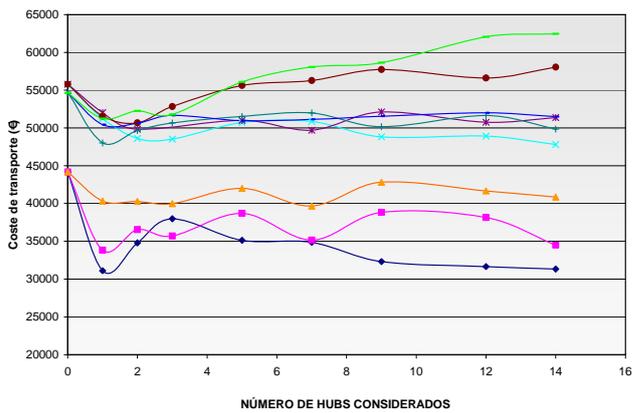


Fig.6.3c. Coste de transporte con $C_r^{\min} = 200 \text{ €/día}$; $C_r^g = 2000 \text{ €/día}$ para el problema de 17 delegaciones

EVOLUCIÓN DEL COSTE DE DISTRIBUCIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE HUBS

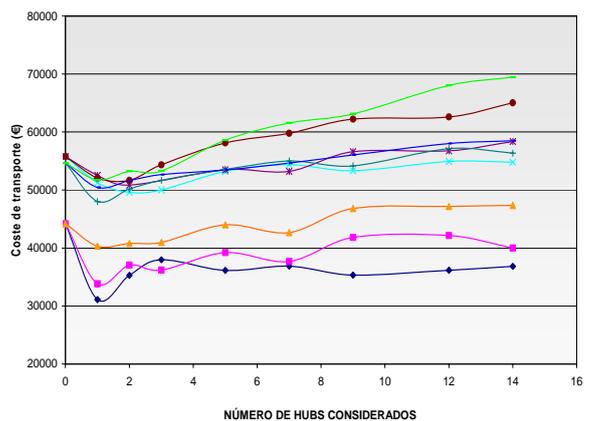
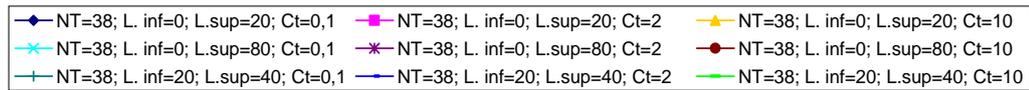


Fig.6.3d. Coste de transporte con $C_r^{\min} = 700 \text{ €/día}$; $C_r^g = 2000 \text{ €/día}$ para el problema de 17 delegaciones

Las Figuras 6.4 a) - d) presentan los costes totales de transporte y de instalaciones para los problemas con 38 delegaciones. El comportamiento es parecido al caso de los problemas con $N_T=17$, si bien el valor mínimo de la función de coste se encuentra en otros dominios de h . A nivel general, cuando los costes de instalación son uniformes y menores a 200 €/día, es rentable construir un gran número de terminales *hub* siempre que $c_i < 2 \text{ €/m}^3$. En el caso que $C_r^{\min} = 200 \text{ €/día}$ y $C_r^g = 2000 \text{ €/día}$, existe un comportamiento similar al caso $N_T=17$ si bien las curvas de coste asociadas a $w_{ij} \in [0,20] \text{ m}^3$ presentan un comportamiento singular al pasar de $h=4$ a $h=5$.



EVOLUCIÓN DEL COSTE DE DISTRIBUCIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE HUBS

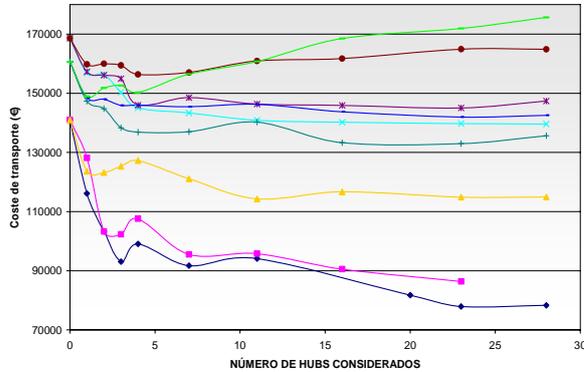


Fig. 6.4a. Coste de transporte con $c_r^{\min} = 200$ €/día; $c_r^g = 200$ €/día para el problema de 38 delegaciones

EVOLUCIÓN DEL COSTE DE DISTRIBUCIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE HUBS

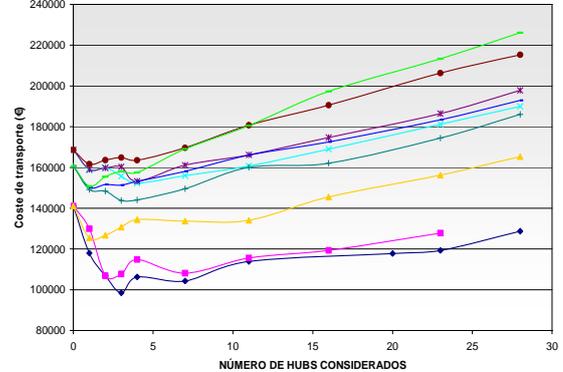


Fig. 6.4b. Coste de transporte con $c_r^{\min} = 2000$ €/día; $c_r^g = 2000$ €/día para el problema de 38 delegaciones

EVOLUCIÓN DEL COSTE DE DISTRIBUCIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE HUBS

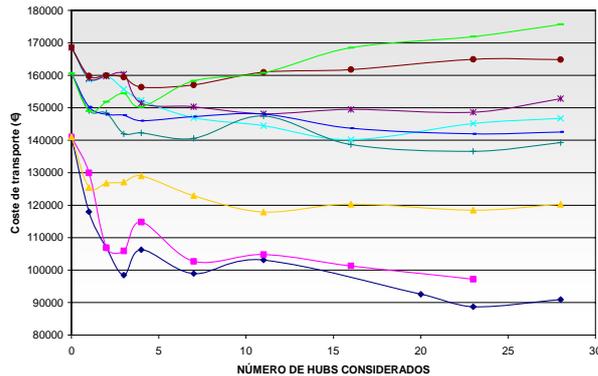


Fig. 6.4c. Coste de transporte con $c_r^{\min} = 200$ €/día; $c_r^g = 2000$ €/día para el problema de 17 delegaciones

EVOLUCIÓN DEL COSTE DE DISTRIBUCIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE HUBS

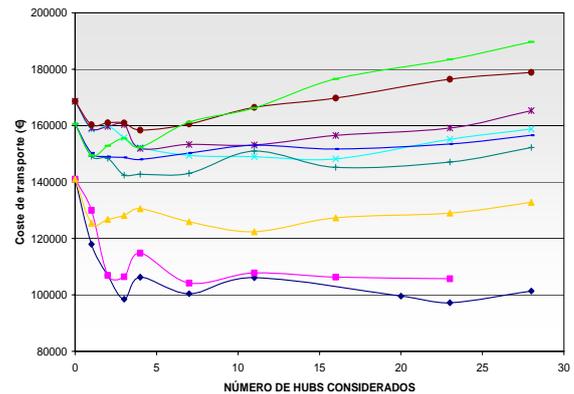


Fig. 6.4d. Coste de transporte con $c_r^{\min} = 700$ €/día; $c_r^g = 2000$ €/día para el problema de 17 delegaciones

El dominio de valores $h=\{4,5\}$ coincide precisamente con el número de terminales *hub* que generan un incremento significativo de volumen ($W_i^h - W_i^t > W_i^*$) debido a la consolidación de la carga, y por tanto presentan un coste de instalación asociado de $c_r^g = 2000$ €/día. En este contexto, cualquier incremento en el número de *hubs* en el dominio $h > 5$ podrá proporcionar una mejor reestructuración de las rutas y únicamente vendrá afectado por un incremento de coste de instalación de $c_r^{\min} = 200$ €/día. Finalmente, los casos con $c_r^{\min} = c_r^g = 2000$ €/día, presentan un valor óptimo del número de *hubs* en $h=\{3,4\}$ para problemas con $0,1 \leq c_t \leq 2$ €/m³ y de $h=1$ para problemas con $c_t = 10$ €/m³.

Distribución no uniforme

En el caso de la distribución de carga no uniforme entre un conjunto de delegaciones existentes, se vuelve a comprobar que el número de *hubs* óptimo depende del volumen de carga medio de cada envío, del coeficiente de coste de transferencia en cada terminal y del coeficiente de coste de instalación. La evolución del coste en este tipo de problemas no difiere significativamente de la batería de problemas con distribución uniforme, tal y como se puede comprobar en el Anexo A5.

Para el caso $w_{ij} \in [20,40]m^3$, $w_{ij} \in [0,80]m^3$ y $c_t \geq 2 \text{ €/m}^3$, el número de *hubs* óptimo es $h^* = \{1,2\}$ para el problema con $N_T = 25$ delegaciones. En este contexto, si el problema presenta 41 delegaciones, el dominio óptimo de *hubs* pasa a ser de $h^* = \{3,4\}$ de forma independiente a los valores del incremento de coste de instalación $\Delta c_{r,i}$.

Sin embargo, en los envíos con carga $w_{ij} \in [0,20]m^3$ y todos los problemas con $c_t = 0,1 \text{ €/m}^3$, el coste mínimo de instalación condiciona de forma significativa el número de *hubs* óptimo. Para c_r^{\min} bajos, la función de costes no es estrictamente creciente o decreciente en sus dominios y por lo tanto es difícil localizar un dominio de la variable de decisión que minimice el coste en todos los problemas de este tipo. En cambio, si la localización de nuevos *hubs* supone un coste de amortización de la instalación superior a 1000 €/día, el número óptimo de *hubs* queda definido en los valores $h^* = \{2,5\}$.

