



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

## TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

# ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE DISEÑO DE RED DE TRANSPORTE INTERMODAL DE CONTENEDORES EN ESPAÑA

AUTOR: RAFAEL CAMALLONGA EDO

TUTOR: JULIEN MAHEUT

CO-TUTOR: JAVIER ANDRÉS BELLO

CURSO ACADÉMICO 2016-2017







## Agradecimientos

A mi familia por el apoyo y la confianza depositada en mí durante todos estos años. Desde el comienzo, hasta el último día recordándome que si quería podía conseguirlo.

A la Escuela Técnica Superior De Ingenieros Industriales y todo el profesorado con el que he tenido el gran gusto de compartir aulas y conocimiento.

A mi tutor, Julien Maheut por aceptar este proyecto, querer llevarlo adelante y por la ayuda dada. Por buscar lo mejor de mí y por creer en este proyecto.

A mis compañeros y amigos, por todos esos buenos momentos vividos durante estos años. Por los ánimos dados en momentos difíciles.



## Resumen

El presente trabajo trata sobre el problema de localización de centros de transporte en la red española. En el mismo se encontrarán la introducción y descripción de los problemas de localización de centros de transporte, así como bases matemáticas para el posterior análisis y diseño. En los capítulos siguientes se implementarán diversas herramientas para dar solución a este tipo de problemas y se presentarán los resultados y conclusiones a los cuales se ha llegado.





# Índice General

## Memoria

Índice de contenido	3	
Índice de figuras	7	
Índice de tablas	9	
1	Introducción	13
1.1	Justificación	13
1.2	Objeto del proyecto	13
1.3	Estructura del proyecto	13
2	Estado del arte	15
2.1	introducción	15
2.2	Problemática en el diseño de redes de transporte intermodal	15
2.3	Bases matemáticas para el modelado y resolución de redes de transporte	22
2.4	Modelado matemático y técnicas de resolución en el diseño de redes de transporte	28
2.5	Conclusiones	33
3	Diseño de una herramienta para la creación de redes	35
3.1	introducción	35
3.2	Motivación	35
3.3	Estructura de funcionamiento	35
3.4	Procedimiento de cálculo	36
3.5	Resultados: aplicación a la red española	39
3.6	Conclusiones	45
4	Diseño de una herramienta para la localización de centros de transporte en redes	47
4.1	Introducción	47
4.2	Descripción del problema	47
4.3	Modelo Matemático De la Red De Transporte Intermodal	48
4.4	Diseño de un evaluador de soluciones para HLP	49
4.5	Conclusión	63
5	Diseño de experimentos y análisis de resultados	65
5.1	introducción	65

5.2	Parámetros a estudiar	65
5.3	Resultados y Análisis	70
5.4	Análisis general	96
5.5	Conclusión	99
6	Conclusiones Finales	101
6.1	Solución propuesta	101
6.2	Trabajo futuro	102
7	Bibliografía	105
8	Anexos	107
8.1	Código Matlab	107
8.2	Resultados de los experimentos	117

## **Presupuesto**

1	Introducción	3
2	Cuadro de precios	4
2.1	Resumen partidas de presupuesto	7

Memoria



# ÍNDICE DE CONTENIDO

---

Índice de contenido .....	3
Índice de figuras .....	7
Índice de tablas .....	9
1 Introducción .....	13
1.1 Justificación .....	13
1.2 Objeto del proyecto .....	13
1.3 Estructura del proyecto.....	13
2 Estado del arte .....	15
2.1 introducción .....	15
2.2 Problemática en el diseño de redes de transporte intermodal .....	15
2.2.1 Problemas de localización de centros de transporte .....	15
2.2.2 Características de las redes de transporte.....	16
2.2.3 Topologías de las redes de transporte.....	17
2.2.4 Terminología de las redes de transporte.....	18
2.2.5 Niveles de planificación .....	19
2.2.6 Gaps en el problema de ubicación de HUBs en redes de transporte.....	21
2.2.7 Posibles futuras líneas de investigación sobre el problema de ubicación de HUBs en redes de transporte. ....	21
2.3 Bases matemáticas para el modelado y resolución de redes de transporte.....	22
2.3.1 Introducción a la teoría de grafos.....	22
2.3.2 Algoritmo de Floyd-Warshall en teoría de grafos.....	23
2.3.3 Optimización matemática .....	24
2.3.4 Algoritmos y métodos en optimización .....	26
2.3.4.1 Métodos clásicos .....	26
2.3.4.2 Simplex.....	26
2.3.4.3 Heurísticas y metaheurísticas.....	26
2.3.5 GRASP: Procedimiento de búsqueda adaptativa aleatoria avariciosa .....	28
2.4 Modelado matemático y técnicas de resolución en el diseño de redes de transporte intermodal.....	28
2.4.1 Modelos matemáticos .....	29
2.4.2 Algoritmos en la resolución de HLP .....	31

2.5	Conclusiones.....	33
3	Diseño de una herramienta para la creación de redes.....	35
3.1	introducción .....	35
3.2	Motivación.....	35
3.3	Estructura de funcionamiento .....	35
3.4	Procedimiento de cálculo.....	36
3.4.1	Parámetros de entrada .....	36
3.4.2	Estimación del flujo.....	36
3.4.3	Coste de transporte .....	36
3.4.4	Fase 1: Concentración de nodos .....	37
3.4.5	Fase 2: Eliminación de residuos .....	37
3.4.6	Fase 3: Diseño de enlaces .....	38
3.4.7	Modificación manual .....	39
3.5	Resultados: aplicación a la red española .....	39
3.5.1	Estimación de la red.....	40
3.5.2	Modificación de parámetros.....	41
3.6	Conclusiones.....	45
4	Diseño de una herramienta para la localización de centros de transporte en redes .....	47
4.1	Introducción .....	47
4.2	Descripción del problema .....	47
4.3	Modelo Matemático De la Red De Transporte Intermodal .....	48
4.4	Diseño de un evaluador de soluciones para HLP .....	49
4.4.1	Evaluación del flujo acumulado .....	50
4.4.2	Evaluación coste de transporte .....	52
4.4.3	Diseño de un algoritmo de tipo GRASP para resolver el problema HLP con factor de descuentos variables.....	58
4.4.3.1	Parámetros de entrada y elementos de trabajo .....	58
4.4.3.2	Preprocesamiento .....	59
4.4.3.3	Construcción .....	61
4.4.3.4	Búsqueda .....	62
4.5	Conclusión .....	64
5	Diseño de experimentos y análisis de resultados.....	65

5.1	introducción .....	65
5.2	Parámetros a estudiar .....	65
5.3	Resultados y Análisis .....	70
5.3.1	Simulación 1: estudio de una red de 16 nodos aplicando diferentes descuentos .....	70
5.3.1.1	Red 16 nodos, aplicando descuento tipo 1 .....	70
5.3.1.2	Red 16 nodos, aplicando descuento tipo 2 .....	71
5.3.1.3	Red 16 nodos, aplicando descuento tipo 3 .....	72
5.3.1.4	Análisis de una red de 16 nodos.....	73
5.3.2	Simulación 2: estudio de una red de 34 nodos aplicando diferentes descuentos .....	77
5.3.2.1	Red 34 nodos, aplicando descuento tipo 1 .....	77
5.3.2.2	Red 34 nodos, aplicando descuento tipo 2 .....	78
5.3.2.3	Red 34 nodos, aplicando descuento tipo 3 .....	79
5.3.2.4	Análisis d una Red de 34 nodos .....	80
5.3.3	Simulación 3: estudio de una red de 47 nodos aplicando diferentes descuentos .....	83
5.3.3.1	Red 47 nodos, aplicando descuento tipo 1 .....	83
5.3.3.2	Red 47 nodos, aplicando descuento tipo 2 .....	84
5.3.3.3	Red 47 nodos, aplicando descuento tipo 3 .....	85
5.3.3.4	Análisis de una Red de 47 nodos .....	86
5.3.4	Simulación 4: estudio de una red de 47 nodos con nodos fijos, aplicando diferentes descuentos .....	90
5.3.4.1	Red 47 nodos con nodos fijos, aplicando descuento tipo 1 .....	90
5.3.4.2	Red 47 nodos con nodos fijos, aplicando descuento tipo 2 .....	91
5.3.4.3	Red 47 nodos con nodos fijos, aplicando descuento tipo 3 .....	92
5.3.4.4	Análisis de una Red de 47 nodos con nodos fijos.....	93
5.4	Análisis general.....	96
5.4.1	Tipo de asignación de HUBs .....	96
5.4.2	Funcionamiento del algoritmo.....	97
5.4.3	Número de nodos de la red a estudiar y tiempo de ejecución .....	98
5.5	Conclusión .....	99
6	Conclusiones Finales .....	101
6.1	Solución propuesta.....	101
6.2	Trabajo futuro .....	102

7	Bibliografía .....	105
8	Anexos.....	107
8.1	Código Matlab .....	107
8.1.1	Código base .....	107
8.1.2	GRASP.....	111
8.1.3	Cálculo de coste .....	112
8.1.4	Flujo acumulado.....	113
8.1.5	Floyd-Warshall .....	114
8.1.6	Crear red .....	114
8.1.7	Dibujar red .....	116
8.2	Resultados de los experimentos .....	117
8.2.1	Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 1 .....	117
8.2.2	Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 2 .....	118
8.2.3	Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 3 .....	119
8.2.4	Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 1 .....	120
8.2.5	Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 2 .....	121
8.2.6	Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 3 .....	122
8.2.7	Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 1 .....	123
8.2.8	Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 2 .....	124
8.2.9	Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 3 .....	125
8.2.10	Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 1 .....	126
8.2.11	Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 2 .....	127
8.2.12	Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 3 .....	128



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Características de las Redes de Transporte, fuente: Elaboración propia. ....	17
Fig. 2 Tipos de Topologías, (Woxenius, 2007).....	18
Fig. 3 Grafo, fuente: Elaboración propia.....	23
Fig. 4 Clasificación en Optimización Matemática , fuente: Elaboración propia. ....	25
Fig. 5 Clasificación de Metaheurísticas, Fuente Wikipedia.....	27
Fig. 6 Modelos (Steadieseifi et al., 2014).....	31
Fig. 7 Algoritmos de Resolución (Steadieseifi et al., 2014).....	32
Fig. 8 Diagrama herramienta crear red, fuente: Elaboración propia.....	37
Fig. 9 Crea red fase concentración, fuente: elaboración propia .....	37
Fig. 10 Crea red fase eliminación de residuos, fuente: elaboración propia .....	38
Fig. 11 Crea red fase crear enlaces 1, fuente: elaboración propia .....	38
Fig. 12 Crea red fase crear enlaces 2, fuente: elaboración propia .....	38
Fig. 13 Crea red fase crear enlaces 3, fuente: elaboración propia .....	39
Fig. 14 Crea red fase crear enlaces 4, fuente: elaboración propia .....	39
Fig. 15 Municipios españoles peninsulares, fuente: Elaboración propia. ....	40
Fig. 16 Red de 186 municipios, fuente: Elaboración propia. ....	41
Fig. 17 Red de 46 municipios, fuente: Elaboración propia. ....	41
Fig. 18 Capitales de provincia españolas, fuente: Elaboración propia. ....	42
Fig. 19 Red modificada manualmente de 10 nodos, fuente: Elaboración propia. ....	43
Fig. 20 Diagrama cálculo flujo acumulado, fuente: Elaboración propia. ....	50
Fig. 21 Red 10 nodos, fuente: Elaboración propia.....	50
Fig. 22 Diagrama Función Cálculo de Coste, fuente: Elaboración propia. ....	52
Fig. 23 Diagrama algoritmo GRASP, fuente: Elaboración propia.....	59
Fig. 24 Red 16 nodos, fuente: Elaboración propia.....	65
Fig. 25 Red 34 nodos, fuente: Elaboración propia.....	66
Fig. 26 Red 47 nodos, fuente: Elaboración propia.....	67
Fig. 27 Soluciones Red 16 Dto. 1, fuente: Elaboración propia.....	70
Fig. 28 Soluciones Red 16 Dto. 2, fuente: Elaboración propia.....	71
Fig. 29 Soluciones Red 16 Dto. 3, fuente: Elaboración propia.....	72
Fig. 30 Comparación soluciones no dominadas Red 16, fuente: Elaboración propia. ....	73
Fig. 31 Solución 1 Red16 Dto1, red carreteras y tren , fuente: Elaboración propia. ....	74
Fig. 32 Solución 1 Red16 Dto2, red carreteras y tren, fuente: Elaboración propia.).....	74
Fig. 33 Solución 2 Red16 Dtos. 1,2,3, red tren y comparativa red carreteras, fuente: Elaboración propia. ....	75
Fig. 34 Solución 3 Red16 Dtos 1,2,3, red carreteras y tren, fuente: Elaboración propia. ....	76
Fig. 35 Soluciones Red 34 Dto. 1, fuente: Elaboración propia.....	77
Fig. 36 Soluciones Red 34 Dto. 1, fuente: Elaboración propia.....	78
Fig. 37 Soluciones Red 34 Dto. 3 , fuente: Elaboración propia.....	79
Fig. 38 Comparativa fronteras de Pareto Red 34, fuente: Elaboración propia. ....	80

Fig. 39 Solución 1 Red34 Dto3, red carreteras y tren, fuente: Elaboración propia.....	81
Fig. 40 Solución 1 Red34 Dto1, red carreteras y tren, fuente: Elaboración propia.....	81
Fig. 41 Solución 1 Red16 Dto2, red carreteras y tren, fuente: Elaboración propia.....	82
Fig. 42 Comparativa soluciones con Dto. 3 , fuente: Elaboración propia.....	82
Fig. 43 Soluciones Red 47 Dto. 1, fuente: Elaboración propia.....	83
Fig. 44 Soluciones Red 47 Dto. 2 , fuente: Elaboración propia.....	84
Fig. 45 Soluciones Red 47 Dto. 3, fuente: Elaboración propia.....	85
Fig. 46 Comparación soluciones no dominadas Red 47, fuente: Elaboración propia. ....	86
Fig. 47 Comparativa asignación Dtos 1,2,3, fuente: Elaboración propia.....	87
Fig. 48 Comparativa soluciones Red 47 Dto1, fuente: Elaboración propia. ....	88
Fig. 49 Comparativa soluciones Red 47 Dto 2 , fuente: Elaboración propia. ....	88
Fig. 50 Comparativa soluciones Red 47 Dto. 3, fuente: Elaboración propia. ....	89
Fig. 51 Red de carreteras Red 47 Dto3, fuente: Elaboración propia. ....	89
Fig. 52 Soluciones Red 47 Nodos Fijos Dto. 1, fuente: Elaboración propia. ....	90
Fig. 53 Soluciones Red 47 Nodos Fijos Dto. 2, fuente: Elaboración propia. ....	91
Fig. 54 Soluciones Red 47 Nodos Fijos Dto. 3, fuente: Elaboración propia. ....	92
Fig. 55 Comparación soluciones no dominadas Red 47 Nodos Fijos, fuente: Elaboración propia....	93
Fig. 56 Soluciones no dominadas Red 47 nodos fijos Dto. 1, fuente: elaboración propia .....	94
Fig. 57 Soluciones no dominadas Red 47 nodos fijos Dto. 2 , fuente : elaboración propia .....	94
Fig. 58 Soluciones no dominadas Red 47 Dto3, fuente: elaboración propia.....	95
Fig. 59 Solución Red 47 Dto. 3, fuente: Elaboración propia. ....	96
Fig. 60 Comparativa fronteras de Pareto, fuente: Elaboración propia. ....	97
Fig. 61 Uso alfa-h, fuente: Elaboración propia. ....	98
Fig. 62 Uso alfa-n, fuente: Elaboración propia. ....	98
<i>Fig. 63 Soluciones red 46 nodos, fuente: elaboración propia .....</i>	<i>101</i>
Fig. 64 Soluciones red 47 nodos con nodos fijos, fuente: elaboración propia .....	101
Fig. 65 Red de ferrocarril española, (BCH, 2015) .....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1 Matriz de Adyacencia .....	23
Tabla 2 Matriz de Costes Básica .....	23
Tabla 3 Matriz de Costes .....	24
Tabla 4 Matriz de Acceso .....	24
Tabla 5 Lista capitales, coordenadas, flujo circulante .....	42
Tabla 6 Red creada de 10 nodos, fuente: Elaboración propia .....	43
Tabla 7 Lista nodos red simplificada, con atributos .....	43
Tabla 8 Matriz de adyacencia red simplificada .....	44
Tabla 9 Flujo .....	44
Tabla 10 Coste-Distancia de nodos adyacentes .....	44
Tabla 11 Matriz de Flujo en cientos de miles de Uds., Red 7 Nodos .....	51
Tabla 12 Matriz de Acceso .....	51
Tabla 13 Matriz de flujo acumulado en millones de Uds. ....	51
Tabla 14 Matriz de Coste Básico .....	52
Tabla 15 Matriz de Costes Ampliada .....	53
Tabla 16 Matriz de Costes Modo 2 .....	53
Tabla 17 Matriz de Coste Mínima Conjunta .....	54
Tabla 18 Matriz de Costes Mínima Total .....	54
Tabla 19 Matriz de Acceso Total .....	54
Tabla 20 Matriz de Flujo Acumulado Modo 1 y 2 .....	55
Tabla 21 Descuentos Modo 1 .....	55
Tabla 22 Descuentos Modo 2 .....	55
Tabla 23 Nueva Matriz de costes básica modo 1 .....	56
Tabla 24 Nueva Matriz de costes básica modo 2 .....	56
Tabla 25 Nueva Matriz de costes básica conjunta .....	56
Tabla 26 Nueva Matriz de costes total .....	57
Tabla 27 Nueva matriz de acceso total .....	57
Tabla 28 Matriz flujo acumulado .....	57
Tabla 29 Precio de transporte en cada enlace (miles de millones) .....	58
Tabla 30 Matriz de flujo .....	60
Tabla 31 Matriz de flujo acumulado .....	60
Tabla 32 Índice de sensibilidad HUB .....	60
Tabla 33 Índices de sensibilidad .....	61
Tabla 34 lista reducida de candidatos nodo-HUB .....	61
Tabla 35 Índice de sensibilidad nodos reducido .....	61
Tabla 36 Preferencia de asignación a hubs .....	62
Tabla 37 Asignación nodos-HUBs inicial .....	62
Tabla 38 Matriz asignación .....	63
Tabla 39 Matriz asignación con cambio .....	63

Tabla 40 Matriz de asignación final .....	63
Tabla 41 Asignación nodos-HUBs final.....	64
Tabla 42 Nodos Red 16 .....	65
Tabla 43 Nodos Red 34 .....	66
Tabla 44 Nodos Red 47 .....	67
Tabla 45 Nodos candidatos a HUB.....	68
Tabla 46 Descuentos .....	68
Tabla 47 Características de las simulaciones .....	69
Tabla 48 Nº soluciones y tiempo de ejecución .....	69
Tabla 49 Soluciones no dominadas Red 16 Dto. 1.....	70
Tabla 50 Soluciones no dominadas Red 16 Dto. 2.....	71
Tabla 51 Soluciones no dominadas Red 16 Dto. 3.....	72
Tabla 52 Comparación HUBs elegidos para los 3 Dtos .....	73
Tabla 53 Soluciones frontera de Pareto Red 34 Dto1.....	77
Tabla 54 Soluciones frontera de Pareto Red 34 Dto2.....	78
Tabla 55 Soluciones frontera de Pareto Red 34 Dto3.....	79
Tabla 56 Asignación de Hubs soluciones Red 34 .....	80
Tabla 57 Soluciones frontera de Pareto Red 47 Dto. 1.....	83
Tabla 58 Soluciones frontera de Pareto Red 47 Dto2.....	84
Tabla 59 Soluciones frontera de Pareto Red 47 Dto3.....	85
Tabla 60 Soluciones frontera de Pareto red 47 .....	86
Tabla 61 Soluciones frontera de Pareto Red 47 nodos fijos Dto1 .....	90
Tabla 62 Soluciones frontera de Pareto Red 47 nodos fijos Dto2 .....	91
Tabla 63 Soluciones frontera de Pareto Red 47 nodos fijos Dto3 .....	92
Tabla 64 Soluciones frontera de Pareto red 47 con nodos fijos.....	93
Tabla 65 Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 1.....	117
Tabla 66 Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 2.....	118
Tabla 67 Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 3.....	119
Tabla 68 Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 1.....	120
Tabla 69 Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 2.....	121
Tabla 70 Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 3.....	122
Tabla 71 Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 1.....	123
Tabla 72 Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 2.....	124
Tabla 73 Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 3.....	125
Tabla 74 Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 1 .....	126
Tabla 75 Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 2 .....	127
Tabla 76 Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 3 .....	128





# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto tiene como finalidad la realización del trabajo final de master de Rafael Camallonga Edo, el cual permitirá la obtención del título de Master Universitario en Ingeniería Industrial. El resultado del mismo pretende ser una demostración de las capacidades del alumno a la hora de resolver problemas de ingeniería, así como mostrar otras capacidades como la creatividad y capacidad de aprendizaje, necesarias en la profesión de ingeniero.

## 1.2 OBJETO DEL PROYECTO

El objetivo principal de proyecto es dar solución al problema de localización de centros de transporte o "HLP". Para ello se diseñará una herramienta de cálculo, la cual permitirá obtener soluciones a la localización de centros de transporte en redes de transporte de contenedores.

Las especificaciones básicas del proyecto serán los datos referidos a la red de transporte de España, como la red de carreteras, las diversas localidades integrantes de la red y los flujos de mercancías entre ellas.

Para la realización del proyecto se utilizará el software de cálculo Matlab, con el que se realizarán todos los cálculos y se obtendrán las diversas soluciones. Para preparar los datos se utilizará el software Microsoft Excel y en la redacción del mismo Microsoft Word.

## 1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

La estructura del proyecto consta de un primer capítulo donde se expondrá el estado del arte, haciendo un repaso a los diversos trabajos realizados hasta la fecha. También se incluirán las diversas consideraciones y conocimientos que se han de tener en cuenta antes de abordar el estudio de este tipo de problemas. En los dos siguientes capítulos se presentarán las herramientas que se han diseñado para dar solución al problema de localización de centros de transporte. La primera consiste en la herramienta de creación de redes, la cual permite modificar y preparar los datos obtenidos para su posterior estudio. La segunda herramienta es el núcleo del trabajo, donde se diseñan las soluciones al problema de localización de centros de transporte. Posteriormente se presentarán los resultados obtenidos con estas herramientas y se realizará un análisis de los mismos, proponiendo una solución para la red de transporte española. Por último, se presentará la bibliografía utilizada y el código que se ha diseñado.





## 2 ESTADO DEL ARTE

---

### 2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende introducir y explicar el problema y las características referentes al problema de localización de centros de transporte, las bases matemáticas necesarias para su estudio y los diferentes procedimientos y técnicas utilizadas en otros trabajos para la resolución de este tipo de problemas.

En la descripción sobre la problemática en el diseño de redes de transporte se van a estudiar los diferentes niveles de planificación, la terminología empleada en los modelos, las diferentes características de los modelos ya diseñados, los diferentes vacíos existentes en los modelos y el trabajo futuro propuesto en la bibliografía.

Las bases matemáticas necesarias se establecen en el marco de la optimización matemática y más concretamente en el ámbito de la optimización no lineal con la utilización de metaheurísticas. La otra rama de las matemáticas utilizada es la teoría de grafos dado que, en este proyecto, es la base fundamental a la hora de trabajar.

Para finalizar el capítulo se presenta una recopilación de trabajos previos y las diversas técnicas matemáticas utilizadas en su resolución.

### 2.2 PROBLEMÁTICA EN EL DISEÑO DE REDES DE TRANSPORTE INTERMODAL

En este punto se va a describir la problemática referente al diseño de una red de transporte intermodal para la resolución del problema de asignación de centros de transporte.

#### 2.2.1 Problemas de localización de centros de transporte

La estructura básica de una red de transporte consta de una serie de localidades o puntos (nodos) desde donde salen o entran mercancías. Estos nodos están conectados por una red de transporte que puede usar diferentes tipos de transportes o modos, como por ejemplo carretera, tren o avión. La solución del problema de localización de centros de transporte consiste en asignar a varios de los nodos existentes en la red, características especiales. Estos nodos especiales denominados centros de transporte o HUBs estarán conectados entre sí por un modo de transporte especial (tren), además de seguir conectados al resto de los nodos por el modo de transporte básico (carretera). La utilización de otro tipo de transporte, el cual es más barato, hará que el transporte que utilice este modo sea mucho más barato que por el modo básico. Por ello, la problemática en el diseño de redes de transporte se basa en determinar qué nodos deben adoptar estas características especiales para que el coste total de transportar mercancías en la red de transporte sea el mínimo posible. Como elemento añadido, el resto de los nodos deben de estar asignados a un centro de transporte, de modo que en la ruta transporte existente entre ellos exista una preferencia sobre el resto.

## 2.2.2 Características de las redes de transporte

Los diferentes modelos propuestos en la bibliografía se modelan utilizando una serie de características, las cuales dan al modelo una mayor o menor relación con la realidad o con los objetivos del problema a modelar. Según (Farahani, Hekmatfar, Arabani, & Nikbakhsh, 2013), las características estudiadas en los diferentes modelos son:

### *Dominio de resolución*

Determina qué nodos son candidatos a HUB:

- Red: todos los nodos son candidatos a ser centros de transporte
- Discreto: sólo algunos nodos con determinadas características son candidatos a ser centros de transporte
- Continuo: los nodos candidatos a HUB pueden variar a lo largo del tiempo.

### *Criterio de optimización*

El óptimo de nuestra función objetivo

- Mini-Max: disminuir el máximo coste de transporte en todos los nodos
- Mini-Suma: disminuir el coste total, incluyendo el coste de establecer centros de transporte y la asignación de nodos a éstos.

### *Número de HUBs del modelo*

- Uno o Múltiples HUBs

### *Forma de determinar el número de centros de transporte*

- Variable del problema: el propio modelo determina el número óptimo de centros para conseguir el objetivo deseado
- Predeterminada: el número de centros es determinado externamente por el diseñador.

### *Capacidad de los HUBs*

Que cantidad de mercancías pueden procesar los HUBs

- Ilimitada o limitada

### *Coste de establecer HUBs*

- Sin coste, Coste fijo y Coste variable

### *Asignación de nodos a HUBs*

Cuántos HUBs pueden ser asignados a un nodo

- Única: cada nodo sólo puede ser servido por un único HUB
- Múltiple: cada nodo puede ser servido por varios HUBs

### *Coste de conexión entre NODOS (alfa)*

Este parámetro se refiere al coste del desplazamiento en función de modo de transporte utilizado y del tipo de vía utilizada, se pueden distinguir:

- Sin coste: No se tienen en cuenta las características de la vía ni en modo
- Coste fijo: el modo de transporte, las características de la vía y el flujo de carga son indiferentes para determinar el coste de transporte
- Coste variable: existe un parámetro “alfa” que es función de las características de la vía, el modo, y el flujo de carga y mediante el cual el coste de transporte puede variar.

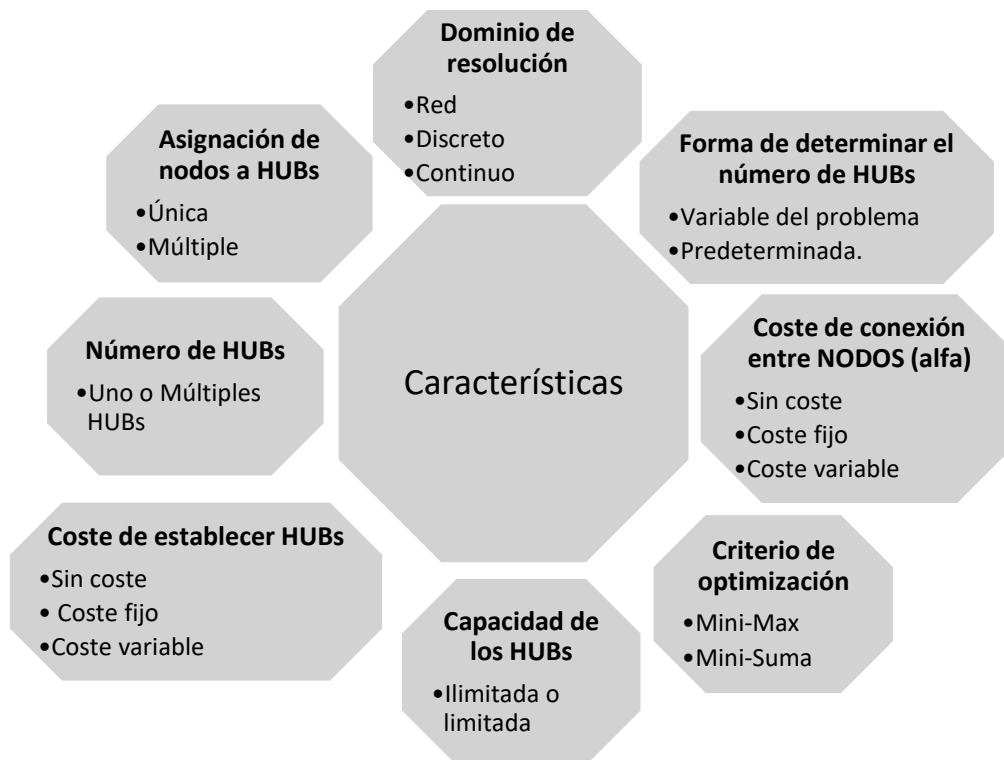


Fig. 1 Características de las Redes de Transporte, fuente: Elaboración propia.

### 2.2.3 Topologías de las redes de transporte

Uno de los puntos clave para definir los problemas a nivel estratégico es la topología de la red, entre las que se pueden distinguir (Woxenius, 2007):

#### *Transporte directo*

El transporte se hace directamente entre nodos, como en una red de carreteras mediante camión.

#### *Corredor*

Para realizar el transporte se recurre a un camino el cual aglutina todo el tránsito. Usado en canales fluviales.

#### *Centro-radio*

Para realizar un transporte entre nodos la mercancía ha de pasar por un nodo que lo vuelve a distribuir.

### Centros conectados

La mercancía pasa del nodo origen a otro nodo intermedio, el cual conecta de forma más barata con otro intermedio, este conecta finalmente con el nodo destino.

### Rutas estáticas

Se sigue el mismo recorrido siempre, la mercancía debe recorrer un trayecto preestablecido para llegar de un sitio a otro.

### Rutas dinámicas

La carga ha de adaptarse a la ruta marcada, pero ésta varía en función de las necesidades de la red.

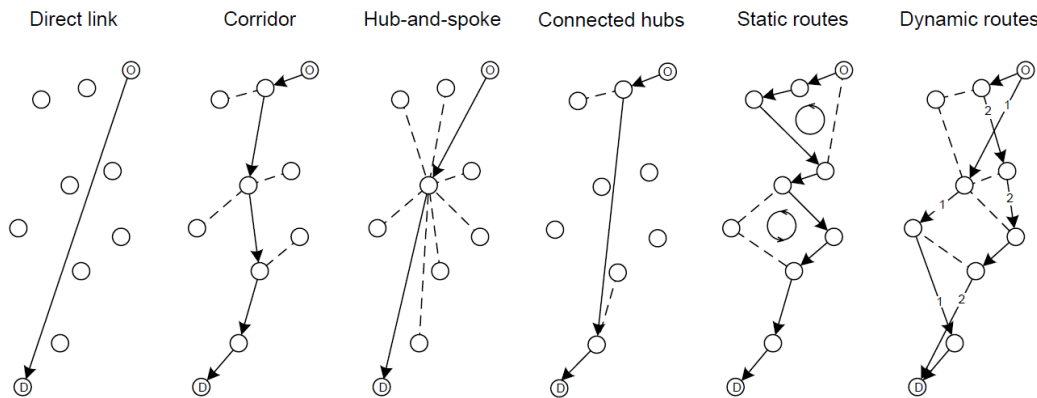


Fig. 2 Tipos de Topologías, (Woxenius, 2007)

## 2.2.4 Terminología de las redes de transporte

Según (Steadieseifi, Dellaert, Nuijten, Van Woensel, & Raoufi, 2014) en el estudio de redes de transporte se han utilizado diferentes terminologías para definir los tipos de problemas en los problemas de localización de HUBs:

### Multimodal

El sistema de transporte multimodal se caracteriza por tener al menos dos modos diferentes de transporte, con unidades de transporte que pueden ser variables en el recorrido de la carga (contenedor, caja...). Siendo modelos donde se estudia el transporte de larga distancia.

### Intermodal

Las redes de transporte intermodal se consideran un tipo especial de redes multimodales, donde la unidad de transporte utilizada no varía en todo el recorrido de la mercancía. Esto permite implementar modelos, donde al haber centros con capacidad de albergar varios modos de transporte, se utilice la ventaja de la economía de escala.

### Co-modal

El sistema de transporte Co-modal se centra en el uso eficiente de los diferentes modos de transporte, diferenciándose del sistema multimodo en dos aspectos: a) el sistema co-modal es utilizado por diversos transportistas y b) los modos de transporte son utilizados para maximizar los beneficios de todos los modos.

### *Sincromodal*

El sistema sincromodal se caracteriza por involucrar una estructura eficiente y sincronizada entre los diferentes modos de transporte, seleccionando en cada caso el modo más eficiente. Para ello se basa en las circunstancias y requerimientos de cada transportista.

### 2.2.5 Niveles de planificación

En el diseño de redes de transporte se pueden distinguir diversos tipos de niveles de planificación en función de los objetivos propuestos y el periodo de diseño estudiado (Steadieseifi et al., 2014) :

#### *Estratégico*

Los problemas de planificación estratégica están relacionados con las inversiones en infraestructuras y sobre cómo maximizar el uso de éstas en el transporte. Se supone que la carga en lugar del envío directo, la carga de bajo volumen se traslada a un HUB y se envía en flujos más grandes, transportados por servicios multimodales de alta frecuencia y alta capacidad. Estos servicios tienen precios más bajos, expresados por factores de descuento por unidad de carga ( $\alpha$ ), en comparación con otros enlaces.

El nivel de planificación estratégica se centra en la resolución de los denominados problemas de localización de centros de transporte, donde la topología preferida es la centro-radio. Este problema se puede modelar como *problema de media de centros* o como *problema del centro de transformación central*. En el *problema de media de centros* el objetivo es disminuir el coste de transporte total, mientras que en el *problema del centro de transformación central* el objetivo es minimizar la distancia total de transporte entre nodos. Otra forma de abordar el problema sería como *problema de cobertura de centros*, donde el objetivo sería maximizar los nodos a servir por cada HUB.

#### *Táctico*

En el nivel de planeamiento táctico se pretende optimizar el uso de las infraestructuras ya existentes, eligiendo el modo de transporte y la asignación nodo-HUB en base a la capacidad, los itinerarios y frecuencias de envío. Todo ello influenciado por el coste de uso de las infraestructuras, la estructura de la red y los requisitos del consumidor. Para modelar este tipo de problemas se pueden distinguir dos tipos de modelos *Planificación del flujo en red (Network Flow Planning o NFP)* y *Diseño de red de servicio (Service Network Design o SND)*.

En la *Planificación del flujo en red (NFP)* se planifica el movimiento de las mercancías a través de la red de transporte en función de las órdenes de transporte recibidas. Por otro lado, el *Diseño de red de servicio (SND)* planifica el movimiento de las mercancías eligiendo los servicios de transporte y

los modos más eficientes. El tipo SND se pueden estudiar de forma estática o dinámica, ambas formulaciones planifican la frecuencia del servicio, la asignación de capacidad, la planificación del equipo y el encaminamiento y flujo de mercancías. La diferencia radica en el horizonte temporal siendo en la forma dinámica donde alguna característica del modelo podrá variar con el tiempo.

Los problemas SND son modelados como problemas de CMND (Capacity-Cost Capacitated Multicom- munity Network Design). La dimensión temporal en los problemas CMND se modela mediante una serie de redes superpuestas, donde cada una representa un espacio temporal diferente.

Los problemas de SND dinámicos tienen una dimensión de tiempo y en la formulación CMND lo que lo convierte en un modelo discreto multi-período. Por lo tanto, el problema SND se asigna tanto en el tiempo como en el espacio, y cada nodo en la nueva red representa un terminal en un período de tiempo. Esta red espacio-temporal tiene el potencial de acomodar muchas propiedades de la vida real de los problemas SND

### *Operacional*

En la problemática de nivel operacional se resuelve a tiempo real la mejor elección de servicios, modos de transporte, itinerarios y asignación de recursos ajustados a la demanda. Por tratarse un problema en tiempo real debe tratar con la dinámica del sistema y con la estabilidad del mismo.

En el nivel operacional se ha de lidiar con diversas perturbaciones como accidentes, desastres naturales, averías en el transporte; todo ésto ha de formularse teniendo en cuenta la variación de estos aspectos con el tiempo, los cuales tienen un comportamiento no determinista, así como estimaciones a futuro del mismo. Con todo ello se debe obtener el objetivo fundamental, la disminución de los costes de transporte, así como el aumento de la robustez del sistema.

Los problemas a nivel operacional se pueden agrupar en dos grandes grupos: gestión de recursos y replanificación de itinerarios. Los problemas de replanificación de itinerarios buscan la optimización en tiempo real de horarios, rutas modales y respuesta relevante a las perturbaciones operacionales. Los problemas de gestión de recursos se ocupan de la distribución de todos los recursos en la red: posicionamiento, reposicionamiento, almacenamiento y asignación de transporte a los pedidos de los clientes. Son problemas sobre cómo y cuándo utilizar óptimamente los limitados recursos disponibles. Algunos ejemplos de estos recursos son los transportes, equipos auxiliares, elementos para el transporte, personal, combustible y energía. Una peculiaridad a tener en cuenta en este tipo de problemas es el reposicionamiento de los elementos de transporte una vez utilizados, dado que una vez cumplida la entrega el elemento se encuentra en una posición donde no se necesita y puede que esté inoperativo durante un periodo de tiempo. El reposicionamiento de la unidad de carga vacía y los problemas de gestión de la flota son variantes más específicas de los problemas de gestión de recursos, donde el objetivo es minimizar el transporte vacío más los costes de almacenamiento y los costes de existencias.

## 2.2.6 Gaps en el problema de ubicación de HUBs en redes de transporte

Es este apartado se van a describir distintos temas y situaciones que no se han tratado en los estudios previos sobre localización de HUBs (Farahani et al., 2013):

### *Bienestar de pasajero*

Tema relacionado con el transporte de pasajeros dada la importancia de la carga (las personas piensan y sienten). En el transporte de mercancías se produce un efecto de aglomeración cuando un HUB es instalado, este efecto puede ser determinante cuando se transportan personas, mermando su bienestar y confort.

### *Variación del factor de descuento (alfa)*

En los problemas de localización HUBs se busca minimizar el coste total de transporte, para ello se asignan factores de descuento a las líneas entre los diferentes HUBs. Sin embargo, no se ha estudiado la influencia que podría tener el asignar dichos valores entre los nodos y los HUBs, ya que podría darse el caso de un mayor flujo de mercancías entre una línea nodo-HUB que entre una línea HUB-HUB.

### *Maximizar el mercado objetivo*

Este criterio es usado por aerolíneas y empresas cuya actividad requiera tener una amplia zona de actuación. Típicamente se formulan los problemas para maximizar el beneficio o minimizar el coste, pero puede que esto no sea el principal objetivo de muchos sectores, entrando en conflicto con este criterio.

### *Considerar la asignación dentro de un entorno de competitividad*

En un entorno empresarial la elección de un puerto o HUB de referencia se basa en las ventajas competitivas que esta elección puede llevar respecto a la competencia. Este criterio engloba otros niveles de decisión, a nivel táctico y operativo, donde el precio y otros aspectos se han de considerar en un espacio de tiempo real.

## 2.2.7 Posibles futuras líneas de investigación sobre el problema de ubicación de HUBs en redes de transporte.

Como trabajo futuro en el modelado de redes de transporte se han propuesto los siguientes temas:

### *Desastres naturales*

Se puede modelar un problema para evaluar la robustez de la red ante la interrupción de una ruta o HUB (Kim & O'Kelly, 2009).

### *Impacto ambiental*

El transporte de ciertas cargas puede acarrear un impacto ambiental (contaminación) y social. Por ello el estudio de este aspecto pretende cuantificar el impacto del transporte de ciertas cargas.

### *Asignación dinámica*

En un entorno real, donde las áreas económicas pueden cambiar y modificarse los patrones en los flujos de carga, los problemas de localización de HUBs los cuales están definidos en un espacio temporal estático, no contemplan la realidad a largo plazo. Por ello un estudio dinámico sobre previsiones, puede dar como resultado una asignación de HUBs más acorde con la realidad a largo plazo del problema.

### *Aranceles e impuestos*

Teniendo en cuenta un escenario global, los impuestos y tasas entre los diversos países, juegan un papel importante en el tráfico de mercancías.

### *Relación multimodal con coste de cambio de modo*

En muchos modelos propuestos se consideran parámetros inherentes al manejo de la carga de forma fija. La realidad es que al tener que cambiar de modo de transporte se incurren en gastos y desviaciones en el tiempo de envío.

### *Variación de los costes de envío en función del tiempo y el flujo de carga*

Como es lógico pensar si una línea recibe más flujo de carga la eficiencia de la misma y en consecuencia los costes asociados a ella disminuirán. Estos costes también pueden cambiar por factores propios del transportista, pudiendo variar a lo largo de los periodos.

## 2.3 BASES MATEMÁTICAS PARA EL MODELADO Y RESOLUCIÓN DE REDES DE TRANSPORTE

### 2.3.1 Introducción a la teoría de grafos

La teoría de grafos es una rama de las matemáticas perteneciente a la matemática discreta, la cual estudia las propiedades de los grafos. Su mayor aplicación se centra en el estudio y optimización de redes, lo que se conoce como análisis de redes con gran aplicación en el campo de la informática y las telecomunicaciones.

Un grafo (Fig. 3) es un conjunto ordenado de vértices (nodos) y aristas (enlaces). Los nodos del grafo ocuparán una determinada posición en el espacio, aunque no es determinante para el cálculo en grafos. La información relevante será determinada por las matrices referentes a los enlaces. Los enlaces se pueden representar mediante una matriz, llamada matriz de adyacencia (Tabla 1), la cual proporciona información sobre entre qué nodos existe un enlace directo. Otra matriz que proporciona información relevante y similar a la de adyacencia es la matriz de coste básica (Tabla 2), donde se indica el coste de ir entre los nodos adyacentes.