Como conclusión, únicamente es recomendable disponer de un número alto de *hubs* cuando el tamaño de la carga en relación a la capacidad es reducido ($o_c < 0,25$), los costes de unitarios de transferencia son muy inferiores a los costes de parada ($c_t \ll c_p$) y a los kilométricos ($c_t \ll c_d$) y, principalmente, cuando los costes de transferencia sean menores a la relación entre el coste fijo de servicio de un vehículo F y el tamaño medio de envío \bar{w}_{ij} ($c_t \ll F/\bar{w}_{ij}$). Esta última exigencia hace referencia a que un envío *hub* sea más competitivo que la creación de una nueva ruta directa.

6.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS COSTES UNITARIOS Y TAMAÑO ÓPTIMO DE LOS VEHÍCULOS

El objetivo de esta tarea es el estudio del efecto de la variación de costes unitarios en la solución del problema, así como la determinación del tamaño de vehículo óptimo utilizado

para el transporte. Los costes totales del sistema no presentan un comportamiento lineal al incremento de alguno de los costes unitarios de la formulación (3.4) ya que la relación entre costes unitarios condiciona la elección de la estrategia de distribución de envío a seguir.

Adicionalmente, uno de los aspectos físicos que determina en gran medida los costes unitarios de los vehículos es el cambio en la capacidad de los vehículos. Como se ha visto en el subcapítulo 6.1, existe un equilibrio entre tamaño del envío entre un origen y destino y su coste unitario de transporte.

Los vehículos de mayor capacidad presentan los mayores costes F y c_d aunque el coste unitario por unidad de volumen transportado es muy inferior. Se puede comprobar en la Tabla 6.1 y 6.2 que el coste kilométrico para los vehículos V_1 (80 m^3) y V_3 ($33,5 \text{ m}^3$) es de $0,4$ y $0,291 \text{ €/km}$ respectivamente. Sin embargo, si los vehículos circulan llenos (*FTL*) los costes unitarios por volumen transportado son respectivamente de $0,005 \text{ €/km-m}^3$ para V_1 y de $0,0087 \text{ €/km-m}^3$ para V_3 . Por lo tanto, resulta óptimo utilizar vehículos de máxima capacidad siempre que los vehículos circulen con una ocupación alta. El problema surge cuando los envíos no tienen un volumen importante y los vehículos de transporte deben incrementar su ocupación básicamente por efecto de estrategias *peddling* o *hub*. En estos casos, las potencialidades de implantación de estas estrategias de consolidación de carga condicionarán la adopción de una tipología de vehículos determinada.

Para el análisis de sensibilidad de los costes totales en relación a la variación de los costes unitarios, se han generado un total de 12 problemas que cubren redes de dimensiones espaciales reducidas y medias así como una distribución de la carga uniforme y no uniforme. En un nivel inferior, se determinan 3 posibles dominios de variación de los volúmenes de envío, tal y como muestra la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Resumen de valores adoptados en la batería de problemas para el análisis de sensibilidad

Asignación uniforme		Asignación no uniforme	
N_T	Tipo de carga	N_T	Tipo de carga
17 38	Carga w_{ij} uniforme entre $[20,40] \text{ m}^3$	25 41	Carga w_{ij} no uniforme entre $[20,40] \text{ m}^3$
	Carga w_{ij} uniforme entre $[0,20] \text{ m}^3$		Carga w_{ij} no uniforme entre $[0,20] \text{ m}^3$
	Carga w_{ij} uniforme entre $[0,80] \text{ m}^3$		Carga w_{ij} no uniforme entre $[0,80] \text{ m}^3$

Cada problema tipo generado según los valores de la Tabla 6.4 ha sido resuelto con la aplicación del algoritmo TS con 12 combinaciones posibles de costes de parada y costes de transferencia en la terminal. Los valores admitidos para los costes unitario de parada son $c_p = \{5, 15, 35, 50\}$ expresados en €/parada, mientras que los valores asociados a los costes de transferencia son $c_t = \{0,1; 1; 5; 10\}$, expresados en €/m³. Adicionalmente, se han

considerado los 3 tamaños disponibles de vehículos (V_1, V_2, V_3) con sus costes unitarios asociados determinados en las Tablas 6.1 y 6.2.

De este modo, para cada uno de los 12 problemas tipo determinados según la Tabla 6.4., se han evaluado un total de 48 realizaciones de aplicación del algoritmo, resultado de todas las combinaciones o escenarios posibles de costes unitarios de parada, transferencia y tipo de vehículo. A nivel global, se ha resuelto un total de 576 escenarios de simulación que permitirán caracterizar la sensibilidad del coste global del sistema a los costes unitarios y el tamaño de vehículo óptimo en cada escenario.

Problemas de tamaño reducido

Los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo TS a la batería de problemas de tamaño reducido ($N_T=17$ y 25 delegaciones) se sintetizan en las Figuras 6.5 a)-f).

En estas figuras, cada tipología de vehículo V_1, V_2 y V_3 presenta una superficie de coste de distribución que depende del coste de transferencia c_t y del coste de parada c_p . De forma general, se puede comprobar que la distribución uniforme o *Weibull* del volumen de carga no afecta significativamente a la evolución del coste total; por lo que no se detecta un comportamiento diferencial entre ambas baterías de problemas.

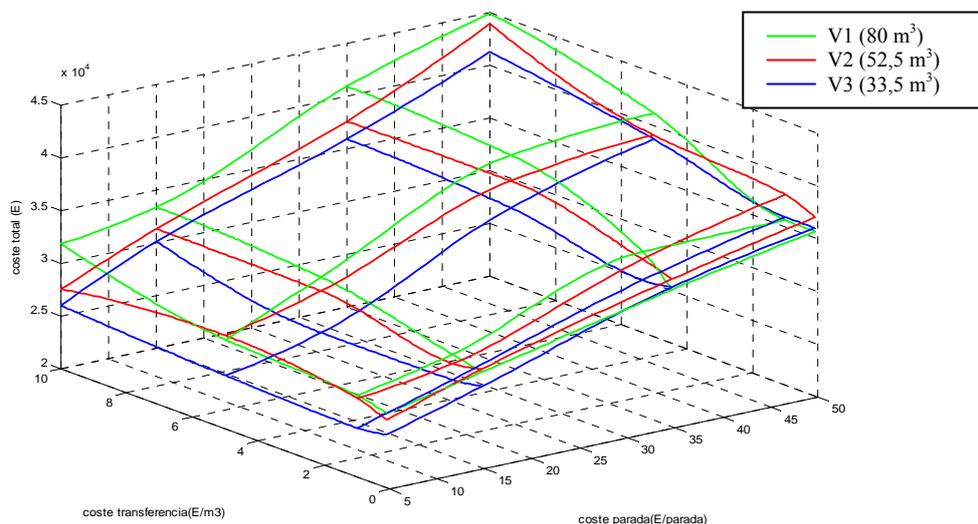


Fig. 6.5a) Costes totales para el problema con 17 delegaciones y carga $w_{ij} \in$ entre $[0,20] m^3$

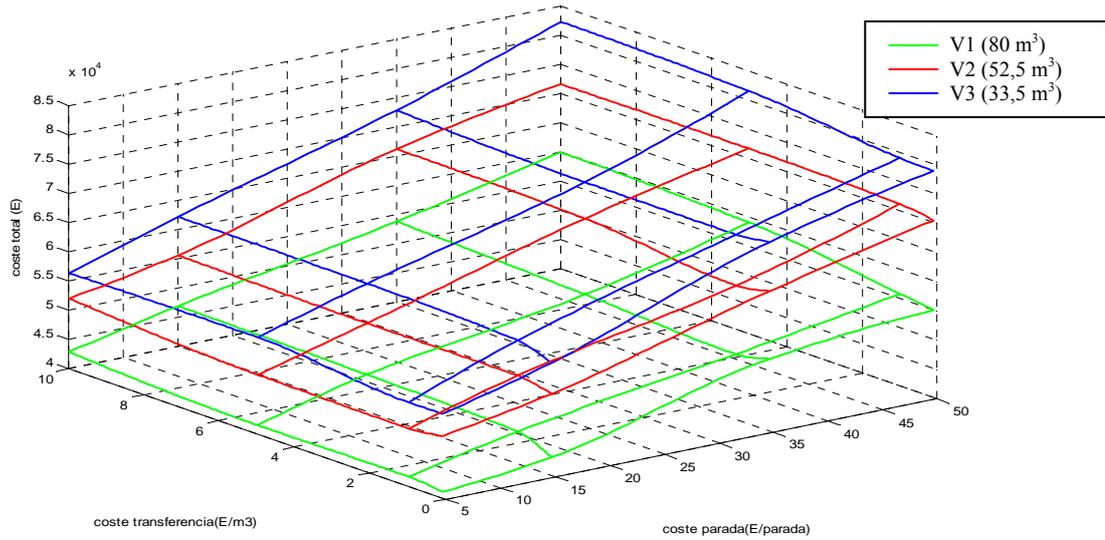


Fig. 6.5b) Costes totales para el problema con 17 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0,80] \text{ m}^3$