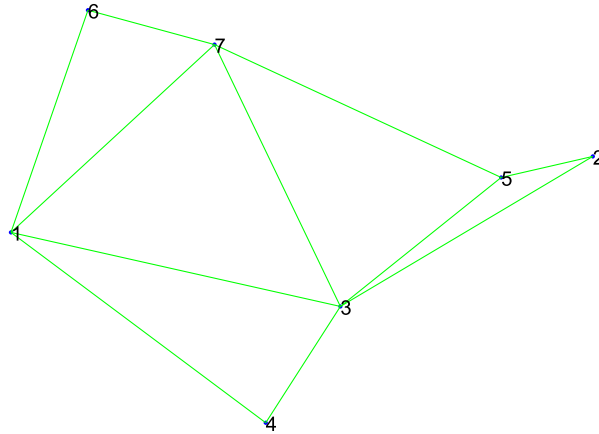


Fig. 3 Grafo, fuente: Elaboración propia.

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	1	1	0	1	1
2	0	0	1	0	1	0	0
3	1	1	0	1	1	0	1
4	1	0	1	0	0	0	0
5	0	1	1	0	0	0	1
6	1	0	0	0	0	0	1
7	1	0	1	0	1	1	0

Tabla 1 Matriz de Adyacencia

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	384	393	0	327	351
2	0	0	354	0	107	0	0
3	384	354	0	185	257	0	397
4	393	0	185	0	0	0	0
5	0	107	257	0	0	0	372
6	327	0	0	0	0	0	150
7	351	0	397	0	372	150	0

Tabla 2 Matriz de Costes Básica

Con esta información básica se pueden realizar diversos cálculos, aunque el más útil para el objetivo del trabajo es determinar el coste y el camino óptimo para llegar de un nodo a otro. Esta información se puede obtener mediante diversos algoritmos como el algoritmo de Dijkstra, el cual proporciona esta información entre dos nodos o el algoritmo de Floyd-Warshall, el cual proporciona esta información, pero para todos los nodos.

### 2.3.2 Algoritmo de Floyd-Warshall en teoría de grafos

Debido al propio funcionamiento de la herramienta de resolución, el algoritmo de Floyd-Warshall (Roy, 1959) se adaptaba mejor y presentaba menor dificultad para la implementación en la herramienta. Esta es la razón de su elección en detrimento de otros algoritmos con los cuales se obtienen los mismos resultados.

El algoritmo de Floyd-Warshall proporciona dos matrices a partir de la matriz de costes básica; estas matrices son la matriz de costes ampliada y la matriz de acceso. La matriz de costes ampliada (a partir de ahora matriz de costes) indica, no sólo el coste de ir entre los nodos adyacentes como la matriz de costes básica, sino el coste de ir entre cualquier nodo del grafo siendo éste el mínimo posible. La matriz de acceso proporciona información sobre el camino mínimo entre todos los nodos del grafo, coincidiendo el recorrido con la suma de los costes de realizar ese recorrido de la matriz de costes.

	1	2	3	4	5	6	7
1	0,00	737,45	383,58	392,88	640,29	326,85	350,66
2	737,45	0,00	353,87	538,87	106,89	629,07	479,19
3	383,58	353,87	0,00	185,00	256,71	547,24	397,36
4	392,88	538,87	185,00	0,00	441,71	719,73	582,36
5	640,29	106,89	256,71	441,71	0,00	522,18	372,29
6	326,85	629,07	547,24	719,73	522,18	0,00	149,88
7	350,66	479,19	397,36	582,36	372,29	149,88	0,00

Tabla 3 Matriz de Costes

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	3	1	1	3	1	1
2	3	2	2	3	2	7	5
3	3	3	3	3	3	7	3
4	4	3	4	4	3	1	3
5	3	5	5	3	5	7	5
6	6	5	7	1	7	6	6
7	7	5	7	3	7	7	7

Tabla 4 Matriz de Acceso

### 2.3.3 Optimización matemática

La optimización matemática y en relación la programación matemática e investigación de operaciones, es una rama de las matemáticas que pretende proporcionar una solución a un determinado problema de manera que se minimice o maximice el valor de la denominada función objetivo, la cual es objeto de estudio.

Los problemas obedecen a una estructura donde se determina la función que se quiere optimizar maximizando o minimizando su valor. Posteriormente el problema puede tener unas restricciones las cuales acoten las soluciones posibles de dicha función objetivo. Esta función objetivo y las posibles restricciones del problema tienen unas propiedades las cuales se pueden clasificar en (Fig. 4):

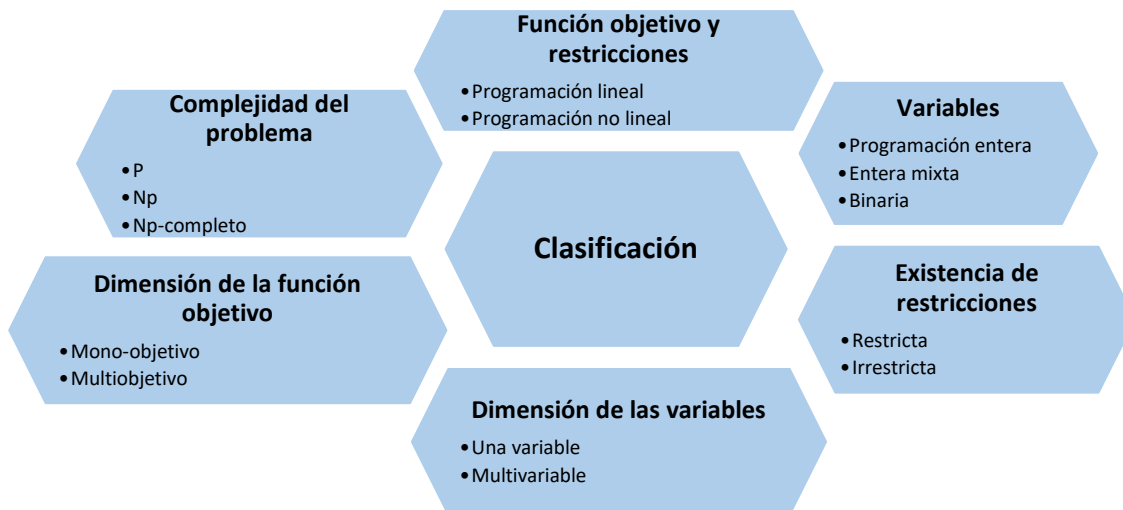


Fig. 4 Clasificación en Optimización Matemática , fuente: Elaboración propia.

*Según función objetivo y restricciones*

Programación lineal: la función objetivo es lineal, incluidas todas sus restricciones.

Programación no lineal: la función objetivo o las restricciones son no lineales.

*Según las variables*

Programación entera: los valores resultado al optimizar la función objetivo deben ser valores enteros.

Binaria: el resultado del problema debe contener valores cuyo valor sea 0 o 1.

*Según la existencia de restricciones*

Dura: las restricciones impuestas son inviolables.

Blanda: dependiendo de otras condiciones se pueden no cumplir las restricciones.

*Dimensión de las variables*

Una variable: la función objetivo está en función de una sola variable.

Multivariable: la función objetivo está en función de varias variables.

*Según la dimensión de la función objetivo*

Mono-objetivo: sólo se pretende alcanzar el máximo o mínimo sobre una variable.

Multiobjetivo: hay que elegir entre varias variables para optimizar.

*Según la complejidad del problema*

La complejidad en la resolución de un problema es estudiada por la teoría de la computación y más específicamente por la teoría de la complejidad computacional. Esta teoría cuantifica que cantidad

de recursos son necesarios por una computadora para resolver un problema (tiempo y memoria); determina los límites de lo que se puede resolver con una computadora. En relación con esta teoría está el análisis de algoritmos, el cual determina qué cantidad de recursos necesita un algoritmo para resolver un problema.

Mediante esta teoría se pueden clasificar los diferentes problemas según el tiempo de resolución requerido. Se entiende por tiempo de resolución, la función que representaría el tiempo total necesario para la resolución respecto de la cantidad de datos del problema. Ello conduce a dos categorías principales, la P donde el tiempo de resolución está definido por una función polinómica y la clase NP donde el tiempo de resolución no sigue una función polinómica. Esta consideración hace que muchos problemas NP no puedan resolverse en un tiempo razonable aunque, si los datos de entrada de la clase P son muy extensos, también se pueden tener tiempos de resolución inabordables.

### 2.3.4 Algoritmos y métodos en optimización

#### 2.3.4.1 *Métodos clásicos*

Cuando se refiere a “métodos clásicos” se está indicando procedimientos de cálculo que no son pertenecientes a la programación matemática e investigación de operaciones. Estos métodos se basan en el cálculo de la derivada de una función, doble derivada, matriz jacobiana, cálculo del gradiente, matriz Hessiana entre otros. Son operaciones relacionadas con la rama del cálculo matemático.

#### 2.3.4.2 *Simplex*

El algoritmo simplex es ampliamente utilizado en el campo de la programación lineal, proporcionando la solución exacta al problema de optimización. Desarrollado por el matemático George Dantzig en 1947

#### 2.3.4.3 *Heurísticas y metaheurísticas*

Las heurísticas son procedimientos de búsqueda de soluciones basados en algún tipo de fórmula matemática, suelen estar basadas en el sentido común para la búsqueda de algún parámetro o solución. Por ejemplo, una relación entre el valor y el volumen de objetos o valor entre tiempo, atributos que dan información sobre alguna característica de los elementos del problema a estudiar.

Las metaheurísticas son procedimientos que se basan en unas reglas con unos determinados criterios para encontrar soluciones. Utilizan heurísticas junto con los procedimientos propios de la metaheurística aplicada, que están basados en algún proceso natural o artificial, para encontrar soluciones. Estas metaheurísticas priorizan encontrar una buena solución en un tiempo de ejecución menor, aunque no se garantice la optimalidad de las soluciones, como los métodos exactos, en problemas que admiten estas formas de resolución. La característica más destacable de las metaheurísticas, a parte del procedimiento que sigue cada una, es la aleatoriedad con la que generan soluciones, no siendo un proceso que arroje siempre los mismos resultados. Esta aleatoriedad permite estudiar de forma más amplia la región de las diversas soluciones para así tener la esperanza de encontrar una buena solución con tiempos de cálculo finito.

La clasificación más importante de las metaheurísticas es en base a su forma de construir soluciones, donde podemos encontrar las basadas en una población o basadas en trayectorias. Las basadas en una población, como resumen general, establecen unas soluciones iniciales, las cuales se van modificando y estableciendo relaciones entre ellas para así conseguir llegar al óptimo del problema. Las metaheurísticas basadas en trayectorias crean soluciones a partir de “cero” en cada iteración, no modifican soluciones anteriores como las poblacionales, aunque pueden construirla siguiendo reglas basadas en anteriores soluciones.

La creación de estas soluciones puede basarse en diversas reglas que se ejecutan durante el algoritmo. Las diversas reglas en las que se basan los procedimientos de las metaheurísticas pueden ser: inspiradas en algún proceso natural, algoritmos que tienen en cuenta el procedimiento anteriormente seguido o con variación de la función objetivo si se dan determinadas condiciones, entre otras formas de actuar. Como resumen donde aparecen diversas metaheurísticas respecto a varias de sus características se presenta la Fig. 5:

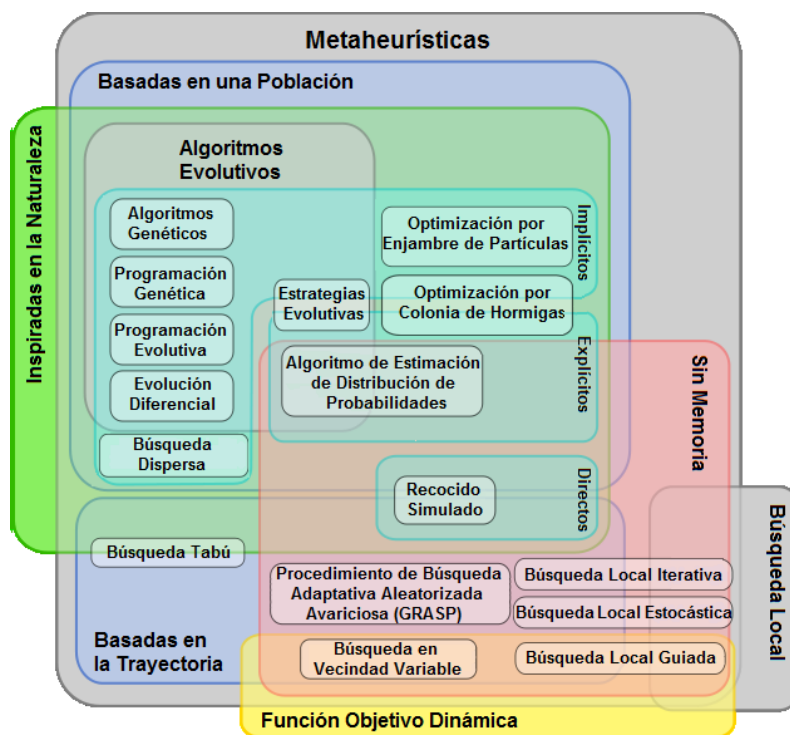


Fig. 5 Clasificación de Metaheurísticas, Fuente

[https://es.wikipedia.org/wiki/Metaheur%C3%ADstica#/media/File:Metaheur%C3%ADsticas\\_clasificaci%C3%B3n.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Metaheur%C3%ADstica#/media/File:Metaheur%C3%ADsticas_clasificaci%C3%B3n.png)

Entre las metaheurísticas destacan:

- Algoritmos genéticos: basados en una población inicial, van variando dicha población hasta que se detienen las iteraciones, en ese momento se elige la mejor solución.
- Recocido simulado: se basa en el proceso de templado del metal.
- Enjambre de partículas (PSO): basado en el comportamiento de las manadas o bandadas de animales.
- Tabú: metaheurística basada en trayectorias, la cual tiene en cuenta el historial de soluciones creado anteriormente por el algoritmo para mejorar la creación de soluciones futuras.

### 2.3.5 GRASP: Procedimiento de búsqueda adaptativa aleatoria avariciosa

La metaheurística GRASP es dentro del total de las metaheurísticas una de las más sencillas de utilizar e implementar, en comparación con otras como Tabú o Algoritmos Genéticos. Su acrónimo (del inglés), describe las características de este procedimiento, búsqueda adaptativa aleatoria avariciosa. Adaptativa porque tiene en cuenta las características de cada problema, aleatoria ya que las soluciones se basan en base a una elección aleatoria y avariciosa por el procedimiento de búsqueda final el cual estudia múltiples alternativas.

GRASP es una metaheurística basada en trayectorias y se basa en una serie de pasos los cuales permiten obtener una solución por cada iteración del procedimiento. Estos pasos son: preprocesamiento, construcción y búsqueda.

#### *Preprocesamiento*

La fase de preprocesamiento se encarga de preparar los datos del problema para su elección en la creación de la solución. Esta preparación consiste en establecer un índice de sensibilidad, el cual clasifique cada elemento o combinación de elementos en función de alguna relación.

#### *Construcción*

En la fase de construcción se han de seleccionar varios de esos elementos para la construcción de una solución. Estos elementos se seleccionan respecto del índice de sensibilidad, seleccionando los que superen un cierto umbral el cual tendrá un valor que se denomina “alfa”. Los elementos seleccionados pasarán a formar parte de lo que se denominará “lista reducida de candidatos”.

A partir de la lista reducida de candidatos y mediante aleatoriedad se seleccionarán varios de esos elementos para conformar la solución parcial.

#### *Búsqueda*

El último paso en la creación de la solución será buscar entre todos los elementos si la sustitución o variación de alguno de ellos mejora el resultado. A este paso se le suele denominar búsqueda local, dado que intenta encontrar un óptimo cercano a la solución dada en la fase de construcción.

## 2.4 MODELADO MATEMÁTICO Y TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN EN EL DISEÑO DE REDES DE TRANSPORTE INTERMODAL

En este apartado se pretende mostrar el modelo matemático y las técnicas para la resolución de los diferentes tipos de problemas de localización de centros de transporte, descritos en la bibliografía.

El ámbito de estudio de las redes de transporte puede tener múltiples objetivos y formas de resolución. Sin embargo, siguiendo el objetivo final de diseñar una red de transporte y la localización de los HUBs, los modelos y algoritmos que se van a tratar corresponden con un nivel de planificación estratégica. Por tanto, los modelos se van a centrar en los denominados problemas de localización de HUBs o HLP, obviando modelos de planificación táctica u operativa.

El estudio de los problemas HLP se fundamenta en una base matemática compuesta principalmente por la optimización matemática o programación matemática, la teoría de grafos, estadística, teoría de la computación, entre otras. De todas estas técnicas y teorías matemáticas la optimización matemática es la que nos proporciona el modo de resolver los problemas, teniendo en cuenta que los problemas HLP son redes (grafos) donde también se pueden aplicar algoritmos propios de esta disciplina. El estudio estadístico puede ayudar a establecer predicciones y parámetros para dotar a la red a diseñar de una base que concuerde con su comportamiento anterior. Por último este tipo de problemas cuentan con la desventaja del tiempo de cálculo necesario, pudiendo ser inabordable bajo ciertos algoritmos. Este problema es estudiado por la teoría de la complejidad computacional, por ello se va a presentar una serie de técnicas de resolución y algoritmos con diversas ventajas a la hora de resolver estos problemas.

#### 2.4.1 Modelos matemáticos

En el estudio de los problemas de localización de HUBs se han formulado diversos modelos, los cuales pretenden dar con una solución a un tipo concreto de problemas o centrarse en un aspecto de ellos. Como se describió en el anterior capítulo los objetivos y los problemas pueden variar según sus características, el nivel de planificación o ámbito de actuación. Particularizando para los problemas de localización (HLP), los cuales se enmarcan en un nivel estratégico y en el ámbito del transporte de mercancías, se han estudiado los siguientes modelos en función de diversas características del problema a estudiar (Farahani et al., 2013).

##### 2.4.1.1.1 Single-HLP

O'Kelly (1987) representó este problema en el que el criterio es Mini-Sum, el dominio de solución es red, los nodos no hubs están conectados al nodo HUB, se debe localizar un único HUB, no hay coste por establecer HUB, el HUB tiene capacidad ilimitada.

##### 2.4.1.1.2 p-HLP O'Kelly (1987).

En este problema, cada nodo no HUB debe ser asignado a un solo nodo HUB y por lo tanto se considera como un problema de localización de p-HUB de asignación única. En este modelo, el criterio es Mini-Sum, el dominio de la solución es red, los nodos HUB están completamente enlazados entre sí, y cada nodo no HUB está enlazado a un sólo nodo HUB. El número de HUBs a localizar se define exógenamente y se denotan por  $p$ , y al menos uno o como máximo dos nodos de HUB tienen que ser atravesados para viajar entre dos nodos que no son HUB. Además, no hay coste para el establecimiento de los HUBs, los HUBs no están capacitados. Debido a que el coste de transporte entre nodos HUB es menor que el coste de transporte entre los HUBs y los nodos no HUB, se aplica un factor de reducción de costes ( $\alpha$ ) con valor 0,6 o 1 el cual se multiplica al coste de transporte.

#### 2.4.1.1.3 p-Hub median location problem (multiple allocation p-HLP)

Campbell (1991) propuso una formulación matemática lineal similar a p-HLP y se nombra p-Hub median location problem. Si cada nodo no HUB podría asignarse a varios nodos HUB, este modelo se denomina asignación múltiple p-HLP. Este Modelo tiene supuestos similares a los del p-HLP.

#### 2.4.1.1.4 p-HLP with fixed link cost

Dado que los nodos no HUB deben asignarse a un HUB, se puede considerar un coste fijo para todas las conexiones de los nodos no HUB a los nodos HUB. Campbell (1994b) sugirió que los modelos se pueden ampliar con un coste fijo para conectar nodos a HUB. Las entradas y salidas de problemas son similares a los del modelo p-Hub median location problem.

#### 2.4.1.1.5 Minimum-value flow on links model

En lugar de imponer que cada nodo no HUB se asigne a un único nodo hub, en la realidad se puede especificar que el flujo entre cualquier nodo no hub y nodo hub debe ser mayor o menor que un valor de umbral de flujo. Campbell (1994b) propuso este problema que es similar a p-HLP. Este problema puede ser formulado análogamente como p-HLP con un umbral mínimo para el flujo desde cada nodo no hub a un nodo HUB.

#### 2.4.1.1.6 p-HLP with limited capacity

Campbell (1994b) propuso un problema en el que la capacidad del HUB limita el flujo en la red. De hecho, los flujos de entrada y salida para cada HUB deben ser más pequeños o iguales a la capacidad HUB. El problema fue formulado de forma similar al p-HUB median location problem.

#### 2.4.1.1.7 Continuous p-HLP

Los problemas de localización de hubs (HLPs) suelen ser modelados como una red o como una instalación discreta. Sin embargo, existen algunos estudios donde el dominio de solución es continuo. En HLPs continuo, el dominio de Nodos HUB no es una serie de nodos particulares en un gráfico, sino una serie de nodos que evolucionan en el plano temporal. En este problema, cada nodo no HUB podría ser asignado a un solo HUB como en la asignación única p-HLP. En este modelo, el criterio es Mini-Sum, el dominio de solución es un plano y es continuo, los nodos del HUB están completamente conectados entre sí, y cada el nodo no HUB está vinculado a una solo HUB. El número de HUBs a localizar se establece de forma exógena, y al menos uno o como máximo dos hubs tienen que ser visitados para viajar entre dos nodos no HUB.