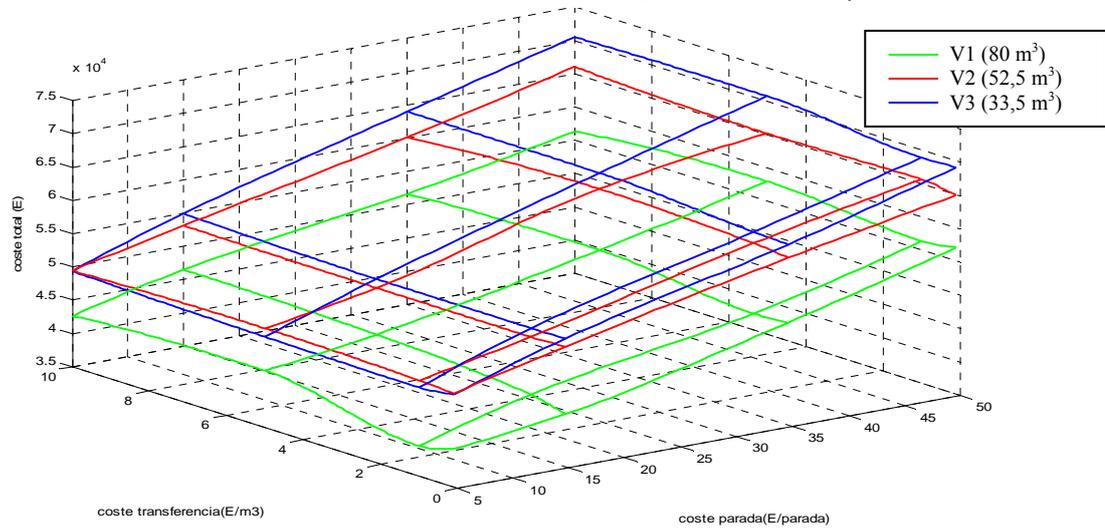


Fig. 6.5c) Costes totales para el problema con 17 delegaciones y carga $w_{ij} \in [20,40] \text{ m}^3$

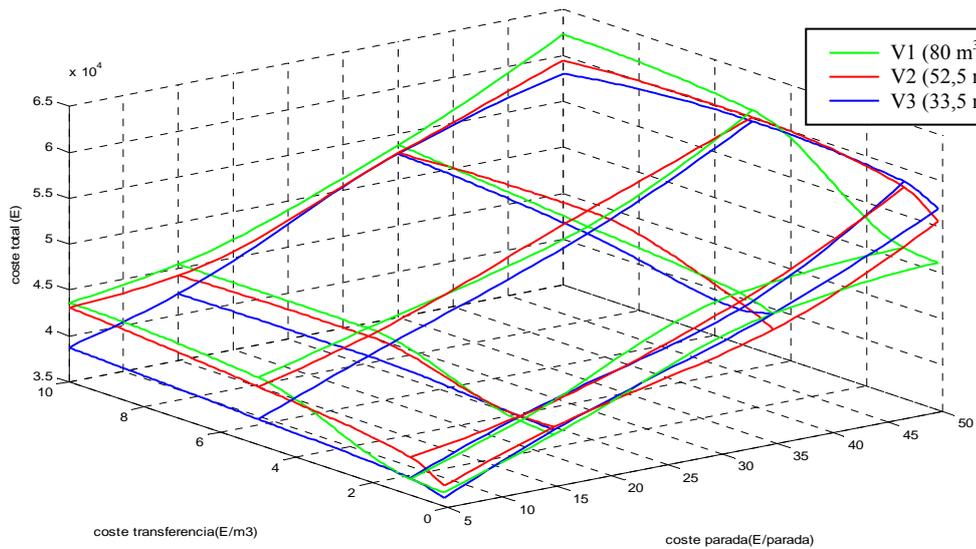


Fig. 6.5d) Costes totales para el problema con 25 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0,20] \text{ m}^3$

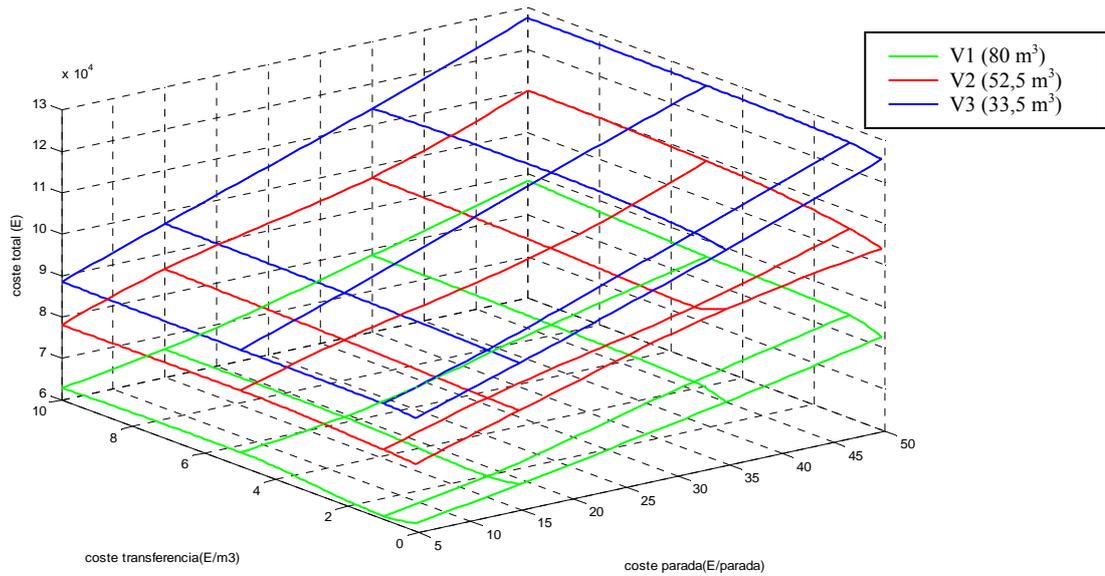


Fig. 6.5e) Costes totales para el problema con 25 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0,80] m^3$

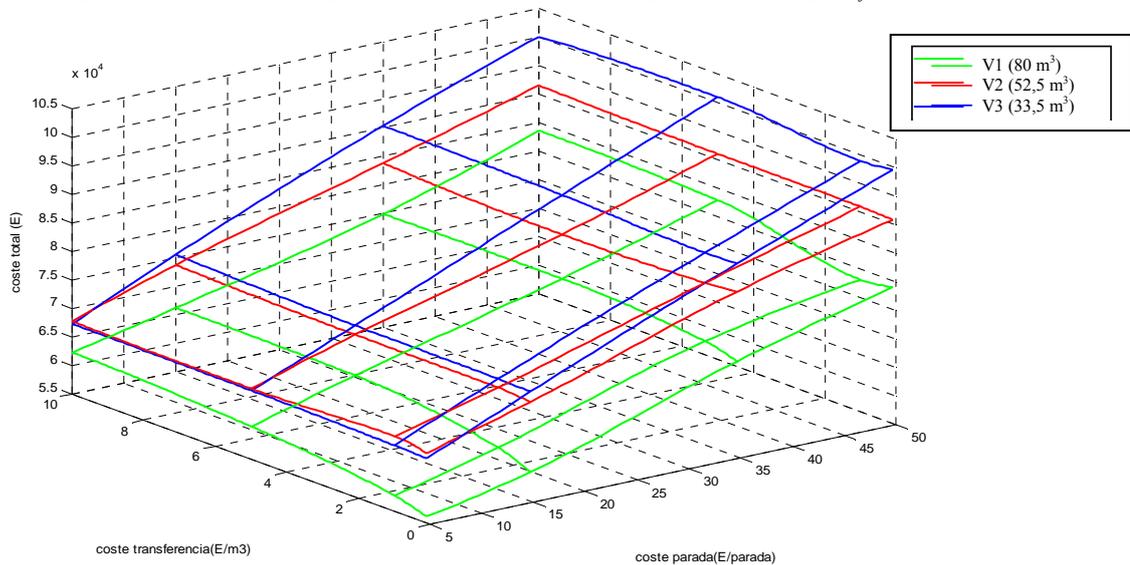


Fig. 6.5f) Costes totales para el problema con 25 delegaciones y carga $w_{ij} \in [20,40] m^3$

Tanto el problema de 17 delegaciones como el de 25 delegaciones presentan un valor mínimo del coste global del sistema para los vehículos V_1 de máxima capacidad de transporte ($80m^3$) cuando la carga de los envíos w_{ij} fluctúa entre $[20,40] m^3$ ó $[0,80] m^3$. Las superficies de coste no presentan líneas de intersección y por lo tanto siempre se pueden identificar los vehículos de mayor tamaño como la alternativa óptima. En estos dominios de volúmenes de carga, el coste asociado a una tipología de vehículos presenta una tasa de crecimiento constante tanto a incrementos del coste de parada y del coste de transferencia.

Sin embargo, a medida que la relación entre el tamaño de envío medio y la capacidad del vehículo presenta un valor más reducido (problemas *LTL*), la tasa de crecimiento del coste no es uniforme. En este sentido, en escenarios con $o_c < 0,2$ (ecuación 5.3) la carga asociada a un envío llena únicamente el 20 % de la capacidad del vehículo. En este contexto las

posibilidades de implantación de estrategias de consolidación de carga *peddling* o *hubbing* deben ser efectivas para poder justificar los mayores costes de la flota de mayor capacidad.

Este efecto se puede comprobar en los problemas con carga $w_{ij} \in [0,20] \text{ m}^3$ de las Figuras 6.5.a) y d). A nivel general la flota de vehículos V_3 de $33,5 \text{ m}^3$ es la más eficiente, especialmente para $c_t > 2 \text{ €/m}^3$. Sin embargo, cuando la estrategia de envío a través de *hub* no está penalizada con un alto coste de transferencia ($c_t < 2 \text{ €/m}^3$), la competitividad y eficiencia de las flotas de mayor capacidad (V_1 y V_2) se incrementan.

Adicionalmente, esta mejora de la eficiencia de las flotas V_1 y V_2 cuando $c_t < 2 \text{ €/m}^3$ se hace más significativa para valores altos del coste unitario de parada c_p . Este fenómeno se puede comprobar más fácilmente en las Figuras 6.6a) y b) en las que se representa la intersección de las superficies de coste de las Figuras 6.5 con planos de coste de parada constante para problemas con $w_{ij} \in [0,20] \text{ m}^3$.

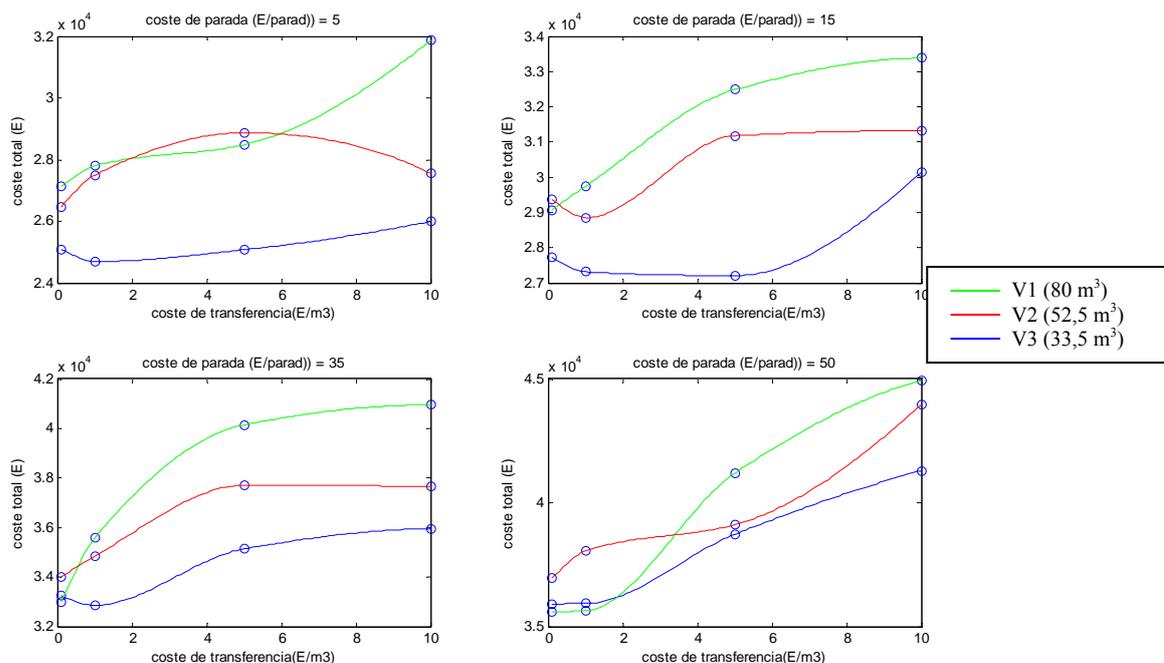


Fig. 6.6a) Coste total de distribución en problema con 17 delegaciones y $w_{ij} \in [0,20] \text{ m}^3$

Este hecho es debido a que el alto coste de paradas limita significativamente la implantación de estrategias *peddling*. De este modo, en escenarios con costes de parada bajos ($c_p < 30 \text{ €/parada}$) las estrategias *peddling* y envíos *hub* son aplicables y por tanto, la consolidación de carga se efectúa con la utilización de ambas estrategias indistintamente. Sin embargo, cuando el coste de parada es alto, la estrategia *peddling* resulta altamente penalizada. La estrategia de envíos vía *hub* es la única que potencialmente se podrá aplicar y justifica que la

curva de costes de las Figuras 6.6a) y b) sea mucho más sensible a variaciones de c_t cuando $c_p=50$ €/parada.

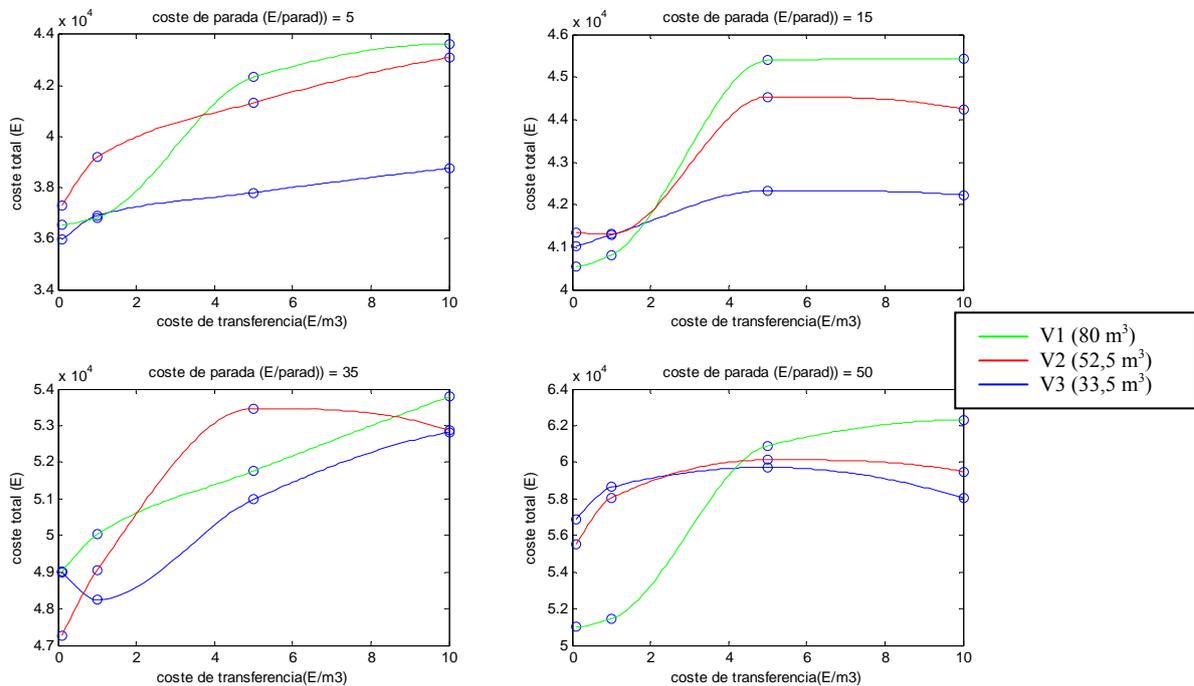


Fig. 6.6b) Coste total de distribución en problema con 25 delegaciones y $w_{ij} \in [0,20] m^3$

Cabe decir que la utilización de vehículos de la tipología V_2 de capacidad igual a $52,5 m^3$ no resulta en ningún caso óptima en comparación con las demás alternativas. Como se puede comprobar las economías de escala hacen que la tipología de vehículos V_1 presente un incremento del 139% de capacidad en relación a la flota V_3 , frente a un incremento de coste kilométrico y de servicio del 37% y 22% respectivamente (Tabla 6.5). No obstante, la tipología V_2 únicamente produce un incremento de capacidad del 50 % en relación a la tipología V_3 con unos incrementos de coste similares al caso V_1 .

Tabla 6.5 Evolución de coste e incrementos de recursos asociados a las tipologías de vehículos

	Coste de Vehículo en Servicio		Coste kilométrico		Capacidad	
	F (€/día)	$\Delta\%$	cd(€/km)	$\Delta\%$	C (m^3)	$\Delta\%$
V3	213	0%	29%	0%	33.5	0%
V2	241	13%	38%	32%	52.5	57%
V1	260	22%	40%	37%	80	139%

Problemas de tamaño medio

Los resultados para los problemas de 38 y 41 delegaciones presentan unas características y sensibilidad de parámetros muy similares a los problemas de tamaño reducido. En los escenarios de modelización con cargas de envío que presenten un nivel de ocupación alto ($o_c > 0,3$), la tipología de vehículos de mayor capacidad resulta ser la más eficiente. En las baterías con carga de envíos w_{ij} entre $[20,40] \text{ m}^3$ ó $[0,80] \text{ m}^3$, el vehículo de 80 m^3 presenta un coste de distribución inferior a las tipologías de vehículo V_2 y V_3 en todo el dominio de análisis de los parámetros. Los resultados se pueden consultar en el Anexo A6.

Sin embargo, en la batería de problemas con volumen de envíos en el dominio $[0,20] \text{ m}^3$, la variable ocupación asociada a un envío medio es $o_c = 0,125$ para el caso de vehículos V_1 , $o_c = 0,19$ para la tipología V_2 y $o_c = 0,3$ para la flota V_3 . En estos casos, resulta evidente la necesidad de consolidación de cargas para asegurar una productividad adecuada del vehículo y por tanto, la bondad de la solución del problema queda condicionada a las posibilidades de aplicar estrategias de consolidación. Por lo tanto, al igual que sucedía en problemas de tamaño reducido, la solución en estos casos es mucho más sensible a los parámetros y configuraciones físicas de la red de transporte. Este comportamiento queda reflejado en las Figuras 6.7a) y b) donde se representa la evolución del coste total de distribución para problemas de 38 y 41 delegaciones.