Además, no se considera el coste fijo de las instalaciones del centro de apertura, los Hubs no están capacitados y las variables de decisión son binarias.

#### 2.4.1.1.8 Multi-objective p-HLP

Costa, Captivo y Climaco (2008) propusieron un HLP en el que el primer objetivo es minimizar el coste de transporte total mientras que el segundo minimiza el tiempo máximo de procesamiento de los flujos de carga en los HUBs. En este modelo cada nodo no HUB se asigna a un nodo HUB, como en p-HLP. Los criterios son Mini-Sum y Mini-Max, el dominio de la solución es en red y cada el nodo no HUB está vinculado a un HUB único. El número de hubs para localizar es establecido



exógenamente, y al establecer un envío entre dos nodos se deberá atravesar un HUB o como máximo dos. Además, los costes fijos para iniciar el servicio en los nodos HUB no se consideran, los hubs no están capacitados, y las variables de decisión son binarias.

#### 2.4.1.1.9 p-HUB center location problema

Originalmente propuesto por Campbell (1994b), es una de las variaciones más importantes de los HLP, el problema de localización p-HUB center. Este problema es útil para la localización de las instalaciones de emergencia, problema que se define en función del criterio Mini-Max, con el cual el coste máximo de las parejas origen-destino se minimiza.

#### 2.4.1.1.10 p-Hub covering location problem

Los problemas de localización de p-HUB son extensiones de los problemas de ubicación. En estos problemas se pretende que el par origen-destino de dos nodos no hubs estén cubiertos por un par de nodos HUB. Esta condición se cumple si los nodos origen y destino están a una distancia menor de un HUB, que una distancia preestablecida. originalmente propuesto por Campbell (1994b), este problema podría desarrollarse en otros dos problemas HLP, uno sobre problemas de localización y la ubicación de hubs (p-HUB) y otro problema con longitudes de ruta limitadas.

Como resumen se presenta la Fig. 6:

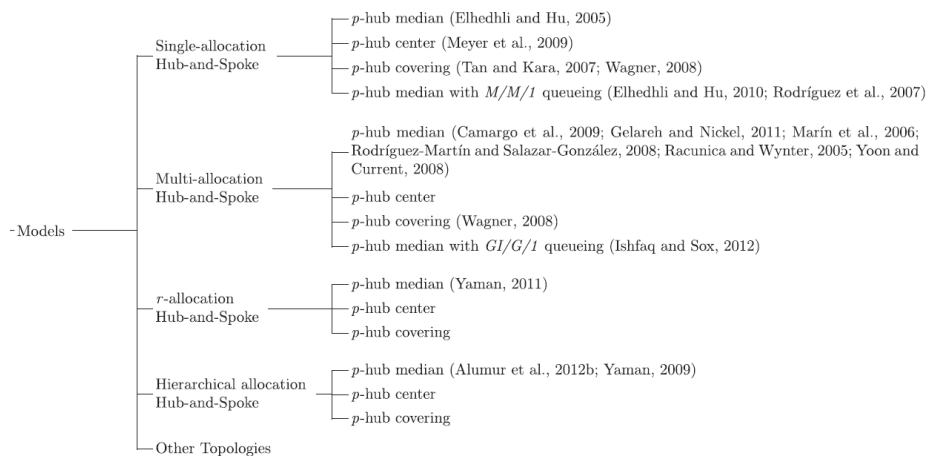


Fig. 6 Modelos (Steadieseifi et al., 2014)

## 2.4.2 Algoritmos en la resolución de HLP

Para la resolución de los modelos propuestos en los problemas de localización de centros de transporte (HLP) se han utilizado diversos algoritmos y métodos. Estos algoritmos se basan en las técnicas descritas en el anterior apartado de optimización matemática y en consecuencia cumplen todos los atributos y características anteriormente descritas. Son tanto procedimientos exactos como heurísticas y metaheurísticas que ya se han aplicado en la resolución del problema de localización de centros de transporte. Según (Steadieseifi et al., 2014) y entre otras se encuentran:

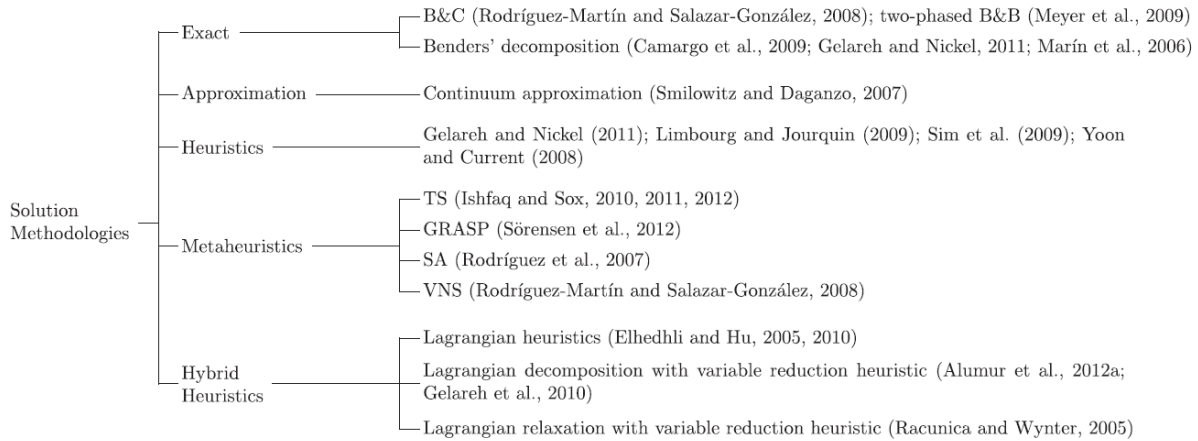


Fig. 7 Algoritmos de Resolución (Steadieseifi et al., 2014)

### *Ramificación y poda (Branch and bound)*

El método de ramificación y poda se puede asimilar a un árbol de soluciones, en el cual cada rama proporciona una posible solución. El algoritmo se encarga de ir recorriendo cada rama para determinar si la solución es mejor que las ya obtenidas, en caso de estar recorriendo la rama y determinar que las soluciones posteriores no van a poder mejorar las soluciones obtenidas, se “poda” esa rama y no se continúa evaluando.

### *Ramificación y corte (Branch and Cut)*

Ramificación y corte es un método de optimización para resolver problemas de programación lineal entera, donde algunas o todas las incógnitas están restringidas a valores enteros. Ramificación y corte implica ejecutar un algoritmo de ramificación a partir del cual se van eliminando las ramas de ejecución que no cumplen o son peores soluciones ya resueltas.

### *Relajación Lagrangiana*

En el campo de la optimización matemática, la relajación Lagrangiana es un método de simplificación (relajación) donde se sustituye un problema de gran dificultad por una aproximación más fácil de resolver. La solución al problema simplificado es una solución aproximada al problema original, pero, proporcionando información útil para posteriores soluciones. El método penaliza las violaciones de las restricciones de desigualdad utilizando un multiplicador de Lagrange, que impone un coste a las violaciones. Estos costes adicionales se utilizan en lugar de las restricciones de desigualdad.

### *Nonlinear MIP- Generalized Benders Decomposition Method*

La descomposición de Benders es una técnica en programación matemática que permite la solución de grandes problemas de programación lineal que tienen una estructura especial. Es especialmente usado en aplicaciones como la programación estocástica, donde la incertidumbre suele estar representada con escenarios.

La estrategia detrás de la descomposición de Benders puede resumirse en dividir y conquistar. Es decir, en la descomposición de Benders, las variables del problema original se dividen en dos subconjuntos de manera que se resuelve un problema maestro de primera etapa sobre el primer conjunto de variables y en segundo orden los valores para el segundo conjunto de variables. Si se determina que las decisiones de primera etapa son inviables, se generan y se añaden los llamados cortes de Benders al problema maestro, que se resuelve a continuación hasta que no se pueden generar cortes. Dado que la descomposición Benders añade nuevas restricciones a medida que avanza hacia una solución.

### *Stochastic programming approach*

En el campo de la optimización matemática, la programación estocástica es un marco para modelar problemas de optimización que implican incertidumbre. Mientras que los problemas de optimización deterministas se formulan con parámetros conocidos, los problemas del mundo real incluyen algunos parámetros desconocidos. Cuando los parámetros se conocen sólo dentro de ciertos límites, un enfoque para abordar estos problemas se llama optimización robusta. Aquí el objetivo es encontrar una solución que sea factible para todos estos datos y óptima en algún sentido. Los modelos de programación estocástica son similares en estilo, pero aprovechan el hecho de que las distribuciones de probabilidad que gobiernan los datos son conocidas o pueden ser estimadas. El objetivo aquí es encontrar alguna política que sea factible para todos (o casi todos) los posibles conjuntos de datos y maximice la función objetivo de las decisiones y las variables aleatorias. En términos más generales, dichos modelos se formulan, se resuelven analíticamente o numéricamente y se analizan para proporcionar información útil en la toma de decisiones.

## 2.5 CONCLUSIONES

Para finalizar el capítulo destacar que se han presentado las bases fundamentales de los algoritmos que en los próximos capítulos se van a desarrollar. La herramienta diseñada para el problema de localización de centros de transporte toma diversas consideraciones de los modelos estudiados en la bibliografía y en consecuencia la forma de resolución adoptada. En definitiva, a partir de lo expuesto en este capítulo se van a diseñar las diferentes herramientas y algoritmos.



## 3 DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA CREACIÓN DE REDES

---

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se van a describir los requisitos, el procedimiento y resultados de la herramienta de creación de redes. Esta herramienta es el paso previo a la herramienta de cálculo, donde se preparan y acondicionan los datos necesarios sobre la red de transporte a estudiar. La estructura del capítulo va a constar de una justificación al diseño de esta herramienta, un apartado donde se explicará el funcionamiento del mismo, posteriormente se explicará el procedimiento de cálculo que se ha implementado en la herramienta, se ejemplificará el proceso con un ejemplo aplicado a España y por último se expondrán las conclusiones referentes al diseño y funcionamiento de la herramienta.

### 3.2 MOTIVACIÓN

Debido a la dificultad que se puede producir a la hora de encontrar datos fidedignos sobre el volumen de mercancías u otras variables a estudiar en el diseño de una red de transporte (tráfico de pasajeros, datos ...) se ha desarrollado un algoritmo, mediante el cual se puede estimar el tráfico de mercancías en la red a estudiar. En el caso de diseño de una red de transporte se ha optado por estudiar la variable más fácil de encontrar y estudiar, como es la población de las localidades integrantes de la red. A partir de esta información se deduce un flujo entre los nodos proporcional a la población dada.

Otro elemento de gran utilidad de esta herramienta es el de poder simplificar una red dada. Esta simplificación se hace concentrando nodos poco relevantes en torno a otros de mayor relevancia. El procedimiento permite abordar los cálculos con mayor rapidez, ya que se reduce el número de nodos y en consecuencia el tiempo de ejecución de los algoritmos.

### 3.3 ESTRUCTURA DE FUNCIONAMIENTO

La herramienta de creación de redes se compone de una serie de pasos para la obtención de una red con la cual se pueda trabajar. Estos pasos pueden variar dependiendo de los datos iniciales que se dispongan sobre la red a estudiar. Estos datos iniciales pueden estar basados en bases de datos sobre el tráfico de mercancías o puede que no se dispongan, en cuyo caso se deberían estimar. Por ello se distinguen dos líneas de actuación de la herramienta, una con datos sobre el flujo de mercancías entre los diferentes nodos de la red y otra sin datos de flujo. Si no se disponen los datos sobre el flujo de mercancías éstos se estimarán en base a otro dato de la red, en este caso se ha decidido que sea la población de cada una de las localidades (nodos) de la red. Una vez se tienen datos sobre el flujo de mercancías, ya sea estimado o en base a datos existentes, el proceso es el mismo para ambas líneas de actuación.

El proceso final se centra en la simplificación y modificación de los nodos de la red para así crear redes más simples, para que el proceso de cálculo sea más rápido. Este último proceso constará de los pasos de concentración, reducción de residuos y creación de enlaces.

Los elementos con los que va a trabajar la herramienta son matrices y listas de datos, las cuales representen las redes como grafos. Estas matrices y listas serán: lista de localidades (nodos) con sus atributos de localización (longitud y latitud) y de población, matriz de flujo entre localidades y matriz de costes de transporte.

### 3.4 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

#### 3.4.1 Parámetros de entrada

Hay que destacar que dependiendo de si se va a realizar una estimación de una red en base a unos parámetros (habitantes – flujo) o a crear una red en base a unos datos ya existentes, se necesitarán unos determinados datos u otros.

- Nodos (coordenadas): Cada localidad, las cuales son los nodos de nuestra red, se ha de identificar con su situación en el mapa mediante sus coordenadas.
- Parámetros de relación entre nodos (flujo de mercancías):
- Parámetros intrínsecos a los nodos (habitantes): Si no se disponen de los datos de flujo entre nodos, éstos se crearán en base a la población existente.
- Coste de transporte entre nodos (Matriz de costes): las unidades monetarias que cuesta ir de un nodo a otro.

#### 3.4.2 Estimación del flujo

Como se ha indicado, si hay que estimar el flujo entre los diferentes nodos, éste se puede estimar en base a la población de cada nodo de la red. El flujo entre nodos se estimará proporcionalmente entre la población de los nodos de modo que la ciudad con mayor población será la que más flujo envíe y en base a la población del resto de ciudades este flujo se distribuirá proporcionalmente. Además, este flujo estimado puede ser multiplicado por una variable aleatoria para representar mejor una red real, donde el flujo no es directamente proporcional a la población.

$$flujo_{ij} = población_i * \frac{población_j}{población\ total} * factor\ de\ escala * n^{\circ}\ aleatorio \quad (4.1)$$

La ecuación (4.1) recoge el procedimiento anteriormente descrito para la estimación del flujo entre un nodo genérico "i" y otro "j" (sólo en un sentido). El primer término de multiplicación establece la proporción (relación entre población y cantidad total de población) y cantidad de flujo (población de "i"). Posteriormente este valor se puede adecuar con un factor de escala y además multiplicarlo por una variable que dé un cierto grado de aleatoriedad.

#### 3.4.3 Coste de transporte

Se puede establecer un coste ya predefinido entre nodos, el cual provenga de estudios previos o estimado por el usuario. También se puede estimar o establecer el coste de transporte entre nodos

como la distancia entre los mismos por una constante que represente el coste por kilómetro (Uds. Monetarias/km), ecuación (4.2).

$$coste_{ij} = distancia_{ij} * coste \text{ por kilómetro (4.2)}$$

Después de la obtención de los datos iniciales para el funcionamiento de la herramienta se puede empezar con el proceso de creación de la red

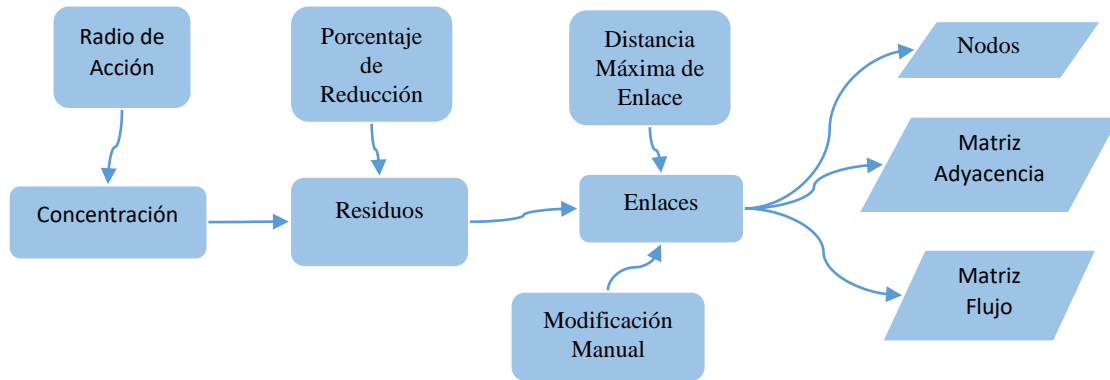


Fig. 8 Diagrama herramienta crear red, fuente: Elaboración propia.

### 3.4.4 Fase 1: Concentración de nodos

En esta primera fase se agrupan en torno a los nodos de mayor tránsito de flujo o población los nodos adyacentes que estén en un radio de kilómetros establecido por el diseñador de la red. El procedimiento empieza con el nodo que tenga el flujo de mayor valor y acaba cuando ya no existan nodos para estudiar. Como resultado el nodo entorno al cual se agrupan el resto aumentará su flujo mediante la suma de los flujos de los nodos adyacentes. En esta fase se agruparían las áreas metropolitanas de los mayores nodos en torno a ellos.

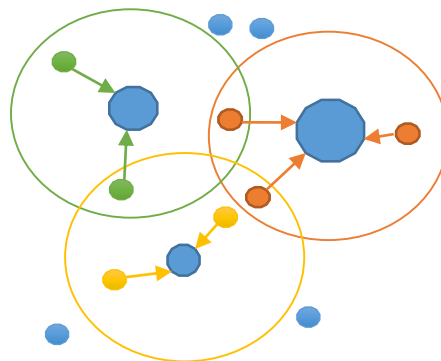


Fig. 9 Crea red fase concentración, fuente: elaboración propia

### 3.4.5 Fase 2: Eliminación de residuos

En la segunda fase se asignan los nodos cuyo atributo no supere un determinado umbral al nodo adyacente más cercano, empezando por el nodo con el menor atributo. Con ello se consigue que los nodos que no pertenecen al área de influencia de los nodos con un mayor atributo (área metropolitana de grandes ciudades) se agrupen en núcleos más grandes o incluso se incorporen a los nodos con mayor importancia.

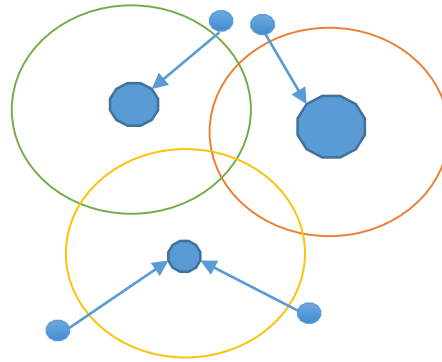


Fig. 10 Crea red fase eliminación de residuos, fuente: elaboración propia

Después de la ejecución de estas dos fases, la información referente a la red de transporte constará de una matriz donde aparecerán las coordenadas y nombre de los nodos resultantes y una matriz cuadrada donde aparecerán los flujos entre los diversos nodos.

### 3.4.6 Fase 3: Diseño de enlaces

Para completar la red y conseguir un grafo que la represente, hace falta la matriz de adyacencia y de costes de la red.

Para la determinación de la matriz de adyacencia se ha implementado un algoritmo, el cual enlaza los puntos de la red creando así la matriz de adyacencia. El algoritmo comienza uniendo los puntos más cercanos.

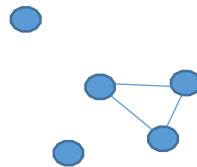


Fig. 11 Crea red fase crear enlaces 1, fuente: elaboración propia

Si una línea se solapa respecto de una anteriormente dispuesta, no se selecciona.

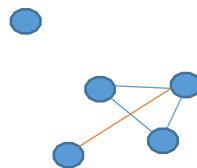


Fig. 12 Crea red fase crear enlaces 2, fuente: elaboración propia

Como resultado se obtiene una red con los enlaces más cortos entre nodos y sin solapamientos.



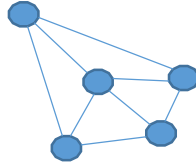


Fig. 13 Crea red fase crear enlaces 3, fuente: elaboración propia

Además, si se establece un límite en la longitud que pudiesen tomar los enlaces, éstos no se producirían.

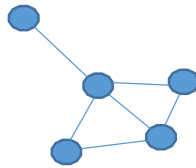


Fig. 14 Crea red fase crear enlaces 4, fuente: elaboración propia

Para determinar la matriz de costes se puede introducir a mano los costes que se deseen entre nodos o multiplicar punto a punto la matriz de adyacencia por una matriz que contenga las distancias euclídeas entre todos los puntos.

### 3.4.7 Modificación manual

Además de los procesos automáticos del algoritmo, también se pueden modificar manualmente los enlaces entre los nodos para conseguir una red más fidedigna con la realidad. Este procedimiento permite, a partir de los datos anteriormente obtenidos, introducir un vector con enlaces a agregar (solapen o no a enlaces existentes) o a eliminar. El resultado será una nueva matriz de adyacencia y costes de la red modificada.

## 3.5 RESULTADOS: APLICACIÓN A LA RED ESPAÑOLA

El resultado final que se espera del proceso es la obtención de un grafo, cuyas matrices asociadas serán:

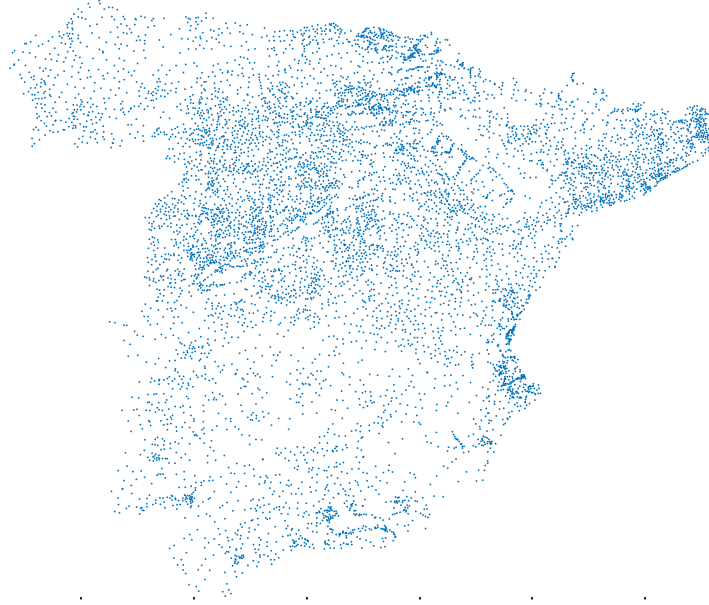
- Matriz de adyacencia, donde se determinan las conexiones entre nodos.
- Matriz de costes, donde se establece el coste de transporte entre los nodos adyacentes.
- Matriz de flujo, en la cual se determina el flujo entre todos los nodos.

Para ilustrar el proceso y los resultados se expone un ejemplo sobre la red española. Se exponen las dos utilidades de la herramienta, en primer lugar, se estima una red en base a los municipios de toda España. En el segundo ejemplo se reduce el número de nodos (inicialmente todas las capitales de provincia), creando una red simplificada con los nodos más representativos.

Este procedimiento, dada la generalidad de la herramienta, se podría aplicar a cualquier país o región si se disponen los datos iniciales necesarios.

### 3.5.1 Estimación de la red

Como ejemplo para estimar la red de transporte, se empezará con la lista de todos los municipios españoles, que estén en territorio peninsular. En total son 7955 municipios cuya población hace un total de 43394255 habitantes.



*Fig. 15 Municipios españoles peninsulares, fuente: Elaboración propia.*

Los datos con los que se cuentan son los nombres de cada municipio, su población y sus coordenadas (no se muestra la tabla con los datos por razones de espacio, serían 7955 filas). Con la lista de municipios y el dato de su población se puede aplicar la ecuación (4.1) de forma iterativa para cada municipio y estimar una cantidad de flujo entre cada municipio (el resultado sería una matriz de 7955x7955 celdas).

Una vez obtenidos estos parámetros se puede pasar a la modificación de los mismos. Aunque este paso se explica en el apartado siguiente, se muestran dos redes creadas a partir de todos los municipios españoles.

Red con 186 nodos:

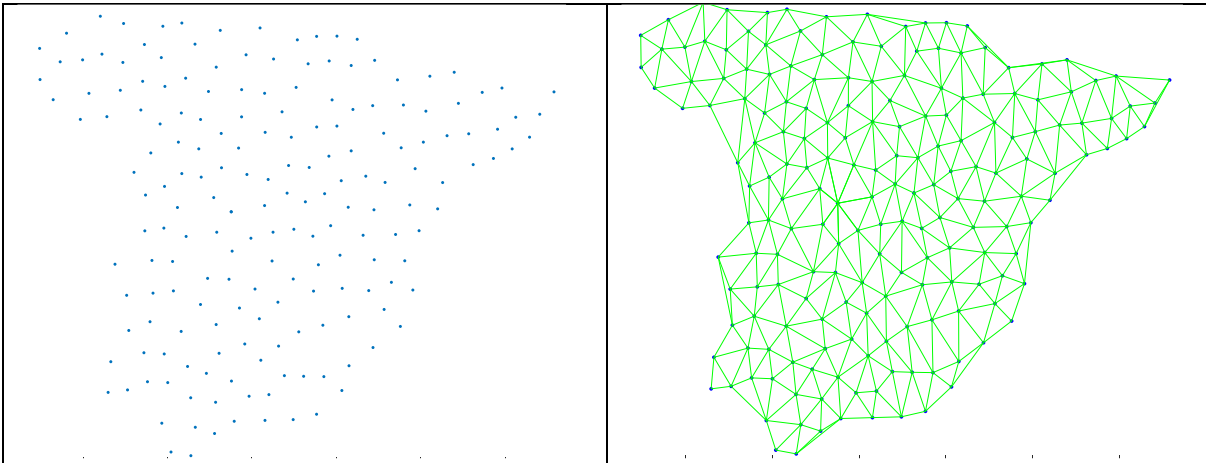


Fig. 16 Red de 186 municipios, fuente: Elaboración propia.

Red con 46 nodos

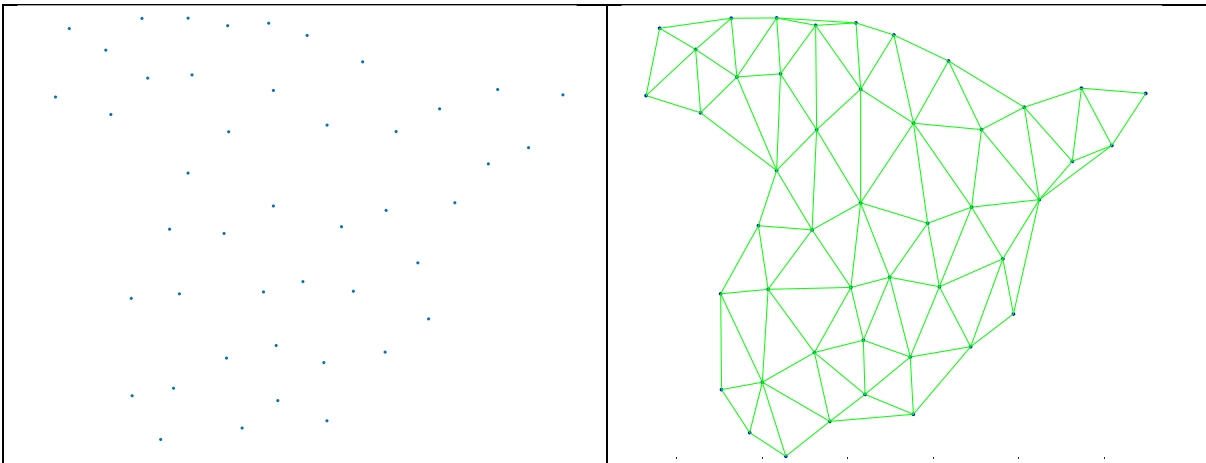


Fig. 17 Red de 46 municipios, fuente: Elaboración propia.

### 3.5.2 Modificación de parámetros

Tanto si se estiman los parámetros como si se obtienen de alguna fuente se debe realizar una modificación de la red para que los datos de la misma sean manejables y se pueda realizar el cálculo posterior. en este apartado se ejemplifica el proceso de reducción a partir de los datos del flujo de mercancías entre todas las capitales de provincia españolas (es el mismo proceso cuyos resultados se han mostrado en el anterior apartado).

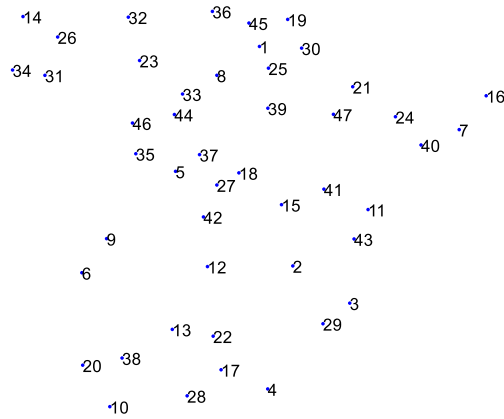


Fig. 18 Capitales de provincia españolas, fuente: Elaboración propia.

Nodo	'Álava'	'Albacete'	'Alicante'	'Almería'	'Ávila'	'Badajoz'	'Barcelona'	'Burgos'	'Cáceres'	'Cádiz'
Longitud	7,33	8,14	9,52	7,53	5,30	3,03	12,17	6,30	3,63	3,71
Latitud	42,85	39,00	38,35	36,84	40,66	38,88	41,39	42,34	39,48	36,53
Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flujo	20,808	16,051	32,142	12,629	7,863	12,556	72,097	23,221	6,699	22,578
Nodo	'Castellón'	'Ciudad Real'	'Córdoba'	'La Coruña'	'Cuenca'	'Girona'	'Granada'	'Guadalajara'	'Guipúzcoa'	'Huelva'
Longitud	9,96	6,07	5,22	1,60	7,87	12,82	6,40	6,83	8,02	3,05
Latitud	39,99	38,99	37,88	43,37	40,07	41,98	37,18	40,63	43,32	37,26
Nº	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Flujo	30,007	16,006	17,342	24,572	12,186	16,970	15,750	17,543	22,595	13,747
Nodo	'Huesca'	'Jaén'	'León'	'Lleida'	'La Rioja'	'Lugo'	'Madrid'	'Málaga'	'Murcia'	'Navarra'
Longitud	9,59	6,21	4,43	10,63	7,55	2,44	6,30	5,58	8,87	8,35
Latitud	42,14	37,77	42,60	41,61	42,47	43,01	40,42	36,72	37,98	42,82
Nº	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Flujo	12,118	12,946	17,528	22,497	12,883	13,833	83,822	25,396	37,458	23,089
Nodo	'Ourense'	'Oviedo'	'Palencia'	'Pontevedra'	'Salamanca'	'Santander'	'Segovia'	'Sevilla'	'Soria'	'Tarragona'
Longitud	2,14	4,16	5,47	1,35	4,34	6,19	5,88	4,00	7,54	11,25
Latitud	42,34	43,36	42,01	42,43	40,96	43,46	40,95	37,38	41,76	41,12
Nº	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Flujo	6,494	24,084	11,530	17,366	9,381	18,350	14,040	40,928	4,231	37,097
Nodo	'Teruel'	'Toledo'	'Valencia'	'Valladolid'	'Vizcaya'	'Zamora'	'Zaragoza'			
Longitud	8,89	5,98	9,62	5,27	7,08	4,26	9,12			
Latitud	40,34	39,86	39,47	41,65	43,26	41,50	41,66			
Nº	41	42	43	44	45	46	47			
Flujo	14,543	42,132	64,376	20,794	33,073	7,752	35,694			

Tabla 5 Lista capitales, coordenadas, flujo circulante

Mediante la función de reducción se determinan valores para que la red resultante tenga 10 nodos. Para ello se introducen los valores de reducción, los cuales son 140 km de radio de concentración, 0.75 de factor de reducción de residuos y se establece el límite de enlaces a 450 km.

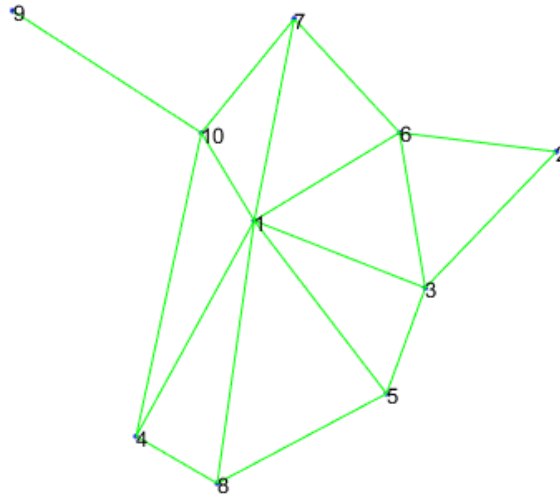


Tabla 6 Red creada de 10 nodos, fuente: Elaboración propia.

Destacar que la numeración de los nodos pasa a ser la determinada por el orden según el flujo.

Longitud	Latitud	Nº	Flujo	Orden	Nodo
6,30	40,42	27	193,59	1	'Madrid'
12,17	41,39	7	126,16	2	'Barcelona'
9,62	39,47	43	141,07	3	'Valencia'
4,00	37,38	38	96,51	4	'Sevilla'
8,87	37,98	29	66,14	5	'Murcia'
9,12	41,66	47	70,31	6	'Zaragoza'
7,08	43,26	45	158,25	7	'Vizcaya'
5,58	36,72	28	71,43	8	'Málaga'
1,60	43,37	14	62,26	9	'La Coruña'
5,27	41,65	44	91,07	10	'Valladolid'

Tabla 7 Lista nodos red simplificada, con atributos

Si se añaden algunos enlaces manualmente la red queda:

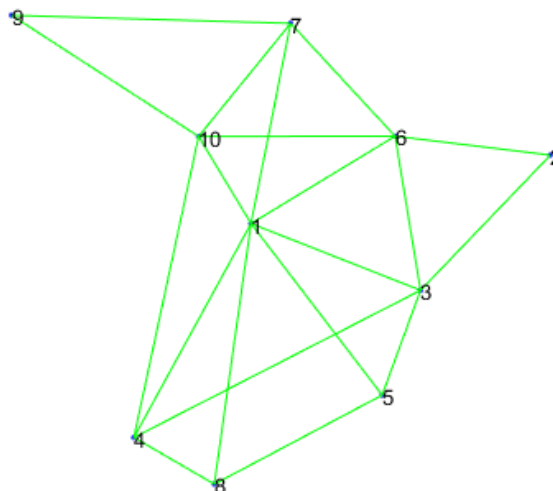


Fig. 19 Red modificada manualmente de 10 nodos, fuente: Elaboración propia.

Las matrices que caracterizan el grafo asociado a la red:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
3	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
4	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1
5	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
6	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
7	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
8	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
10	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0

Tabla 8 Matriz de adyacencia red simplificada

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	4,27	85,00	101,10	30,80	151,93	74,07	3,95	7,23	65,82
2	4,84	0,00	0,46	38,63	10,47	10,50	49,15	2,77	1,24	7,66
3	64,20	0,53	0,00	14,01	6,41	30,06	18,03	0,84	0,71	7,06
4	85,62	32,96	11,09	0,00	111,09	167,54	227,45	22,32	11,53	99,29
5	42,37	11,15	5,78	144,85	0,00	63,07	100,28	28,85	33,09	25,79
6	123,91	6,23	29,40	180,35	64,06	0,00	226,82	24,52	11,01	66,23
7	58,17	35,33	10,29	213,50	93,15	214,89	0,00	16,63	17,51	75,85
8	11,23	5,42	0,68	24,31	19,04	36,02	26,19	0,00	5,13	6,00
9	1,95	1,56	0,26	10,19	42,13	5,09	19,14	2,33	0,00	1,19
10	37,82	9,04	15,27	92,45	16,27	55,20	66,20	4,62	2,35	0,00

Tabla 9 Flujo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	0,00	383,58	422,34	392,88	342,31	326,85	418,07	0,00	178,47
2	0,00	0,00	353,87	0,00	0,00	339,47	0,00	0,00	0,00	0,00
3	383,58	353,87	0,00	665,41	185,00	248,91	0,00	0,00	0,00	0,00
4	422,34	0,00	665,41	0,00	0,00	0,00	0,00	189,81	0,00	494,46
5	392,88	0,00	185,00	0,00	0,00	0,00	0,00	391,22	0,00	0,00
6	342,31	339,47	248,91	0,00	0,00	0,00	288,43	0,00	0,00	427,56
7	326,85	0,00	0,00	0,00	0,00	288,43	0,00	0,00	607,57	268,03
8	418,07	0,00	0,00	189,81	391,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	607,57	0,00	0,00	449,54
10	178,47	0,00	0,00	494,46	0,00	427,56	268,03	0,00	449,54	0,00

Tabla 10 Coste-Distancia de nodos adyacentes

Con estas tres matrices el grafo representativo de la red quedaría perfectamente definido y se podría pasar a realizar cálculos en base a estos datos.

### 3.6 CONCLUSIONES

Como se ha podido comprobar la herramienta diseñada permite la obtención de grafos asociados a redes para poder así realizar cálculos posteriores.

El proceso de estimación de datos sobre el flujo de mercancías hace que podamos abordar el estudio de cualquier zona de la cual sólo se conozcan los datos sobre su población, siendo éste el dato más estudiado y de más fácil acceso en cualquier región del mundo.

El proceso de reducción permite, sin perder datos sobre el flujo de mercancías agruparlos en un menor número de nodos. De esta manera se facilitará el proceso de cálculo y se eliminarán nodos que por su volumen de flujo de mercancías puedan considerarse despreciables.

Por último, la fase de creación de enlaces establece la red propiamente dicha, estableciendo uniones entre los nodos con la posibilidad de modificar dichas uniones. Como elemento a mejorar, aunque se escapa a los objetivos del proyecto, sería la posibilidad de incorporar bases de datos de información geográfica (SIG) para así poder estudiar la red existente. También se podría mejorar el algoritmo haciendo que las líneas pudiesen introducir cruces y no sólo enlaces directos entre nodos, implementando así una red más fiel a la realidad.





## 4 DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE TRANSPORTE EN REDES

---

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Para dar solución al problema de localización de centros de transporte (HLP) se han propuesto multitud de modelos, algoritmo y técnicas. Mediante un estudio previo de dichas soluciones y mediante el estudio de diversas técnicas matemáticas, en este capítulo se va a describir el proceso propuesto para dar solución a los problemas de localización de centros de transporte. El capítulo recoge la descripción del problema y qué elementos se van a modelar para dar con una solución lo más realista posible. Posteriormente se establecerá el modelo matemático de la red propuesta y por último se implementarán los diversos algoritmos para dar con las soluciones al problema.

### 4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Después del estudio de diversos trabajos realizados sobre el problema de localización de HUBs (Alumur, Kara, & Karasan, 2012; Caris, Macharis, & Janssens, 2013; Demir, Huang, Scholts, & Woensel, 2015; Farahani et al., 2013; Ghane-Ezabadi & Vergara, 2016; He, Wu, Zhang, & Liang, 2015; Hosseini, Makui, & Torkestani, 2016; Ishfaq & Sox, 2011; Kim & O'Kelly, 2009; Lin, Chiang, & Lin, 2014; Lin & Lin, 2016; Maheut & Borey, 2012; Martins, Sá, Contreras, & Cordeau, 2015; O'Kelly, 1987; Reis, 2014; Santos, Limbourg, & Carreira, 2015; Serper & Alumur, 2016; Sörensen, Vanovermeire, & Busschaert, 2012; Steadieseifi et al., 2014; Taghipourian, Mahdavi, Mahdavi-amiri, & Makui, 2012; Thorup, 2004; Wiegman & Behdani, 2017; Woxenius, 2007; Yang, Yang, & Gao, 2016), en este apartado se va a proponer un modelo a partir de un estudio previo de la problemática real y de diversas consideraciones, el cual será la base del estudio posterior. Entre las consideraciones que se han tenido en cuenta en la formulación del modelo a estudiar para así reflejar de un mejor modo la realidad se destacan:

#### *Nivel de planificación*

De entre los tres niveles de planificación la red a modelar se centra en la parte estratégica. la solución responderá con la mejor localización de HUBs sin tener en cuenta aspectos como la red existente ni los envíos a corto plazo que se deben realizar. Los datos a estudiar serán el volumen anual de tráfico de mercancías y la propia ubicación de los diversos municipios (nodos) de la red.

#### *Terminología*

La terminología de la red puede definirse como una red intermodal, dado que se establecen varios modos de transporte y, además el tipo de mercancía a transportar es de un sólo tipo.

#### *Topología*

En la red a modelar la topología de la red no obedece a ningún modelo de los expuestos en el apartado 3.1.3, se podría considerar que la elección de la forma de transporte, la ruta elegida, no

puede ser predeterminada. La ruta será elegida en base al coste de transporte, de tal forma que el paso de la mercancía por su HUB asignado no tendrá por qué darse. La mercancía podría pasar por otro HUB, aunque no fuese el asignado. Ésto implica que dependiendo del nodo origen y destino la mercancía puede tomar un modo de transporte (carretera), si no pasa la misma por un HUB, o dos modos (carretera y tren), si la mercancía pasa por entre dos HUBs, todo dependerá del coste total de cada ruta.

Por ello la topología podría definirse como una mezcla entre transporte directo, corredor y centros conectados, según convenga en cada momento y parte de la red.

### *Características*

Como características del modelo se establece que el Dominio de resolución es de tipo red, todos los nodos son candidatos a HUB. El criterio de optimización será Mini-Max, el objetivo es disminuir el máximo coste de transporte en todos los nodos. Se ha establecido este criterio ya que el precio de establecer HUBs y las variables que influyen no se han podido establecer con fiabilidad. El número de HUBs del modelo variará, pero en general será multihub pudiendo darse de entre 2 a 8 HUBs, la forma de determinar el número de centros de transporte es exógena, aunque posteriormente se estudiará la conveniencia de un mayor o menor número. La capacidad de los HUBs es ilimitada. Como se ha indicado cada nodo puede ser servido por cualquier HUB, aunque el transporte entre un nodo y su HUB asignado disfruta de cierta ventaja. Por último y éste es el elemento distintivo del trabajo, el coste de conexión entre nodos no es constante ni proporcional a ningún parámetro, este variará en función del flujo registrado.

### *Vacios en la problemática solucionados*

Como se ha indicado el coste entre nodos varía en función del flujo circulante entre nodos. Esto se establece mediante un factor de reducción llamado “alfa”, este factor depende del flujo acumulado década enlace (suma de todos los flujos que circulan por cada enlace). Este factor se presentó inicialmente como una función la cual devolvía el factor de descuento a aplicar en cada enlace de la red. La función presentaba un descuento exponencial respecto del flujo acumulado. Finalmente, el factor de descuento es una función discreta de dos valores para cada modo. Así se puede establecer un descuento para cada modo de transporte y en función del flujo.