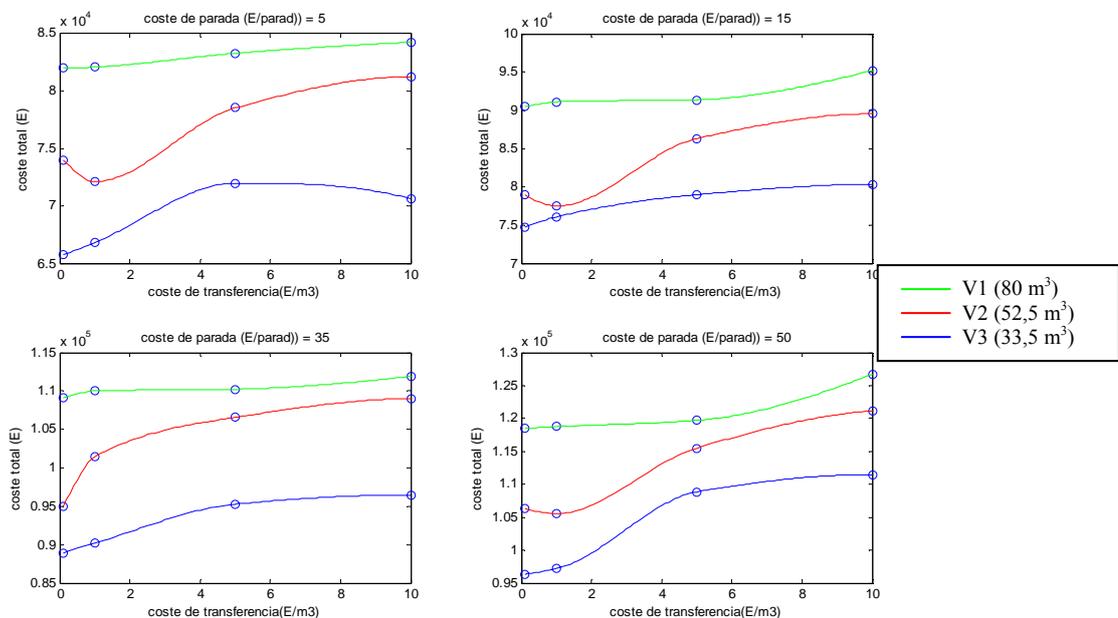


Fig. 6.7.a) Evolución del coste de distribución total en problema de 38 delegaciones con distribución de envíos uniforme y $w_{ij} \in [0,20] \text{ m}^3$

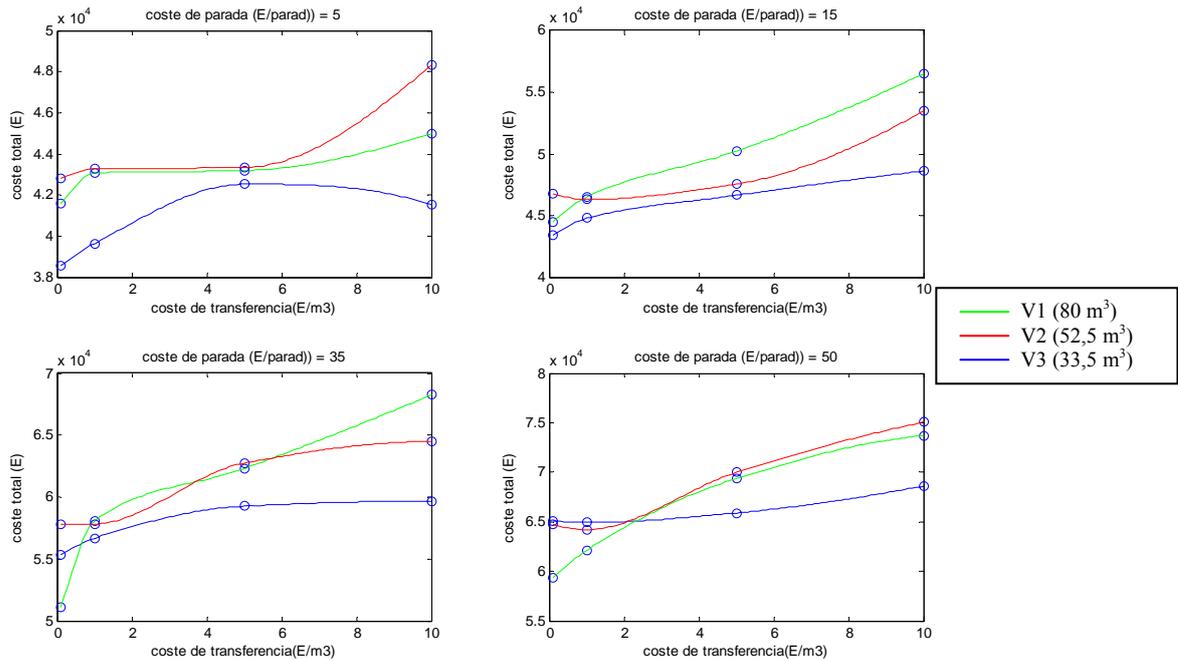


Fig. 6.7.b) Evolución del coste de distribución total en problema de 41 delegaciones con distribución de envíos Weibull y $w_{ij} \in [0,20] m^3$

En este caso se identifica un fenómeno diferencial entre el problema de 38 delegaciones con distribución uniforme de envíos entre delegaciones y el problema de 41 con distribución no uniforme. En el problema con asignación Weibull de 41 delegaciones, la tipología de vehículos de máxima capacidad V_1 (80m³) es la más eficiente cuando existe un alto coste unitario de parada y un bajo coste de transferencia, especialmente cuando $c_t < 1 \text{ €/m}^3$ y $c_p > 35 \text{ €/parada}$. Este aspecto ya se había identificado en los problemas de dimensión pequeña.

Sin embargo, en el caso del problema de 38 delegaciones se puede comprobar en la Figura 6.7.a) que la tipología de vehículo V_3 ($C=33,5m^3$) es la que presenta los costes de distribución más reducidos en todo el dominio de análisis. La sensibilidad a la reducción de costes de transferencia c_t asociada a la flota V_1 de mayor capacidad no se manifiesta en este caso en una escala tan acentuada como en los anteriores problemas.

Este hecho es debido a la distribución de los envíos entre las delegaciones de servicio. En el problema con $N_7=41$ se efectuaba una distribución de envíos entre delegaciones según su potencial atractor y generador, que queda manifestado en la Figura 6.8.b). El volumen total gestionado (envíos más recepción) por las delegaciones es muy variable, de forma que la mayor parte de transporte de carga se efectúa entre pocas delegaciones origen y destino.

En cambio, la Figura 6.8.a) representa el volumen de carga gestionado por las delegaciones con una distribución uniforme, pudiéndose constatar que las delegaciones presentan prácticamente el mismo volumen de gestión.

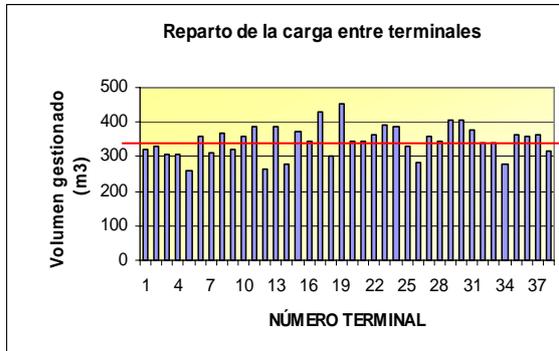


Fig. 6.8.a) Distribución de la carga entre las 38 delegaciones del problema con distribución uniforme

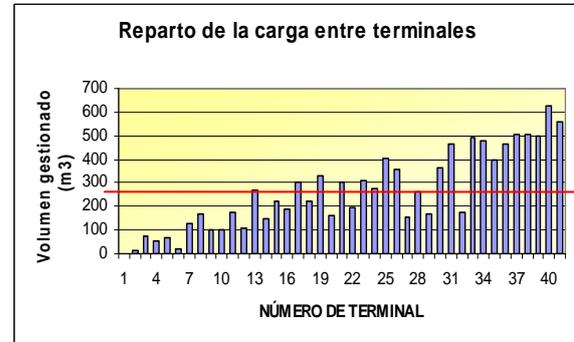


Fig. 6.8.b) Distribución de la carga entre las 41 delegaciones del problema con distribución Weibull

Estas características tienen una afectación directa en la construcción de rutas de distribución de muchos orígenes a muchos destinos. A medida que el número de delegaciones de servicio en un territorio (N_T) crece, los problemas con asignación no uniforme presentan un subconjunto de delegaciones que concentran toda la carga a transportar. El hecho de que muchos envíos compartan orígenes y destinos incrementa las posibilidades de aplicación de estrategias de envío *hub* o *peddling*, es decir, se aumenta la capacidad de consolidación de la carga y de productividad de los camiones. Sin embargo, en los problemas con distribución uniforme, el hecho de incrementar el número de delegaciones N_T incrementa significativamente las posibilidades o combinaciones de envíos entre orígenes y destinos en todo el territorio uniformemente. De este modo, en estos casos es más difícil poder encontrar rutas con envíos que presenten una delegación origen o destino compatible.

6.4. ESTIMACIÓN DE LOS COSTES DE DISTRIBUCIÓN

El objetivo de este problema es realizar un análisis de la variación de los costes de distribución en relación a los tamaños de envío, así como poder estimar los costes de un sistema logístico con una formulación compacta. La formulación analítica permitirá cuantificar a priori los costes derivados del servicio en la fase de planificación sin tener que aplicar la técnica metaheurística.

Para proceder a la consecución de estos objetivos, se han generado 5 problemas de distinto tamaño a los que se les aplicó un rango de variación del volumen de los envíos, tal y

como se detalla en la Tabla 6.6. En total, se han generado 44 escenarios distintos a los que se ha aplicado el algoritmo para analizar la bondad de la solución. Los escenarios desarrollados se han configurado para reproducir ejemplos reales con mayor frecuencia de aparición. La creación de los escenarios así como los costes unitarios utilizados se han configurado de acuerdo con la información y comentarios aportados en entrevistas personales a empresas del sector.