Este elemento hace que el modelo a estudiar dependa de una función no lineal y en consecuencia el modelo sea igualmente no lineal. Por ello para la resolución del problema se deben de implementar métodos de cálculo que admitan funciones no lineales y como se explicó en apartados anteriores estos métodos elegidos son las metaheurísticas.

## 4.3 MODELO MATEMÁTICO DE LA RED DE TRANSPORTE INTERMODAL

La formulación matemática del modelo se puede estudiar de dos formas, una desde el punto de vista de flujo entre nodos y otra en función del flujo acumulado en los diferentes enlaces de la red.

Se presenta la segunda forma dada su mayor simplicidad, además es la forma en la que se basan los algoritmos implementados.

$$z = \sum_i \sum_j F_{ij} C_{ij} \alpha_{ij}^m \quad (5.2.1)$$

$$F_{ij} = \sum_k \sum_m f_{km}^{ij} \quad (5.2.2)$$

$$\alpha_{ij}^m = \begin{cases} \alpha_1 & \text{si } F_{ij}^1 < 0.01 * f_t^1 \\ \alpha_2 & \text{si } F_{ij}^1 > 0.01 * f_t^1 \\ \alpha_3 & \text{si } F_{ij}^2 < 0.05 * f_t^2 \\ \alpha_4 & \text{si } F_{ij}^2 > 0.05 * f_t^2 \end{cases} \quad (5.2.3)$$

$$f_t^m = \sum_i \sum_j f_{ij}^m \quad (5.2.4)$$

$$m \in 1,2 \quad (2.5)$$

La ecuación (5.2.1) es la función objetivo del problema, donde  $F_{ij}$  es el flujo acumulado en cada enlace de la red,  $C_{ij}$  es el coste de transporte entre cada enlace y  $\alpha_{ij}^m$  representa el factor de reducción de coste para cada enlace i-j y en función del modo de transporte utilizado. Por lo tanto, el coste total es la suma de los costes de todos los enlaces i-j.

La ecuación (5.2.2) establece el flujo acumulado en cada enlace. Este será igual a la suma de los flujos entre nodos k-m cuya ruta pasa por el enlace i-j.

La ecuación (5.2.3) indica el descuento aplicable en función del flujo acumulado de cada enlace. Se aplicará un factor de descuento para cada modo y tendrá en cuenta si supera o no un cierto valor respecto del total de flujo de la red.

La ecuación (5.2.4) muestra el cálculo de flujo total de la red, suma de los flujos entre todos los nodos de la red.

La ecuación (5.2.5) número de modos de transporte de la red.

#### 4.4 DISEÑO DE UN EVALUADOR DE SOLUCIONES PARA HLP

Dados los fundamentos matemáticos con los que se va a modelar la red de transporte, el grafo con sus matrices correspondientes, y el objetivo a resolver respecto a la problemática descrita, ya es posible crear una herramienta que permita encontrar una solución para el diseño de la red de transporte.

El proceso para la obtención de una solución de diseño se basa en el uso de la metaheurística GRASP y de una función para el cálculo del coste de la red. El proceso puede resumirse en un bucle en el cual se crean soluciones con un cierto grado de aleatoriedad y posteriormente se comprueba el

coste de esa solución. El proceso se repite hasta que finaliza el ciclo GRASP con la convergencia de los costes de la red, generando una red de coste mínimo para con los parámetros aleatorios que se han propuesto. El bucle se repetirá con un nuevo conjunto de parámetros aleatorios y así se construirán soluciones hasta que al algoritmo se le indique parar.

#### 4.4.1 Evaluación del flujo acumulado

Como paso previo al cálculo del coste y para determinados cálculos se ha de calcular el flujo que pasa por cada uno de los enlaces de la red, sea de los nodos adyacentes o por el hecho de que ese enlace forma parte de una ruta entre otros dos nodos.

Para realizar el cálculo se ha implementado una función la cual tiene como parámetros de entrada la matriz de acceso y la matriz de flujo. La función recorre cada camino entre todos los nodos, tomándolos como inicio y final y sumando a cada enlace recorrido el flujo que ha de ir entre el nodo inicio y final.

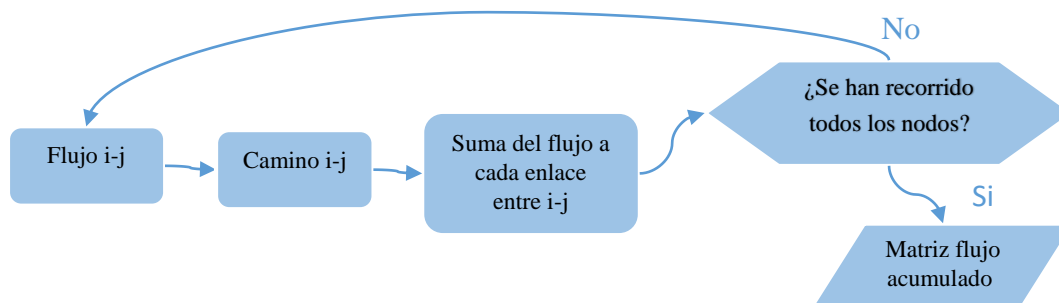


Fig. 20 Diagrama cálculo flujo acumulado, fuente: Elaboración propia.

Se continúa ejemplificando el proceso con la red de 10 nodos:

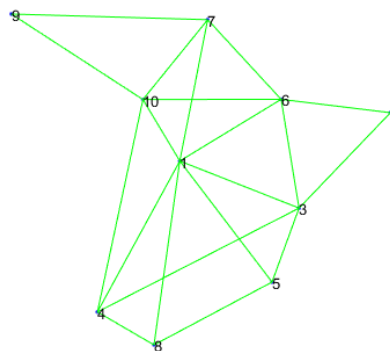


Fig. 21 Red 10 nodos, fuente: Elaboración propia.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	4,27	85,00	101,10	30,80	151,93	74,07	3,95	7,23	65,82
2	4,84	0,00	0,46	38,63	10,47	10,50	49,15	2,77	1,24	7,66
3	64,20	0,53	0,00	14,01	6,41	30,06	18,03	0,84	0,71	7,06
4	85,62	32,96	11,09	0,00	111,09	167,54	227,45	22,32	11,53	99,29
5	42,37	11,15	5,78	144,85	0,00	63,07	100,28	28,85	33,09	25,79
6	123,91	6,23	29,40	180,35	64,06	0,00	226,82	24,52	11,01	66,23
7	58,17	35,33	10,29	213,50	93,15	214,89	0,00	16,63	17,51	75,85
8	11,23	5,42	0,68	24,31	19,04	36,02	26,19	0,00	5,13	6,00
9	1,95	1,56	0,26	10,19	42,13	5,09	19,14	2,33	0,00	1,19
10	37,82	9,04	15,27	92,45	16,27	55,20	66,20	4,62	2,35	0,00

Tabla 11 Matriz de Flujo en cientos de miles de Uds., Red 7 Nodos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	6	1	1	1	1	1	1	10	1
2	6	2	2	3	3	2	6	5	10	6
3	3	3	3	3	3	3	6	5	10	1
4	4	3	4	4	8	1	1	4	10	4
5	5	3	5	8	5	3	1	5	10	1
6	6	6	6	1	3	6	6	1	10	6
7	7	6	6	1	1	7	7	1	7	7
8	8	3	5	8	8	1	1	8	10	1
9	10	6	1	10	1	10	9	1	9	9
10	10	6	1	10	1	10	10	1	10	10

Tabla 12 Matriz de Acceso

A partir de estas dos matrices se puede sumar cada flujo en cada enlace. El resultado final sería:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	0,00	10,05	49,50	18,23	35,98	42,80	5,20	0,00	15,08
2	0,00	0,00	5,23	0,00	0,00	7,34	0,00	0,00	0,00	0,00
3	7,20	5,01	0,00	5,26	8,45	11,12	0,00	0,00	0,00	0,00
4	48,06	0,00	4,40	0,00	0,00	0,00	0,00	13,34	0,00	11,08
5	20,15	0,00	8,61	0,00	0,00	0,00	0,00	17,73	0,00	0,00
6	33,36	5,64	10,37	0,00	0,00	0,00	29,40	0,00	0,00	8,61
7	38,14	0,00	0,00	0,00	0,00	26,05	0,00	0,00	1,75	7,59
8	8,46	0,00	0,00	16,92	13,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,91	0,00	0,00	6,47
10	12,07	0,00	0,00	10,26	0,00	7,09	6,62	0,00	7,23	0,00

Tabla 13 Matriz de flujo acumulado en millones de Uds.

Como se puede observar el flujo acumulado sólo se da entre nodos adyacentes. Tomando como ejemplo el enlace 9-7 sólo hay un camino que lo recorra, el propio 9-7. El flujo es de 1,91 MUds, éste sería el flujo de "ida", si se tiene en cuenta el de "vuelta":  $1,91+1,75=3,66$  MUds.

#### 4.4.2 Evaluación coste de transporte

La Fig. 22 muestra el diagrama que ilustra el proceso seguido por el programa de cálculo. Siguiendo con el ejemplo de la red de 10 nodos, donde los HUBs elegidos son el 1,5 y 7:

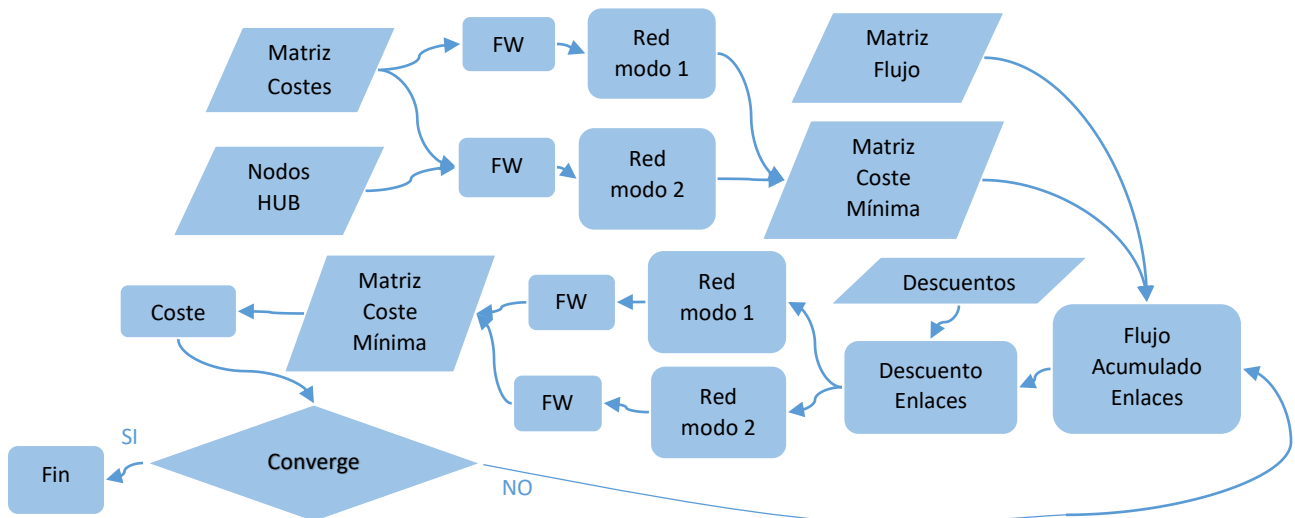


Fig. 22 Diagrama Función Cálculo de Coste, fuente: Elaboración propia.

A partir de la matriz de costes, que relaciona el coste de transporte entre los nodos adyacentes, se aplica el algoritmo de Floyd-Warshall. Se obtiene una nueva matriz de costes entre todos los nodos de la red además de la matriz de acceso entre ellos. Esta matriz de costes configurará el modo de transporte 1 (carretera).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	0,00	383,58	422,34	392,88	342,31	326,85	418,07	0,00	178,47
2	0,00	0,00	353,87	0,00	0,00	339,47	0,00	0,00	0,00	0,00
3	383,58	353,87	0,00	665,41	185,00	248,91	0,00	0,00	0,00	0,00
4	422,34	0,00	665,41	0,00	0,00	0,00	0,00	189,81	0,00	494,46
5	392,88	0,00	185,00	0,00	0,00	0,00	0,00	391,22	0,00	0,00
6	342,31	339,47	248,91	0,00	0,00	0,00	288,43	0,00	0,00	427,56
7	326,85	0,00	0,00	0,00	0,00	288,43	0,00	0,00	607,57	268,03
8	418,07	0,00	0,00	189,81	391,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	607,57	0,00	0,00	449,54
10	178,47	0,00	0,00	494,46	0,00	427,56	268,03	0,00	449,54	0,00

Tabla 14 Matriz de Coste Básico

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,0	681,8	383,6	422,3	392,9	342,3	326,9	418,1	628,0	178,5
2	681,8	0,0	353,9	1019,3	538,9	339,5	627,9	930,1	1216,6	767,0
3	383,6	353,9	0,0	665,4	185,0	248,9	537,3	576,2	1011,6	562,1
4	422,3	1019,3	665,4	0,0	581,0	764,7	749,2	189,8	944,0	494,5
5	392,9	538,9	185,0	581,0	0,0	433,9	719,7	391,2	1020,9	571,4
6	342,3	339,5	248,9	764,7	433,9	0,0	288,4	760,4	877,1	427,6
7	326,9	627,9	537,3	749,2	719,7	288,4	0,0	744,9	607,6	268,0
8	418,1	930,1	576,2	189,8	391,2	760,4	744,9	0,0	1046,1	596,5
9	628,0	1216,6	1011,6	944,0	1020,9	877,1	607,6	1046,1	0,0	449,5
10	178,5	767,0	562,1	494,5	571,4	427,6	268,0	596,5	449,5	0,0

Tabla 15 Matriz de Costes Ampliada

Con la misma matriz de costes y con la información de los nodos HUB (si los hay) se seleccionarán los costes entre los diferentes HUBs y se establecerá un enlace directo. El resultado conformará el modo de transporte 2 (tren).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,0	0,0	0,0	0,0	176,8	0,0	147,1	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	176,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	323,9	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	147,1	0,0	0,0	0,0	323,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 16 Matriz de Costes Modo 2

Para determinar qué camino es el más adecuado en el transporte se debe elegir el camino con menor coste entre nodos, independientemente del modo. por ello el siguiente paso será la elección del camino con menor coste entre los diferentes nodos, se compara cada elemento de las dos matrices de coste (modo 1 y modo 2) eligiendo el menor de los dos valores. Previo a este paso se ha aplicado un descuento al coste de transporte del modo 2, si no, el coste sería el mismo en ambos modos (dado que el coste inicial es el mismo). Esto garantiza la elección del modo 2 en trayectos largos, dado el coste menor de este modo y prioriza los enlaces directos entre nodos cercanos. Como se puede observar en la Tabla 17 los costes de transporte entre los nodos 2-3 y 3-4 del modo 2 prevalecen sobre los del modo 1.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	681,8	383,6	380,1	176,8	308,1	147,1	418,1	628,0	160,6
2	681,8	0	353,9	1019,3	538,9	339,5	565,1	930,1	1216,6	767,0
3	383,6	353,9	0	665,4	166,5	248,9	537,3	576,2	1011,6	562,1
4	380,1	1019,3	665,4	0	581,0	764,7	749,2	189,8	944,0	494,5
5	176,8	538,9	166,5	581,0	0	433,9	323,9	352,1	1020,9	571,4
6	308,1	339,5	248,9	764,7	433,9	0	288,4	760,4	877,1	427,6
7	147,1	565,1	537,3	749,2	323,9	288,4	0	744,9	546,8	268,0
8	418,1	930,1	576,2	189,8	352,1	760,4	744,9	0	1046,1	596,5
9	628,0	1216,6	1011,6	944,0	1020,9	877,1	546,8	1046,1	0	449,5
10	160,6	767,0	562,1	494,5	571,4	427,6	268,0	596,5	449,5	0

Tabla 17 Matriz de Coste Mínima Conjunta

Con la nueva matriz de coste mínima conjunta se recalcula mediante Floyd-Warshall la matriz de coste mínima total y de acceso total. A partir de la matriz de acceso de la red total con los dos modos se calcula el flujo acumulado entre los diferentes enlaces individuales. Con ello se muestra qué flujo soporta cada uno de los enlaces, dado que varios caminos de conexión entre diferentes nodos coincidirán en parte de la ruta.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,0	647,5	343,3	380,1	176,8	308,1	147,1	418,1	610,2	160,6
2	647,5	0,0	353,9	1019,3	520,4	339,5	565,1	872,5	1111,9	767,0
3	343,3	353,9	0,0	665,4	166,5	248,9	490,4	518,6	953,5	503,9
4	380,1	1019,3	665,4	0,0	541,9	688,2	527,2	189,8	944,0	494,5
5	176,8	520,4	166,5	541,9	0,0	415,4	323,9	352,1	787,0	337,4
6	308,1	339,5	248,9	688,2	415,4	0,0	288,4	726,2	835,2	427,6
7	147,1	565,1	490,4	527,2	323,9	288,4	0,0	565,2	546,8	268,0
8	418,1	872,5	518,6	189,8	352,1	726,2	565,2	0,0	1028,2	578,7
9	610,2	1111,9	953,5	944,0	787,0	835,2	546,8	1028,2	0,0	449,5
10	160,6	767,0	503,9	494,5	337,4	427,6	268,0	578,7	449,5	0,0

Tabla 18 Matriz de Costes Mínima Total

Se puede observar cómo en la matriz de costes mínima total (Tabla 18) los costes de transporte han disminuido respecto a la matriz de costes mínima conjunta (Tabla 17).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	6	5	1	1	1	1	1	10	1
2	6	2	2	2	3	2	2	5	7	2
3	5	3	3	3	3	3	5	5	10	1
4	4	4	4	4	8	1	1	4	4	4
5	5	3	5	8	5	3	5	5	10	1
6	6	6	6	1	3	6	6	1	7	6
7	7	7	5	1	7	7	7	1	7	7
8	8	3	5	8	8	1	1	8	10	1
9	10	7	5	9	1	7	9	1	9	9
10	10	10	5	10	1	10	10	1	10	10

Tabla 19 Matriz de Acceso Total

El acceso entre nodos también ha variado (Tabla 19) respecto de la situación inicial (Tabla 12), cambiando los caminos que también han cambiado su coste de transporte.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	0,00	0,00	49,50	18,97	35,98	32,77	5,20	0,00	15,08
2	0,00	0,00	1,37	3,86	0,00	1,53	5,04	0,00	0,00	0,77
3	0,00	1,71	0,00	1,40	17,45	9,31	0,00	0,00	0,00	0,00
4	48,06	3,30	1,11	0,00	0,00	0,00	0,00	13,34	1,15	9,93
5	17,32	0,00	19,69	0,00	0,00	0,00	11,83	17,73	0,00	0,00
6	33,36	1,05	9,35	0,00	0,00	0,00	23,78	0,00	0,00	6,62
7	28,83	3,69	0,00	0,00	10,34	22,00	0,00	0,00	2,98	7,59
8	8,46	0,00	0,00	16,92	13,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	1,02	0,00	0,00	2,58	0,00	0,00	4,79
10	12,07	0,90	0,00	9,24	0,00	5,52	6,62	0,00	4,85	0,00

Tabla 20 Matriz de Flujo Acumulado Modo 1 y 2

En la nueva matriz de flujo acumulada (Tabla 20) se puede observar cómo varios enlaces, los cuales anteriormente (Tabla 13) no presentaban flujo, ahora sí lo presentan debido al cambio de varias rutas entre nodos.