Tabla 6.6. Generación de baterías de problemas para la estimación de los costes de distribución de la carga considerando $C=80m^3$

Asignación uniforme entre puntos (i,j)		Asignación no uniforme entre puntos (i,j)	
N_T	Variación de carga	N_T	Variación de carga
17	Carga $w_{ij} \in [60,80] m^3$	25	Carga $w_{ij} \in [60,80] m^3$
23	Carga $w_{ij} \in [20,40] m^3$	32	Carga $w_{ij} \in [20,40] m^3$
38	Carga $w_{ij} \in [10,70] m^3$	41	Carga $w_{ij} \in [10,70] m^3$
45	Carga $w_{ij} \in [0,20] m^3$	49	Carga $w_{ij} \in [0,20] m^3$
66	Carga $w_{ij} \in [0,50] m^3$	71	Carga $w_{ij} \in [0,50] m^3$
	Carga $w_{ij} \in [0,80] m^3$		Carga $w_{ij} \in [0,80] m^3$

En estos casos, se ha considerado un coste de paradas $c_p=15$ €/parada, un coste de transferencia $c_t=10$ €/m³ y se ha utilizado la flota de máxima capacidad (tipología V₁).

Las soluciones de los problemas con asignación uniforme de la carga entre todos los puntos (i,j) con $w_{ij}^k, k=1, \dots, n_{ij}$ se detallan en la Tabla 6.7, obteniéndose con la aplicación del algoritmo TS para un alto número de iteraciones (criterio de parada $N_I=4000N_T$).

Se puede observar que el número de envíos a través de *hub* y de envíos con paradas múltiples fluctúa de forma significativa en función del dominio de variación de la carga a transportar y, en segundo lugar, en función del tamaño del problema y número de *hubs*. En los casos que la carga entre cada par de delegaciones $(i,j) \in N$ siga una distribución uniforme de probabilidad entre $[0,20] m^3$, el número medio de envíos por ruta fluctúa entre (3,4 ; 4,8). El límite inferior corresponde a problemas de gran tamaño, mientras que el superior representa situaciones con un número de delegaciones reducido. Sin embargo, los problemas que presentan una distribución de la carga uniforme en el intervalo $[60,80] m^3$ no permiten en ningún caso envíos *peddling* o *hub* debido a las restricciones de capacidad de los vehículos. En estos casos, el valor del número medio de envíos por ruta es de 2,11 independientemente del tamaño del problema, que únicamente se pueden transportar recorriendo más de un arco entre delegaciones por ruta. El resto de problemas con volúmenes de envíos fijados por la Tabla 6.6 son casos intermedios a los problemas anteriores.

Tabla 6.7. Soluciones para las baterías de problema con variación uniforme de carga considerando $C=80 \text{ m}^3$

	Datos problema					Algoritmo TABU SEARCH							
	NT	hubs	Carga		ct	Coste (€)		Rutas	dist (km)	Envíos (i,j)			
			Límite inf (m^3)	Límite sup (m^3)		Coste inicial (€)	Coste TS (€)			Envíos totales	Envíos directos	Envíos hub	Envíos peddling
UNIFORME	17	4	20	40	10	49492,3	46110	81	49364,27	267	113	2	152
	17	4	0	20	10	40430	32968,7	53	36021,67	254	80	28	146
	17	4	0	80	10	50725,9	46573	81	49783,64	269	129	12	128
	17	4	0	50	10	44090,1	38265,7	65	40001,81	266	100	22	144
	17	4	10	70	10	54065	49784,8	88	53449,58	270	142	4	124
	23	4	0	30	10	58133,1	52743,8	89	55847,01	395	105	9	281
	23	4	10	20	10	61481,3	56651	91	58202,58	484	93	22	369
	23	4	30	80	10	116941	113739	212	119772	505	458	0	47
	38	6	20	40	10	135248	128245	222	137612,4	746	352	8	386
	38	6	0	20	10	107678	95823	155	103706,7	718	265	97	356
	38	6	0	80	10	145759	137459	242	145772,5	750	438	42	270
	38	6	0	50	10	131743	120373	202	129646,1	738	360	44	334
	38	6	10	70	10	147148	137566	244	147427,8	754	415	5	334
	45	6	0	30	10	186855	168389	279	182921,9	1142	442	88	612
	45	6	10	20	10	181142	168497	276	179718,4	1156	458	50	648
	66	8	20	40	10	142570	128067	227	140431,6	657	472	1	184
	66	8	0	20	10	132002	113049	188	127472,7	641	435	45	161
	66	8	0	80	10	148951	133565	239	145050	654	513	15	126
	66	8	0	50	10	141591	123434	214	136883,8	648	487	21	140
	66	8	10	70	10	152934	136636	244	149339,3	661	523	3	135
17	4	60	80	10	37617,7	34592,7	65	36581,8	139	139	0	0	
38	6	60	80	10	198599	189799	360	198573,4	758	758	0	0	
66	8	60	80	10	176806	164431	314	170377,5	662	662	0	0	

La variación que presentan los problemas en relación al número medio de envíos por ruta es debida a las probabilidades de aplicación de estrategias de envío *hub* y *peddling*. Los problemas con un volumen de carga menor tendrán una mayor probabilidad de efectuar las estrategias mencionadas, de forma que los envíos se podrán agrupar en menos rutas. Este hecho contribuiría a que el coste total de la distribución bajará significativamente en comparación a los problemas tamaño de envíos superiores.

Adicionalmente, se debe constatar que la diferencia entre el coste de la ruta inicial (algoritmo heurístico) y el coste total de la distribución encontrado al final de la aplicación del algoritmo de *Tabu Search* es superior en los problemas de carga reducida (ver Tabla 6.7). Este hecho también explica que en el caso que las cargas a transportar w_{ij}^k , $k=1, \dots, n_{ij}$ tengan valores significativamente menores a la capacidad C , el algoritmo *Tabu Search* puede explorar un mayor número de combinaciones o regiones y mejorar de forma importante la calidad de la solución.

Los resultados asociados al caso de asignación no uniforme de la carga entre los puntos se resumen en la Tabla 6.8, donde el número de envíos por ruta es superior a las generaciones de baterías anteriores pero mantiene el mismo comportamiento. Los problemas con una

distribución uniforme del valor de la carga entre $[60,80] m^3$ presentan la menor tasa de envíos por ruta, con valores de 2,3; 3,0 y 3,2 para el problema de tamaño reducido, medio y grande respectivamente.

Tabla 6.8. Soluciones para las baterías con variación no uniforme de carga considerando $C=80m^3$

		Datos problema				Algoritmo TABU SEARCH							
NT	hubs	Carga		ct	Coste (€)		Rutas	dist (km)	Envíos (i,j)				
		Límite inf (m^3)	Límite sup (m^3)		Coste inicial (€)	Coste TS (€)			Envíos totales	Envíos directos	Envíos hub	Envíos peddling	
NO UNIFORME	25	5	20	40	10	71396	65371	112	69377,95	393	225	7	161
	25	5	0	20	10	54246,8	46142,5	74	49993,7	380	147	36	197
	25	5	0	80	10	72102,8	66537	118	69942,43	389	257	18	114
	25	5	0	50	10	63829,6	57863,1	87	61682,87	390	206	24	160
	25	5	10	70	10	78198,6	74756,7	134	79229,34	397	283	2	112
	32	4	0	30	10	99813,4	90547,4	149	98056,07	694	266	40	388
	32	4	10	20	10	95768	86299	139	90085,13	732	203	26	503
	41	6	20	40	10	81462,6	72477,2	126	73505,56	563	324	4	235
	41	6	0	20	10	67737	55029,4	87	57923,52	544	260	52	232
	41	6	0	80	10	89223,5	82012,8	148	81769,52	563	425	14	124
	41	6	0	50	10	80051,3	70788,7	121	71696,74	570	321	18	231
	41	6	10	70	10	90564,1	82984	150	84234,92	572	431	0	141
	49	6	0	30	10	72031,4	58358,1	93	58470,38	597	284	40	273
	49	6	10	20	10	58897	45630,2	74	46450,5	502	220	5	277
	49	6	30	80	10	93507,5	85498,2	161	79507,87	610	562	1	47
	71	8	20	40	10	100526	80775,6	138	77226,54	733	373	9	351
	71	8	0	20	10	87031,1	59489,4	94	59548,51	724	308	52	364
	71	8	0	80	10	115141	90493,2	164	85970,51	740	524	20	196
	71	8	0	50	10	103055	75212,9	128	71944,84	727	393	40	294
	71	8	10	70	10	117174	92628,8	166	88484,41	742	532	8	202
25	5	60	80	10	94408,5	90283,5	171	93146,23	400	400	0	0	
41	6	60	80	10	109159	101734	195	98597,97	578	578	0	0	
71	8	60	80	10	135768	117618	231	107219,8	747	747	0	0	

En cambio, los problemas con una distribución uniforme en el intervalo $[0,20] m^3$ llegan a alcanzar valores de 5,1; 6,2 y 7,7 respectivamente para el mismo tipo de problema; duplicando los valores obtenidos con una asignación uniforme.

De este modo, se debe destacar que el tipo de distribución espacial de las cargas entre los puntos condiciona significativamente la productividad de las rutas de vehículos y el número medio de envíos gestionados por cada ruta.

A partir de los datos obtenidos en la Tabla 6.7. y Tabla 6.8, ha sido posible establecer una relación entre los costes totales del sistema de distribución y las variables representativas de la distribución mediante un análisis de regresión no lineal. De este modo, se han planteado las distintas formulaciones para ajustar los costes totales que se detallan a continuación, si bien el término que afecta más significativamente al coste total es el coste fijo por vehículo F .