Con los datos del flujo acumulado en cada enlace se aplican descuentos en esos enlaces, disminuyendo el coste de transporte en ese tramo de la ruta. Este procedimiento pretende simular una mejor infraestructura dado el mayor número de flujo circulante. También se aplica un descuento en las rutas entre cada nodo y su HUB asignado. El procedimiento se aplica para los dos modos de transporte, eligiendo un baremo en función del flujo total de la red; en el modo 1 (Tabla 21) se establece un descuento si el enlace soporta más del 1% del total de flujo de la red, además se aplica un 10% de descuento en los enlaces que conectan cada nodo con su HUB asignado. En el modo 2 se aplica el descuento (Tabla 22) si soporta más de un 5% del flujo total.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9
2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
3	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0
4	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9
5	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0
6	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9
7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9
8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9
10	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0

Tabla 21 Descuentos Modo 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,45	0,45	0,45	0,45	0,30	0,45	0,30	0,45	0,45	0,45
2	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
3	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
4	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
5	0,30	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
6	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
7	0,30	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
8	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
9	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
10	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45

Tabla 22 Descuentos Modo 2

Estos descuentos se multiplican en la matriz de costes básica (sólo nodos adyacentes) de ambos modos (Tabla 23 y Tabla 24) y nuevamente se elige entre las dos matrices de costes básicas el elemento de menor valor en cada posición (Tabla 25). A partir de la matriz de costes conjunta se aplica Floyd-Warshall y se recalcula la matriz de costes total (Tabla 26) y de adyacencia total (Tabla 27).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,0	0,0	383,6	342,1	392,9	277,3	326,9	376,3	0,0	144,6
2	0,0	0,0	353,9	0,0	0,0	339,5	0,0	0,0	0,0	0,0
3	383,6	353,9	0,0	665,4	149,8	224,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	342,1	0,0	665,4	0,0	0,0	0,0	0,0	170,8	0,0	445,0
5	392,9	0,0	149,8	0,0	0,0	0,0	0,0	316,9	0,0	0,0
6	277,3	339,5	224,0	0,0	0,0	0,0	259,6	0,0	0,0	384,8
7	326,9	0,0	0,0	0,0	0,0	259,6	0,0	0,0	546,8	241,2
8	376,3	0,0	0,0	170,8	316,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	546,8	0,0	0,0	404,6
10	144,6	0,0	0,0	445,0	0,0	384,8	241,2	0,0	404,6	0,0

Tabla 23 Nueva Matriz de costes básica modo 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	0,00	0,00	0,00	117,86	0,00	98,06	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	117,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	98,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 24 Nueva Matriz de costes básica modo 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	383,58	342,09	117,86	277,27	98,06	376,27	0	144,56
2	0	0	353,87	0	0	339,47	0	0	0	0
3	383,58	353,87	0	665,41	149,85	224,02	0	0	0	0
4	342,09	0	665,41	0	0	0	0	170,83	0	445,01
5	117,86	0	149,85	0	0	0	215,92	316,89	0	0
6	277,27	339,47	224,02	0	0	0	259,59	0	0	384,80
7	98,06	0	0	0	215,92	259,59	0	0	546,81	241,23
8	376,27	0	0	170,83	316,89	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	546,81	0	0	404,58
10	144,56	0	0	445,01		384,80	241,23	0	404,58	0

Tabla 25 Nueva Matriz de costes básica conjunta

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,0	616,7	267,7	342,1	117,9	277,3	98,1	376,3	549,1	144,6
2	616,7	0,0	353,9	958,8	503,7	339,5	599,1	820,6	1128,8	724,3
3	267,7	353,9	0,0	609,8	149,8	224,0	365,8	466,7	816,9	412,3
4	342,1	958,8	609,8	0,0	460,0	619,4	440,1	170,8	849,6	445,0
5	117,9	503,7	149,8	460,0	0,0	373,9	215,9	316,9	667,0	262,4
6	277,3	339,5	224,0	619,4	373,9	0,0	259,6	653,5	789,4	384,8
7	98,1	599,1	365,8	440,1	215,9	259,6	0,0	474,3	546,8	241,2
8	376,3	820,6	466,7	170,8	316,9	653,5	474,3	0,0	925,4	520,8
9	549,1	1128,8	816,9	849,6	667,0	789,4	546,8	925,4	0,0	404,6
10	144,6	724,3	412,3	445,0	262,4	384,8	241,2	520,8	404,6	0,0

Tabla 26 Nueva Matriz de costes total

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	6	5	1	1	1	1	1	10	1
2	6	2	2	1	3	2	6	5	10	6
3	5	3	3	1	3	3	5	5	10	1
4	4	6	5	4	1	1	1	4	10	4
5	5	3	5	1	5	3	5	5	10	1
6	6	6	6	1	3	6	6	1	10	6
7	7	6	5	1	7	7	7	1	7	7
8	8	3	5	8	8	1	1	8	10	1
9	10	6	5	10	1	10	9	1	9	9
10	10	6	5	10	1	10	10	1	10	10

Tabla 27 Nueva matriz de acceso total

Multiplicando la matriz de costes por el nuevo flujo acumulado (Tabla 28) en cada enlace elemento a elemento (segunda formulación del problema) (Tabla 29) y sumando todos los elementos de la matriz resultante se calcula el coste total de transporte.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,0	0,0	0,0	69,2	31,2	39,3	32,8	5,2	0,0	15,1
2	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	1,7	0,0	0,0	18,9	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0
4	63,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	11,1
5	33,2	0,0	20,8	0,0	0,0	0,0	11,8	3,2	0,0	0,0
6	37,2	8,9	9,3	0,0	0,0	0,0	27,6	0,0	0,0	8,6
7	28,8	0,0	0,0	0,0	10,3	25,0	0,0	0,0	1,8	7,6
8	8,5	0,0	0,0	2,4	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	6,5
10	12,1	0,0	0,0	10,3	0,0	7,1	6,6	0,0	7,2	0,0

Tabla 28 Matriz flujo acumulado

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	0,26	2,28	3,46	0,36	4,21	0,73	0,15	0,40	0,95
2	0,30	0,00	0,02	3,70	0,53	0,36	2,94	0,23	0,14	0,55
3	1,72	0,02	0,00	0,85	0,10	0,67	0,66	0,04	0,06	0,29
4	2,93	3,16	0,68	0,00	5,11	10,38	10,01	0,38	0,98	4,42
5	0,50	0,56	0,09	6,66	0,00	2,36	2,17	0,91	2,21	0,68
6	3,44	0,21	0,66	11,17	2,39	0,00	5,89	1,60	0,87	2,55
7	0,57	2,12	0,38	9,40	2,01	5,58	0,00	0,79	0,96	1,83
8	0,42	0,45	0,03	0,42	0,60	2,35	1,24	0,00	0,48	0,31
9	0,11	0,18	0,02	0,87	2,81	0,40	1,05	0,22	0,00	0,05
10	0,55	0,65	0,63	4,11	0,43	2,12	1,60	0,24	0,10	0,00

Tabla 29 Precio de transporte en cada enlace (miles de millones)

La suma da como resultado 1.5498e+11 Uds. Monetarias.

Si el coste calculado es el mismo que en la anterior iteración el proceso de cálculo finaliza, si no se ha de volver al paso de cálculo del flujo acumulado. Este método iterativo prima la elección de las vías con mayor flujo dado el mayor descuento aplicado, dándose el caso de cambio de ruta óptima entre nodos a medida que el proceso avanza.

#### 4.4.3 Diseño de un algoritmo de tipo GRASP para resolver el problema HLP con factor de descuentos variables

Como ya se ha indicado el algoritmo GRASP tiene una serie de pasos. En este apartado se van a explicar de una forma detallada haciendo referencia a la construcción de la solución del trabajo.

##### 4.4.3.1 Parámetros de entrada y elementos de trabajo

El algoritmo GRASP diseñado necesita los siguientes datos de entrada:

*Número de HUBs a asignar:* cuantos nodos de la red deben ser elegidos como HUB, hay que tener en cuenta que son los que asigna el algoritmo, también se podrán seleccionar unos preestablecidos.

*Matriz de adyacencia del grafo de la red:* proveniente de la función crear red o introducida a mano

*Matriz de coste o distancia básica:* También puede provenir de la función crear red o de otra fuente. En el caso de la red de transporte se pueden introducir las distancias entre nodos adyacentes y posteriormente este valor corregirlo mediante un factor de escalado. En este trabajo se ha optado por esta opción en el caso de las dos primeras redes y tomar una matriz ya establecida con datos sobre el coste de transporte para la última red.

*Matriz de flujo entre nodos:* matriz también preparada por la función crear red.

*Factor de escalado del coste o precio:* si se ha optado por establecer como coste de transporte la distancia entre nodos, con este factor se puede traducir a las unidades que se deseen.

*Descuentos aplicados a la red:* matriz que indica qué tipo de descuentos se deben aplicar a los diferentes enlaces en función del flujo circulante y el modo de transporte.

*Lista de nodos fijos:* se puede introducir al modelo una lista con todos los nodos que se deseen de antemano sean HUB.

*Factor de selección de nodos y hubs:* factor del cual dependerá cuantos nodos son elegidos en la lista reducida de candidatos para ser hubs y cuantos nodos HUB han de estudiar su idoneidad para ser la asignación del resto de nodos no HUB.

Para la realización de un ejemplo se continuará con la red de 10 nodos (Fig. 21). Se establecerán 3 HUBs, los descuentos serán (1 0.9 0.45 0.3), los factores de selección (0.5 y 0.8).

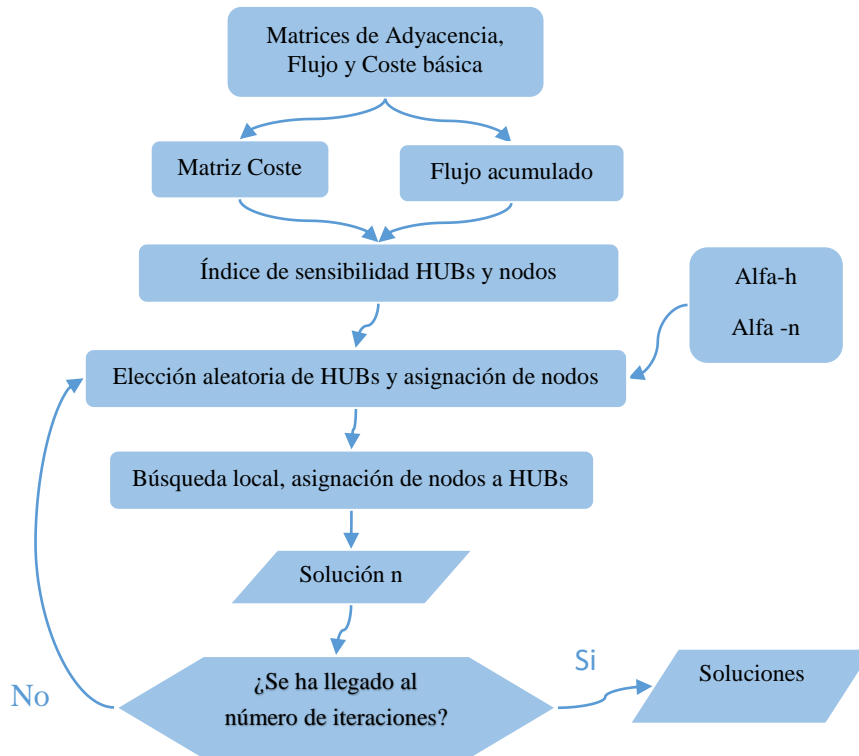


Fig. 23 Diagrama algoritmo GRASP, fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.3.2 Preprocesamiento

En la fase de preprocesamiento se pretende crear unos determinados índices para la elección posterior de nodos HUB y de nodos asociados a estos HUBs.

##### Índice de sensibilidad para la elección de nodos HUB

El cálculo del índice de sensibilidad de nodos HUB se basa en la suma de los flujos acumulados de salida y entrada al nodo a estudiar multiplicada por la suma del flujo saliente y entrante desde o hacia otros nodos:

$$\hat{I}_{sHUB} = \sum_j F_{km}^{ij} * \sum_j f_{ij} \quad (5.1)$$

En la ecuación 5.1  $\sum_j F_{km}^{ij}$  indica la suma del flujo acumulado de salida y entrada de todos los enlaces entre los nodos adyacentes "j" y el nodo "i". Este flujo corresponderá con todas las rutas entre

nodos "k" y "m" que pasen por cada enlace "j"- "i". El término  $\sum_j f_{ij}$  indica la suma del flujo de mercancías tanto salientes como entrantes entre los nodos adyacentes "j" y el nodo "i".

En la red a estudiar, para el nodo 2, se sumarían las filas de ambas matrices sombras y posteriormente se multiplicarían elemento a elemento.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,000	0,427	8,500	10,110	3,080	15,193	7,407	0,395	0,723	6,582
2	0,484	0,000	0,046	3,863	1,047	1,050	4,915	0,277	0,124	0,766
3	6,420	0,053	0,000	1,401	0,641	3,006	1,803	0,084	0,071	0,706
4	8,562	3,296	1,109	0,000	11,109	16,754	22,745	2,232	1,153	9,929
5	4,237	1,115	0,578	14,485	0,000	6,307	10,028	2,885	3,309	2,579
6	12,391	0,623	2,940	18,035	6,406	0,000	22,682	2,452	1,101	6,623
7	5,817	3,533	1,029	21,350	9,315	21,489	0,000	1,663	1,751	7,585
8	1,123	0,542	0,068	2,431	1,904	3,602	2,619	0,000	0,513	0,600
9	0,195	0,156	0,026	1,019	4,213	0,509	1,914	0,233	0,000	0,119
10	3,782	0,904	1,527	9,245	1,627	5,520	6,620	0,462	0,235	0,000

Tabla 30 Matriz de flujo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	0,00	10,05	49,50	18,23	35,98	42,80	5,20	0,00	15,08
2	0,00	0,00	5,23	0,00	0,00	7,34	0,00	0,00	0,00	0,00
3	7,20	5,01	0,00	5,26	8,45	11,12	0,00	0,00	0,00	0,00
4	48,06	0,00	4,40	0,00	0,00	0,00	0,00	13,34	0,00	11,08
5	20,15	0,00	8,61	0,00	0,00	0,00	0,00	17,73	0,00	0,00
6	33,36	5,64	10,37	0,00	0,00	0,00	29,40	0,00	0,00	8,61
7	38,14	0,00	0,00	0,00	0,00	26,05	0,00	0,00	1,75	7,59
8	8,46	0,00	0,00	16,92	13,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,91	0,00	0,00	6,47
10	12,07	0,00	0,00	10,26	0,00	7,09	6,62	0,00	7,23	0,00

Tabla 31 Matriz de flujo acumulado

Finalmente se sumarían dando 0,539

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
32,854	0,539	2,272	25,226	7,367	25,665	23,798	1,813	0,302	6,025

Tabla 32 Índice de sensibilidad HUB

### Índice de sensibilidad para la asignación de nodos a HUB

El índice de sensibilidad de nodos pretende atribuir en función del flujo entre dos nodos y la distancia que los separa, un valor representativo. La operación llevada a cabo divide la suma de flujos de entrada y salida entre dos nodos entre la distancia que los separa elevada al cubo. Con esta operación se pretende asignar nodos a HUBs los cuales tengan un mayor flujo entre ellos, pero penalizar uniones cuyos nodos estén muy separados.

$$IS_{\text{nodo } i} = \sum_j f_{ij} / \text{distancia}_{ij}^3$$

La operación descrita se hace para todos los nodos, independientemente vayan luego a convertirse en HUB o no.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	0,29	26,43	24,79	12,07	68,77	37,87	2,08	0,37	182,31
2	0,29	0,00	0,22	0,68	1,38	4,28	3,41	0,10	0,02	0,37
3	26,43	0,22	0,00	0,85	19,26	38,56	1,83	0,08	0,01	1,26
4	24,79	0,68	0,85	0,00	13,05	7,78	10,49	68,17	0,26	15,86
5	12,07	1,38	19,26	13,05	0,00	15,56	5,19	8,00	0,71	2,26
6	68,77	4,28	38,56	7,78	15,56	0,00	184,09	1,38	0,24	15,54
7	37,87	3,41	1,83	10,49	5,19	184,09	0,00	1,04	1,63	73,77
8	2,08	0,10	0,08	68,17	8,00	1,38	1,04	0,00	0,07	0,50
9	0,37	0,02	0,01	0,26	0,71	0,24	1,63	0,07	0,00	0,39
10	182,31	0,37	1,26	15,86	2,26	15,54	73,77	0,50	0,39	0,00

Tabla 33 Índices de sensibilidad

#### 4.4.3.3 Construcción

La fase de construcción comienza eligiendo la lista reducida de candidatos HUB. Esta elección se realiza en función del factor de selección de HUB (alfa-h). Cuanto mayor sea éste alfa-h más nodos del total podrán formar parte de la lista reducida de candidatos(LRCh), siendo los elegidos los que presente un mayor valor en el índice de sensibilidad.

En este caso alfa-h es 0.5, por lo que la LRCh empezará a elegir nodos desde el nodo:  $0,5 \cdot 10 = 5$ . Se seleccionan los nodos:

9	2	8	3	10	5	7	4	6	1
0,302	0,539	1,813	2,272	6,025	7,367	23,798	25,226	25,665	32,854

Tabla 34 lista reducida de candidatos nodo-HUB

Una vez conformada la LRCh se procederá a la elección de los nodos HUB. Esta elección se realizará de forma aleatoria de entre los nodos de la LRCh. Para esta simulación resultan ser los nodos 1,5,7.

Una vez elegidos los nodos HUB se deben asignar a éstos el resto de nodos en función del índice de sensibilidad de nodos, por ello este índice se reduce al estudio de los nodos HUB, creando el índice de sensibilidad de nodos reducido:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0,03	2,64	2,48	1,21	6,88	3,79	0,21	0,04	18,23
5	1,21	0,14	1,93	1,30	0	1,56	0,52	0,80	0,07	0,23
7	3,79	0,34	0,18	1,05	0,52	18,41	0	0,10	0,16	7,38

Tabla 35 Índice de sensibilidad nodos reducido

Al igual que para los nodos HUB sólo se tendrán en cuenta para el estudio posterior unos pocos hubs del total para la asignación de cada nodo. Este número dependerá del factor de selectividad de nodos (alfan), el cual en este caso es 0,8, por lo que el número de hubs estudiados por cada nodo será  $0,8 \cdot 3 = 2,4$ , redondeando  $\approx 2$ . Con este dato se elegirán en función del índice y se ordenarán según este los 2 hubs con mejores atributos para la asignación de cada nodo:

	2	3	4	6	8	9	10
1	7,00	1,00	1,00	7,00	5,00	7,00	1,00
2	5,00	5,00	10,00	1,00	1,00	5,00	7,00

*Tabla 36 Preferencia de asignación a hubs*

Para la asignación de los nodos a los hubs se recurre a una elección aleatoria:

HUBs	7	1	5	7	5	5	7
Nodos asignados	2	3	4	6	8	9	10

*Tabla 37 Asignación nodos-HUBs inicial*

Con esta primera asignación se puede calcular el coste de transporte de la red, dando como resultado: 1.644e+11Uds. monetarias.

#### 4.4.3.4 Búsqueda

La fase de búsqueda se encargará de comprobar la conveniencia de la asignación de los nodos a los HUBs. Para ello sustituirá para cada nodo el HUB correspondiente por uno de la tabla de preferencia de asignación. Este proceso lo realizará para todos los nodos y para todos los HUB candidatos, manteniendo la nueva asignación si el coste de transporte disminuye con respecto al inicial. Para ejemplificar el proceso sólo se realizará un cambio.

Se empieza con la matriz de asignación, donde están representados los nodos HUB en la diagonal principal y los nodos asignados a estos en las filas y columnas de los nodos HUB.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabla 38 Matriz asignación

En la primera iteración de búsqueda se cambiará la asignación del nodo 2 al HUB 7 por el HUB 5.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabla 39 Matriz asignación con cambio

Después de realizar este cambio se evaluará el coste de transporte, que con la nueva matriz de asignación será  $1.638e+11$  Uds. monetarias. Al ser un coste menor se mantendrá la asignación del nodo 2 al 5.

Este proceso se realizará para todos los nodos comprobando si otra asignación sería mejor. Al finalizar el proceso la matriz de asignación quedará:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabla 40 Matriz de asignación final

La asignación de nodos a HUB final será:

7	5	1	7	5	7	7
2	3	4	6	8	9	10

*Tabla 41 Asignación nodos-HUBs final*

Y el coste final de transporte de  $1.552e+11$  Uds. monetarias.

#### 4.5 CONCLUSIÓN

Como se ha podido estudiar a lo largo del capítulo se han implementado una serie de algoritmos de cálculo los cuales permiten conformar una herramienta de cálculo para dar soluciones al problema de asignación de HUBs. Esta herramienta se basa en una serie de características propias de las diversas consideraciones aplicadas al estudio de las redes y en consecuencia obtendrá soluciones acordes con esas características. El elemento más útil de esta herramienta es la versatilidad que permite su aplicación a multitud de redes, sin importar características tales con el número de nodos a estudiar o las características en el flujo de mercancías. Por último, se ha de destacar la incorporación de la no linealidad a la hora de modelar y estudiar las soluciones, esta no linealidad en la aplicación de los factores de descuento permite un modelado más acorde con la realidad y en consecuencia las soluciones dadas tendrán una mayor validez.

## 5 DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Los objetivos del experimento son además de proporcionar soluciones al problema de localización de centros de transporte, estudiar que variables influyen de mayor manera sobre el resultado final y qué alternativas se pueden utilizar para conseguir un buen resultado.

También se estudiará la relación coste-kilómetros de vías estudiando las soluciones no dominadas, construyendo una frontera de Pareto para determinar los km de vías del modo de transporte 2 (tren) necesarias (y en consecuencia el coste de las infraestructuras) en la red en función del número de hubs instalados.

### 5.2 PARÁMETROS A ESTUDIAR

#### Número de nodos de la red

Se estudiarán tres redes diferentes, aunque basadas en la red española de 47 provincias. La primera red constará de 16 nodos, la segunda de 34 y la tercera será la propia red española de 47 nodos en su conjunto. Las diferentes redes, una vez diseñadas a partir de la red de capitales de provincia son:

Red de 16 nodos, con una concentración de puntos de 140 km y eliminación de residuos a partir del 95 %:

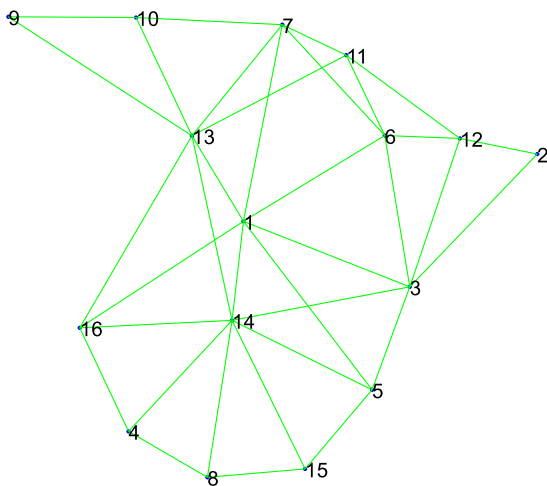


Fig. 24 Red 16 nodos, fuente: Elaboración propia.