Para calcular este coste, se parte de la evaluación del número medio de envíos directos (\bar{B}) por ruta que se detalla en la ecuación (6.7). En su expresión analítica, el numerador representa el tiempo disponible asociado a la jornada temporal de reparto y el denominador los tiempos asociados al trayecto, tiempos de carga y descarga entre dos puntos consecutivos.

$$\bar{B} = \frac{(h_{2,\max} - h_{1,\max})}{\left(\frac{\bar{d}}{v} + \bar{l}_b + \bar{u}_b\right)} \quad (6.7)$$

El número de posibilidades de inclusión (φ_b) de un envío (i,j) *peddling* o *hub* en una ruta $r \in R$ ya establecida sin incrementar las delegaciones de visita de la ruta se puede calcular en función del número de arcos (b_r) que ésta contenga. En la ecuación (6.8) se define de forma analítica la variable φ_b considerando el número de arcos (b_r) y una variable entera positiva p considerada como un contador.

$$\varphi_b(b_r) = \sum_{p=1}^{b_r-1} (b_r - p) \quad p \in \mathbb{N} \quad (6.8)$$

La variable φ_b estima las posibilidades de asignación de un envío (i,j) de forma que $S_{ij,b}^r = 0 \forall b \in B^r$, es decir que el envío (i,j) no esté servido directamente en la ruta r , tal y como muestra la Figura 6.9. Se debe constatar la relación directa entre el número de arcos de la ruta b_r y el número de envíos asignados con estrategia directa, por lo que $b_r = \bar{B}$.



Fig. 6.9. Esquema de rutas con distinto número de arcos y valor de φ_{br} asociado.

De este modo, se pretende estimar el número de rutas N_r que calcula el algoritmo TS (octava columna de la Tabla 6.7 y 6.8) a partir de una función \tilde{N}_r , determinada por regresión no lineal. Esta función \tilde{N}_r se define en la ecuación (6.9) y se compondrá de un primer término \tilde{N}_{r_0} que estimará el número de rutas si se desarrollara exclusivamente la estrategia directa

de envío y un segundo término \tilde{N}_s que determinará el número de rutas ahorradas por consolidación de mercancía mediante estrategia *peddling* o *hub*. El primer término dependerá del cociente entre el número total de envíos a_{ij}^k y φ_b según la ecuación (6.10). Para determinar la expresión de φ_b se realiza una ponderación de su valor en función del entero superior e inferior de B , tal y como se detalla en la ecuación (6.11). Nótese que $[x]^+$ y $[x]^-$ expresan respectivamente el valor entero superior e inferior a x .

$$\tilde{N}_r = \tilde{N}_{ro} - \tilde{N}_s \quad (6.9)$$

$$\tilde{N}_{ro} = \frac{\sum_i \sum_j \sum_k a_{ij}^k}{\bar{\varphi}} \quad (6.10)$$

$$\bar{\varphi} = \left([\bar{B}]^+ - \bar{B} \right) \cdot \varphi([\bar{B}]^-) + \left(\bar{B} - [\bar{B}]^- \right) \cdot \varphi([\bar{B}]^+) \quad (6.11)$$

Por su lado, el segundo término de la ecuación (6.9) depende de la relación entre el tamaño del envío y capacidad del vehículo, del número de rutas existentes y de la dimensión del problema. El término \tilde{N}_s se aproxima por medio de la ecuación (6.12), donde $\alpha_1, \gamma_1, \gamma_2$ son coeficientes a calibrar, N_T el número de delegaciones y p_c una variable representativa del fraccionamiento de la carga definida en la expresión (6.13).

$$\tilde{N}_s = \alpha_1 \tilde{N}_{ro} \frac{(p_c)^{\gamma_1}}{(N_T)^{\gamma_2}} \quad (6.12)$$

$$p_c = \left(\frac{C - \bar{w}_{ij}^k}{\bar{w}_{ij}^k} \right)^2 \quad \forall k = 1, \dots, n_{ij}; \forall (i, j) | a_{ij}^k \in A^g \quad (6.13)$$

Con todo ello, se han estimado los coeficientes de la expresión (6.12) mediante los datos derivados de las Tablas 6.7 y 6.8. Los resultados de la regresión se resumen en la Tabla 6.9. para la distribución uniforme y no uniforme de los volúmenes respectivamente.

Los resultados más significativos del análisis estadístico se pueden consultar en el Anexo A7.

Otro de los aspectos que más condiciona el coste logístico total es la distancia recorrida por las rutas de reparto, tal y como queda reflejado en las Tablas 6.7 y 6.8. En este sentido, se ha

pasado a estimar la variable distancia recorrida $D_t = \sum_{\forall r \in R} \sum_{i=1}^{br} D_{ij} S_{ij,b}^r$ por una función \tilde{D}_t estimada por regresión lineal.

Tabla 6.9. Resultados de la estimación de los parámetros de la regresión

Distribución de envíos w_{ij}	Parámetro	Coefficiente Correlación R^2	Suma de cuadrados (€^2)	
Uniforme	$\alpha_1 = 2,949$ $\gamma_1 = 0,378$ $\gamma_2 = 0,961$	0,971	Regresión	721234,919 (99,5%)
			Error	3367,081 (0,5%)
			Total	724602,000
No uniforme	$\alpha_1 = 0,034$ $\gamma_1 = 0,107$ $\gamma_2 = -0,596$	0,915	Regresión	318807,708 (99,5%)
			Error	1435,292 (0,5%)
			Total	320243,000

La formulación propuesta para la regresión se detalla en la ecuación (6.14) donde \tilde{D}_t es una función del número de rutas, del número de envíos medio por ruta, de un término l que representa el lado del cuadrado donde se inscribe la zona de servicio y un coeficiente α_2 . En el caso de la regresión, se ha estimado $l=500$ km para ser consistente con los valores adoptados en la batería de problemas

$$\tilde{D}_t = \alpha_2 N_r \cdot B \cdot l \quad (6.14)$$

Tabla 6.10. Resultados de la estimación de la distancia recorrida

Distribución de envíos w_{ij}	Parámetro	Coefficiente Correlación R^2	Suma de cuadrados	
Uniforme	$\alpha_2 = 0,43$	0,970	Regresión	43977478162,795 (96%)
			Error	1377015915,447 (4%)
			Total	45354494078,242
No uniforme	$\alpha_2 = 0,418$	0,775	Regresión	2817957244,116 (78%)
			Error	817832220,756 (22%)
			Total	3635789464,871

Se puede comprobar en la Tabla 6.10 que el nivel de ajuste es significativamente distinto en el caso de que los volúmenes de carga presenten una distribución uniforme o una distribución no uniforme. En los problemas de distribución uniforme, el nivel de ajuste es muy aceptable, mientras que en el caso de la distribución no uniforme el coeficiente de correlación es relativamente bajo.

Por otro lado, la evaluación del número de envíos consolidados en las terminales *hub* (h_r) se realiza con una función \tilde{h}_r dependiente del número de envíos totales y de la probabilidad de incluir un envío (i,j) determinado en una ruta establecida (Ecuación 6.15). Esta probabilidad vendrá afectada adicionalmente por la relación entre la capacidad y el tamaño de envíos de los vehículos, del número de rutas existentes, del número de *hubs* y del número de delegaciones totales.

$$\tilde{h}_r = \alpha_3 \left(\sum_i \sum_j \sum_k a_{ij}^k \right) N_r \frac{(\overline{\varphi_B \cdot h})^2}{N_T(N_T - 1)} (p_C)^{\gamma_3} \quad (6.15)$$

donde α_3, γ_3 son parámetros a calibrar

En este sentido, el exponente igual a 2 del número de envíos y el número de *hubs* pretende reproducir las posibilidades de consolidación en las dos rutas que determinan el envío *hub* (ruta delegación origen-*hub* y ruta *hub*-delegación destino).

La estimación de la función \tilde{h}_r se ha realizado con los datos de la Tabla 6.7 y 6.8 para la distribución de carga uniforme y no uniforme, con unos resultados obtenidos resumidos en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. Resultados de la estimación del número de envíos *hub*

Distribución de envíos w_{ij}	Parámetro	Coefficiente Correlación R ²	Suma de cuadrados	
Uniforme	$\alpha_3 = 1,91 \cdot 10^{-4}$ $\gamma_3 = 1,219$	0,713	Regresión	23912,691 (85%)
			Error	4227,309 (15%)
			Total	28140,000
No uniforme	$\alpha_3 = 6,97 \cdot 10^{-4}$ $\gamma_3 = 7,046$	0,760	Regresión	11780,749 (85%)
			Error	2459,251 (15%)
			Total	14240,000

A partir de las tres funciones estimativas de las variables del sistema de costes ($\tilde{N}_r, \tilde{D}_t, \tilde{h}_r$), se ha pasado a la cuantificación de las distintas componentes de los costes de distribución.

En relación a los costes asociados a la realización de todas las paradas de los vehículos (C_p), este valor se puede estimar mediante la función \tilde{C}_p , considerando el número total de rutas y el número medio de envíos directos por ruta (\bar{B}) según se detalla en la expresión (6.16a).

$$\tilde{C}_p = c_p \cdot \bar{B} \cdot \tilde{N}_r \quad (6.16a)$$

La evaluación de los costes de servicio de los vehículos (\tilde{C}_F), los costes kilométricos del sistema (\tilde{C}_d) y los costes de transferencia en las terminales *hub* (\tilde{C}_t) se pueden realizar a partir de las ecuaciones (6.14b), (6.14c) y (6.14d) respectivamente. En esta última ecuación, el número estimado de envíos vía *hub* se multiplica por el volumen medio de envío $(b-a)/2$, donde a y b son los límites del dominio de variación del volumen de carga entre delegaciones.

$$\tilde{C}_F = c_F \cdot \tilde{N}_r \quad (6.16b)$$

$$\tilde{C}_d = c_d \cdot \tilde{D}_t \quad (6.16c)$$

$$\tilde{C}_t = c_t \cdot \tilde{h}_r \cdot \left(\frac{b-a}{2} \right) \quad (6.16d)$$

Finalmente, la expresión global de una función estimativa de los costes de distribución de todo el sistema (\tilde{C}_T) se podrá obtener por medio de la expresión (6.16e) en las que se han sumado las distintas componentes de coste (6.14a)-(6.14d).

$$\tilde{C}_T = \tilde{C}_p + \tilde{C}_F + \tilde{C}_t + \tilde{C}_d \quad (6.16e)$$

La expresión anterior es consistente con la ecuación (3.4) desarrollada en la formulación del problema de esta tesis. Sin embargo, se debe constatar que no se han considerado los efectos de congestión y tiempo muerto en las delegaciones (número de muelles infinito y velocidades constantes). Este efecto se tratará en el capítulo 7.

La comparativa de los valores estimados de la batería de problemas con la aplicación de la formulación (6.16e) y el valor obtenido con el algoritmo TS se detallan en las Tablas 6.12 y 6.13. Se puede comprobar que aunque existe una estimación con un 22% de error para la batería uniforme, los errores máximos son inferiores al 15%. El porcentaje de error medio (en valor absoluto) para el caso de la batería de problemas uniforme es del 6%. En el caso de

la batería no uniforme el error medio cometido es del 4,8 % y el error máximo del 13%. Así mismo, se comprueba que los errores están centrados en 0 en ambas baterías de problemas.

Tabla 6.12. Resultados de la estimación de costes totales de la batería de problemas con distribución de carga uniforme

Datos problema					Algoritmo TS		Estimación	
NT	hubs	Carga		ct	Coste (€)		Coste (€)	Porcentaje error
		Límite inf (m ³)	Límite sup (m ³)		Coste inicial (€)	Coste TS (€)		
17	4	20	40	10	49492,3	46110	40297,40	-0,13
17	4	0	20	10	40430	32968,67	25658,32	-0,22
17	4	0	80	10	50725,9	46573	45328,99	-0,03
17	4	0	50	10	44090,1	38265,73	37546,13	-0,02
17	4	10	70	10	54065	49784,84	45500,10	-0,09
23	4	0	30	10	58133,1	52743,78	51351,71	-0,03
23	4	10	20	10	61481,3	56651,04	63529,84	0,12
23	4	30	80	10	116941	113738,8	103630,09	-0,09
38	6	20	40	10	135248	128245	131916,79	0,03
38	6	0	20	10	107678	95823	100546,01	0,05
38	6	0	80	10	145759	137459	143206,27	0,04
38	6	0	50	10	131743	120373,4	124784,17	0,04
38	6	10	70	10	147148	137566,1	143984,30	0,05
45	6	0	30	10	186855	168388,8	177155,89	0,05
45	6	10	20	10	181142	168497,4	179480,01	0,07
66	8	20	40	10	142570	128067	120226,31	-0,06
66	8	0	20	10	132002	113049	94410,66	-0,16
66	8	0	80	10	148951	133565	128740,73	-0,04
66	8	0	50	10	141591	123433,5	113626,78	-0,08
66	8	10	70	10	152934	136635,6	130131,95	-0,05

Tabla 6.13. Resultados de la estimación de costes totales de la batería de problemas con distribución de carga no uniforme

Datos problema					Algoritmo TS		Estimación	
NT	hubs	Carga		ct	Coste (€)		Coste (€)	Porcentaje error
		Límite inf (m ³)	Límite sup (m ³)		Coste inicial (€)	Coste TS (€)		
25	5	20	40	10	71396	65371	60711,50	-0,07
25	5	0	20	10	54246,8	46142,47	47210,31	0,02
25	5	0	80	10	72102,8	66536,95	64304,92	-0,03
25	5	0	50	10	63829,6	57863,14	57837,92	0,00
25	5	10	70	10	78198,6	74756,69	65702,62	-0,12
32	4	0	30	10	99813,4	90547,43	84037,41	-0,07
32	4	10	20	10	95768	86299,04	88978,27	0,03
41	6	20	40	10	81462,6	72477,22	75979,03	0,05
41	6	0	20	10	67737	55029,41	56885,32	0,03
41	6	0	80	10	89223,5	82012,77	82364,08	0,00
41	6	0	50	10	80051,3	70788,7	73425,17	0,04
41	6	10	70	10	90564,1	82983,98	83738,36	0,01
49	6	0	30	10	72031,4	58358,13	61944,22	0,06
49	6	10	20	10	58897	45630,21	51607,80	0,13
49	6	30	80	10	93507,5	85498,16	95798,27	0,12
71	8	20	40	10	100526	80775,59	79187,93	-0,02
71	8	0	20	10	87031,1	59489,4	56551,71	-0,05
71	8	0	80	10	115141	90493,19	88500,02	-0,02
71	8	0	50	10	103055	75212,93	73971,83	-0,02
71	8	10	70	10	117174	92628,76	88747,25	-0,04

Por otro lado, se han generado 2 baterías adicionales para poder validar la aplicabilidad de las formulaciones propuestas en problemas no utilizados para su calibración y analizar su distribución de errores. Cada batería está compuesta por 10 problemas que reproducen distintos números de delegaciones y variación del volumen de carga entre delegaciones.

La primera batería está basada en problemas con una distribución uniforme de cargas entre delegaciones con $N_T = \{15, 22, 27, 31, 35, 39, 44, 57, 61, 70\}$. La segunda batería está constituida por problemas con asignación no uniforme de los volúmenes de carga con un número de delegaciones $N_T = \{16, 23, 29, 31, 36, 40, 49, 55, 62, 69\}$. Los volúmenes de carga considerados intentan reproducir problemas tipo *LTL*, de forma que el volumen medio de envío sea notablemente inferior a la capacidad del vehículo.

Ambas baterías han sido resueltas con la aplicación de la herramienta matemática basada en el algoritmo de TS con la consideración de estrategias de envíos *peddling* detallada en el capítulo 4.5. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14. Resultados de las baterías de problemas utilizadas para validar la aplicación de las formulaciones estimativas

	Datos problema					Algoritmo TABU SEARCH								Estimación	
	NT	hubs	Carga		ct	Coste (€)		Rutas	Envíos (i,j)				Coste est. (€)	Porcentaje error	
			Límite inf (m ³)	Límite sup (m ³)		Coste inicial (€)	Coste TS (€)		Envíos totales	Envíos directos	Envíos hub	Envíos peddling			
UNIFORME	15	4	0	80	10	40186,1	38111,1	69	184	116	5	63	30000,48	-0,21	
	22	4	20	40	10	67190,1	65391,8	114	409	164	3	242	65731,71	0,01	
	27	4	0	30	10	98287,2	88777,7	144	617	240	68	309	84529,37	-0,05	
	31	6	10	80	10	126858	120138	218	531	397	5	129	103486,05	-0,14	
	35	6	0	30	10	107354	95125,6	156	676	245	55	376	100392,67	0,06	
	39	6	10	60	10	132317	125504	224	653	431	5	217	119817,81	-0,05	
	44	8	0	20	10	131099	112546	183	814	341	89	384	122173,90	0,09	
	57	8	10	40	10	235763	226429	387	1410	647	29	734	253583,51	0,12	
	61	10	0	50	10	300189	285798	486	1604	872	109	623	298885,56	0,05	
	70	10	20	40	10	290520	275783	482	1462	946	10	506	277261,81	0,01	
NO UNIFORME	16	4	0	80	10	33504,8	29528,4	49	153	117	1	35	26507,28	-0,10	
	23	4	20	40	10	67572,8	61202,3	107	367	204	2	161	56378,96	-0,08	
	29	4	0	30	10	81835,7	73319	130	582	207	48	327	72426,25	-0,01	
	31	6	10	80	10	36493,9	24448,6	50	158	128	0	30	25179,22	0,03	
	36	6	0	30	10	51957,2	45138,5	79	405	205	26	174	47521,59	0,05	
	40	6	20	60	10	90542,6	83798,6	149	485	368	3	114	71123,51	-0,15	
	49	8	0	20	10	106283	90309,7	147	903	356	118	429	95232,78	0,05	
	55	8	10	40	10	160979	144266	224	1237	448	127	662	153864,60	0,07	
	62	10	0	50	10	60361,3	45830,1	81	322	213	37	72	34853,74	-0,24	
	69	10	20	40	10	278334	257745	458	1865	861	24	980	232188,72	-0,10	

Se puede comprobar que los errores cometidos en ambas baterías se mantienen en valores aceptables como sucedía en las baterías utilizadas en la calibración de las formulaciones compactas (Tabla 6.13). Los errores medios en la batería (calculados en valor absoluto) con asignación uniforme y no uniforme son, respectivamente, del 7,6% y del 8,8%. Por otro

lado, el error máximo cometido es del 21 % en los casos de distribución uniforme y del 24% en batería no uniforme.

Estos resultados permiten aceptar las formulaciones estimativas del coste de distribución de la mercancía en las redes de muchos orígenes a muchos destinos en los rangos de costes unitarios aplicados. En este caso, se debería analizar la aplicación o modificación de las formulaciones en otros escenarios con otra tipología de vehículos de menor capacidad y otros costes unitarios.