Longitud	Latitud	Flujo	Núm.	Nombre
6,3	40,4	177,59	1	'Madrid'
12,2	41,4	126,16	2	'Barcelona'
9,6	39,5	141,07	3	'Valencia'
4,0	37,4	77,25	4	'Sevilla'
8,9	38,0	53,51	5	'Murcia'
9,1	41,7	47,81	6	'Zaragoza'
7,1	43,3	130,93	7	'Vizcaya'
5,6	36,7	71,43	8	'Málaga'
1,6	43,4	62,26	9	'La Coruña'
4,2	43,4	41,61	10	'Oviedo'
8,4	42,8	27,32	11	'Navarra'
10,6	41,6	22,50	12	'Lleida'
5,3	41,7	49,46	13	'Valladolid'
6,1	39,0	16,01	14	'Ciudad Real'
7,5	36,8	12,63	15	'Almería'
3,0	38,9	19,25	16	'Badajoz'

Tabla 42 Nodos Red 16

Red de 34 nodos, concentración de 70 kilómetros y eliminación de residuos del 95%

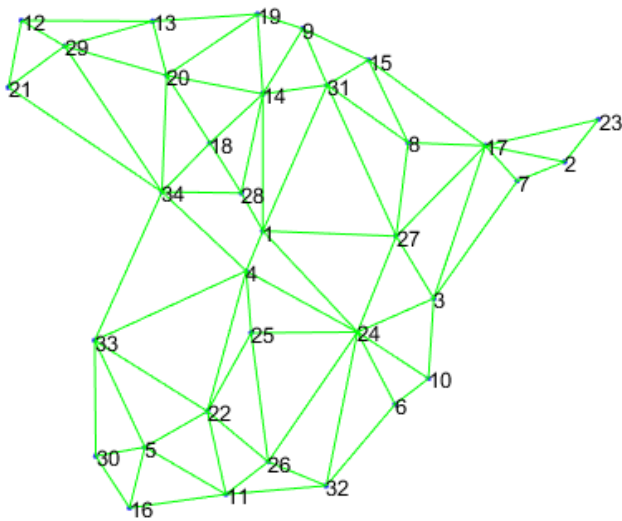


Fig. 25 Red 34 nodos, fuente: Elaboración propia.

Longitud	Latitud	Flujo	Núm.	Nombre
6,3	40,4	101,37	1	'Madrid'
12,2	41,4	72,10	2	'Barcelona'
9,6	39,5	94,38	3	'Valencia'
6,0	39,9	42,13	4	'Toledo'
4,0	37,4	40,93	5	'Sevilla'
8,9	38,0	37,46	6	'Murcia'
11,2	41,1	37,10	7	'Tarragona'
9,1	41,7	47,81	8	'Zaragoza'
7,1	43,3	53,88	9	'Vizcaya'
9,5	38,3	32,14	10	'Alicante'
5,6	36,7	25,40	11	'Málaga'
1,6	43,4	24,57	12	'La Coruña'
4,2	43,4	24,08	13	'Oviedo'
6,3	42,3	23,22	14	'Burgos'
8,4	42,8	45,68	15	'Navarra'
3,7	36,5	22,58	16	'Cádiz'
10,6	41,6	22,50	17	'Lleida'
5,3	41,7	32,32	18	'Valladolid'
6,2	43,5	18,35	19	'Santander'
4,4	42,6	17,53	20	'León'
1,4	42,4	17,37	21	'Pontevedra'
5,2	37,9	17,34	22	'Córdoba'
12,8	42,0	16,97	23	'Girona'
8,1	39,0	16,05	24	'Albacete'
6,1	39,0	16,01	25	'Ciudad Real'
6,4	37,2	28,70	26	'Granada'
8,9	40,3	26,73	27	'Teruel'
5,9	40,9	21,90	28	'Segovia'
2,4	43,0	20,33	29	'Lugo'
3,1	37,3	13,75	30	'Huelva'
7,6	42,5	17,11	31	'La Rioja'
7,5	36,8	12,63	32	'Almería'
3,0	38,9	19,25	33	'Badajoz'
4,3	41,0	17,13	34	'Salamanca'

Tabla 43 Nodos Red 34

Red de 47 nodos, red original:

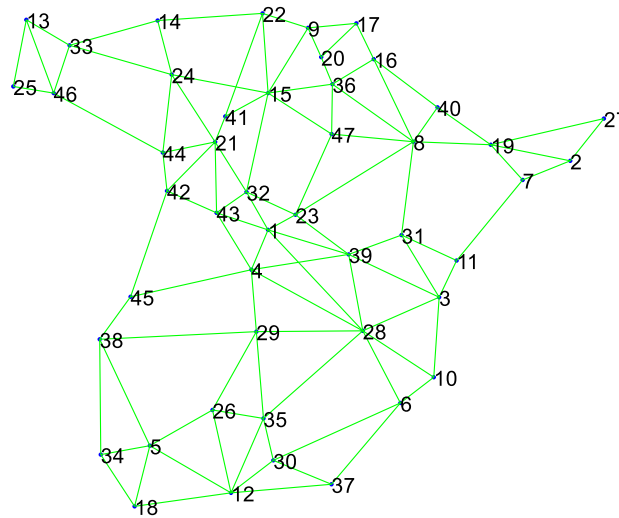


Fig. 26 Red 47 nodos, fuente: Elaboración propia.

Longitud	Latitud	Flujo	Núm.	Nombre	Longitud	Latitud	Flujo	Núm.	Nombre
6,30	40,42	83,82	1	'Madrid'	4,43	42,60	17,53	24	'León'
12,17	41,39	72,10	2	'Barcelona'	1,35	42,43	17,37	25	'Pontevedra'
9,62	39,47	64,38	3	'Valencia'	5,22	37,88	17,34	26	'Córdoba'
5,98	39,86	42,13	4	'Toledo'	12,82	41,98	16,97	27	'Girona'
4,00	37,38	40,93	5	'Sevilla'	8,14	39,00	16,05	28	'Albacete'
8,87	37,98	37,46	6	'Murcia'	6,07	38,99	16,01	29	'Ciudad Real'
11,25	41,12	37,10	7	'Tarragona'	6,40	37,18	15,75	30	'Granada'
9,12	41,66	35,69	8	'Zaragoza'	8,89	40,34	14,54	31	'Teruel'
7,08	43,26	33,07	9	'Vizcaya'	5,88	40,95	14,04	32	'Segovia'
9,52	38,35	32,14	10	'Alicante'	2,44	43,01	13,83	33	'Lugo'
9,96	39,99	30,01	11	'Castellón'	3,05	37,26	13,75	34	'Huelva'
5,58	36,72	25,40	12	'Málaga'	6,21	37,77	12,95	35	'Jaén'
1,60	43,37	24,57	13	'La Coruña'	7,55	42,47	12,88	36	'La Rioja'
4,16	43,36	24,08	14	'Oviedo'	7,53	36,84	12,63	37	'Almería'
6,30	42,34	23,22	15	'Burgos'	3,03	38,88	12,56	38	'Badajoz'
8,35	42,82	23,09	16	'Navarra'	7,87	40,07	12,19	39	'Cuenca'
8,02	43,32	22,59	17	'Guipúzcoa'	9,59	42,14	12,12	40	'Huesca'
3,71	36,53	22,58	18	'Cádiz'	5,47	42,01	11,53	41	'Palencia'
10,63	41,61	22,50	19	'Lleida'	4,34	40,96	9,38	42	'Salamanca'
7,33	42,85	20,81	20	'Álava'	5,30	40,66	7,86	43	'Ávila'
5,27	41,65	20,79	21	'Valladolid'	4,26	41,50	7,75	44	'Zamora'
6,19	43,46	18,35	22	'Santander'	3,63	39,48	6,70	45	'Cáceres'
6,83	40,63	17,54	23	'Guadalajara'	2,14	42,34	6,49	46	'Ourense'
					7,54	41,76	4,23	47	'Soria'

Tabla 44 Nodos Red 47

### Número de HUBS

Se estudiarán las diferentes redes con un determinado número de HUBs para asignar. En la primera red de 16 nodos se estudiará la asignación de 2 a 5 HUBs, en la segunda red de 34 nodos se asignarán de 2 a 6 HUBs. La tercera red se simulará dos veces, en la primera se asignarán de 5 a 8 HUBs y en la segunda los 4 primeros coincidirán con los puertos más importantes de país (Algeciras-Cádiz, Bilbao, Barcelona y Valencia).

### Factor de elección de HUBs

Como se ha indicado en la herramienta de cálculo, el factor de elección de hubs (alfa-h) indica que porcentaje de los nodos con mejor valoración de la red pueden ser candidatos a HUB. En las diferentes simulaciones se establece una serie de valores siendo 20%, 35%, 50%, 65% y 80% del total de nodos. En la Tabla 45 se indica en función del porcentaje el número de hubs que son candidatos a HUB en cada red.

Candidatos	20 %	35 %	50 %	65 %	80 %
16 Nodos	3	5	8	10	12
34 Nodos	7	12	17	22	27
47 Nodos	9	16	23	30	37

Tabla 45 Nodos candidatos a HUB

### Factor de elección de nodos-HUB

Al igual que el factor de elección de HUBs, el factor de elección de nodos-HUB se establece en 20%, 35%, 50%, 65% y 80% de los nodos HUB.

### Factor de descuento en el transporte

Los descuentos en el transporte se han establecido en tres niveles. El primer nivel de descuentos es el menor, con descuentos moderados. El segundo nivel son descuentos mayores, el mínimo descuento en el modo 2 de transporte (tren) es la mitad del coste de transporte que por autovía y el segundo aún menor. El tercer nivel reduce a menos de la mitad el coste de transporte por tren y si la línea es de gran capacidad el descuento es muy superior.

	Descuentos		
	1	2	3
Carretera 1	1	1	1
Carretera 2	0,9	0,9	0,8
Tren 1	0,5	0,45	0,35
Tren 2	0,4	0,3	0,2

Tabla 46 Descuentos

Las simulaciones que se van a realizar constarán de un número determinado de posibilidades a la hora de seleccionar los parámetros que anteriormente se han descrito. La combinación de estos parámetros da como resultado las siguientes posibilidades:

	Nº Hubs	Descuentos	alfa-h	alfa-n	Posibilidades
Red 16	2 a 5	1 a 3	5	5	300
Red 34	2 a 6	1 a 3	5	5	375
Red 47	4 a 8	1 a 3	5	5	375
Red 47 nf	5 a 8	1 a 3	5	5	300

*Tabla 47 Características de las simulaciones*

Estas posibilidades si se multiplican por el número de iteraciones en cada posibilidad da como resultado el número total de soluciones que dará el algoritmo. El número de iteraciones a ejecutar se ha tomado en base al tiempo de ejecución y las muestras necesarias para obtener un conjunto de soluciones suficientemente representativo. Más adelante se analizarán y justificaran estas elecciones, pero se adelanta que a partir de 50-100 iteraciones en función de la red es suficiente. Por otra parte, el tiempo de ejecución varía ampliamente entre una y otra red, siendo 0,015 segundos de media en la red de 16 nodos, 0,3 segundos en la de 34 nodos y 1,7 segundos en la de 47 nodos. En resumen, el número de iteraciones y el tiempo de ejecución que aproximadamente ha tomado en realizar las simulaciones:

	Posibilidades	Iteraciones	Soluciones	Tiempo medio (segundos)	Tiempo de simulación (horas)
Red 16	300	250	75000	0,015	0,31
Red 34	375	200	75000	0,3	6,25
Red 47	375	100	37500	1,7	17,71
Red 47 nf	300	200	60000	1,7	28,33

*Tabla 48 Nº soluciones y tiempo de ejecución*

Una vez realizadas las simulaciones se obtiene una tabla con cada una de las soluciones que se han obtenido con el algoritmo GRASP, donde se muestra el número de posibilidad, el coste de transporte, los kilómetros de vías de tren (suma de alta y baja capacidad), el tiempo de ejecución, el descuento que se ha aplicado, el número de HUBs asignado, los factores alfa y los HUBs elegidos.

La tabla obtenida presenta soluciones repetidas, las cuales son eliminadas, obteniendo una tabla con un menor número de soluciones. El número de soluciones repetidas depende del número de iteraciones (al ser un algoritmo aleatorio aumenta la probabilidad de repetirse), así como de los factores alfa.

Con el listado definitivo de soluciones se eligen aquellas que son soluciones no dominadas (frontera de Pareto) en base a los valores de coste y kilómetros de vías. Esto proporciona un estudio multivariable en base a estos dos atributos.

### 5.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como resultados del experimento se van a mostrar las gráficas con todas las soluciones generadas, así como las soluciones no dominadas de la frontera de Pareto. Las soluciones no dominadas se mostrarán en una tabla, con los datos relevantes de dicha solución y los HUBs seleccionados. Posteriormente se analizarán las soluciones y se mostrarán las más representativas.

#### 5.3.1 Simulación 1: estudio de una red de 16 nodos aplicando diferentes descuentos

##### 5.3.1.1 Red 16 nodos, aplicando descuento tipo 1

En la Fig. 27 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 16 nodos aplicando los descuentos tipo1. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 49 representa los valores dados de estas soluciones.

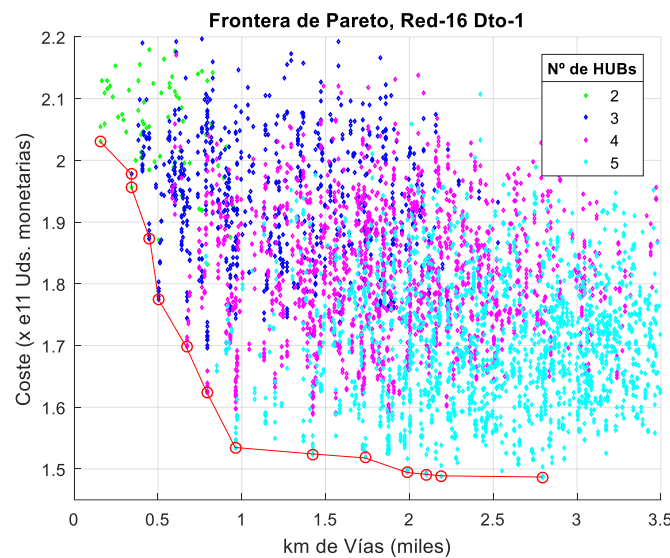


Fig. 27 Soluciones Red 16 Dto. 1, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs				
90	1,487	2,792	5	0,5	0,8	4	5	11	12	14
88	1,489	2,189	5	0,5	0,5	4	5	6	11	14
95	1,491	2,100	5	0,65	0,8	4	6	11	13	14
89	1,494	1,987	5	0,5	0,65	4	5	6	12	14
89	1,518	1,736	5	0,5	0,65	4	5	6	13	14
84	1,524	1,425	5	0,35	0,65	1	4	6	11	14
84	1,535	0,960	5	0,35	0,65	1	4	6	12	14
58	1,623	0,794	4	0,35	0,5	1	4	6	14	
58	1,697	0,670	4	0,35	0,5	1	6	12	14	
35	1,775	0,503	3	0,35	0,8	1	6	14		
35	1,872	0,451	3	0,35	0,8	1	4	14		
6	1,955	0,342	2	0,35	0,2	1	6			
40	1,978	0,339	3	0,5	0,8	1	13	14		
6	2,031	0,155	2	0,35	0,2	6	11			

Tabla 49 Soluciones no dominadas Red 16 Dto. 1



5.3.1.2 Red 16 nodos, aplicando descuento tipo 2

En la Fig. 28 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 16 nodos aplicando los descuentos tipo 2. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 50 representa los valores dados de estas soluciones.

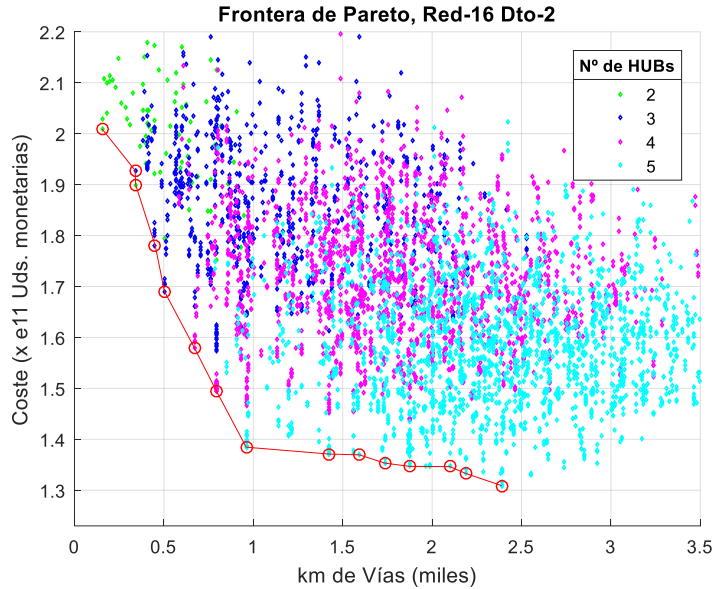


Fig. 28 Soluciones Red 16 Dto. 2, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs				
90	1,309	2,389	5	0,50	0,80	4	5	11	12	14
89	1,333	2,189	5	0,50	0,65	4	5	6	11	14
90	1,346	2,100	5	0,50	0,80	4	6	11	13	14
88	1,347	1,874	5	0,50	0,50	3	4	11	12	14
88	1,353	1,736	5	0,50	0,50	4	5	6	13	14
83	1,370	1,592	5	0,35	0,50	1	4	6	11	12
83	1,371	1,425	5	0,35	0,50	1	4	6	11	14
84	1,384	0,960	5	0,35	0,65	1	4	6	12	14
60	1,495	0,794	4	0,35	0,80	1	4	6	14	
60	1,580	0,670	4	0,35	0,80	1	6	12	14	
35	1,690	0,503	3	0,35	0,80	1	6	14		
35	1,780	0,451	3	0,35	0,80	1	4	14		
6	1,900	0,342	2	0,35	0,20	1	6			
40	1,928	0,339	3	0,50	0,80	1	13	14		
6	2,009	0,155	2	0,35	0,20	6	11			

Tabla 50 Soluciones no dominadas Red 16 Dto. 2

### 5.3.1.3 Red 16 nodos, aplicando descuento tipo 3

En la Fig. 29 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 16 nodos aplicando los descuentos tipo 3. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 51 representa los valores dados de estas soluciones.

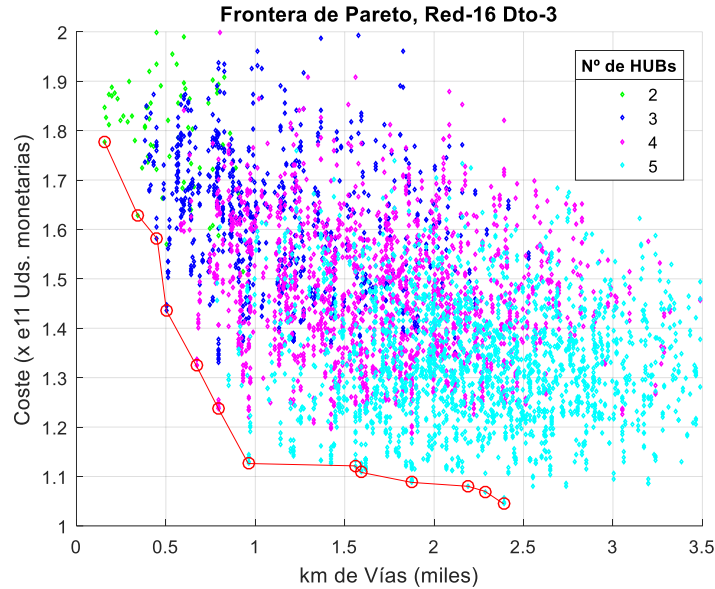


Fig. 29 Soluciones Red 16 Dto. 3, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs				
89	1,045	2,389	5	0,50	0,65	4	5	11	12	14
95	1,070	2,285	5	0,65	0,80	4	6	10	11	14
89	1,080	2,189	5	0,50	0,65	4	5	6	11	14
88	1,088	1,874	5	0,50	0,50	3	4	11	12	14
84	1,108	1,592	5	0,35	0,65	1	4	6	11	12
88	1,121	1,557	5	0,50	0,50	1	4	5	6	14
84	1,126	0,960	5	0,35	0,65	1	4	6	12	14
58	1,237	0,794	4	0,35	0,50	1	4	6	14	
60	1,325	0,670	4	0,35	0,80	1	6	12	14	
35	1,436	0,503	3	0,35	0,80	1	6	14		
35	1,581	0,451	3	0,35	0,80	1	4	14		
6	1,629	0,342	2	0,35	0,20	1	6			
6	1,778	0,155	2	0,35	0,20	6	11			

Tabla 51 Soluciones no dominadas Red 16 Dto. 3

5.3.1.4 Análisis de una red de 16 nodos

De los resultados obtenidos en las simulaciones de la red de 16 nodos se puede concluir: un factor de descuento mayor propicia que las soluciones obtenidas tengan un menor coste de transporte (Fig. 30). Las soluciones obtenidas son muy similares atendiendo a los HUBs seleccionados (Tabla 52), incluso algunas se repiten.

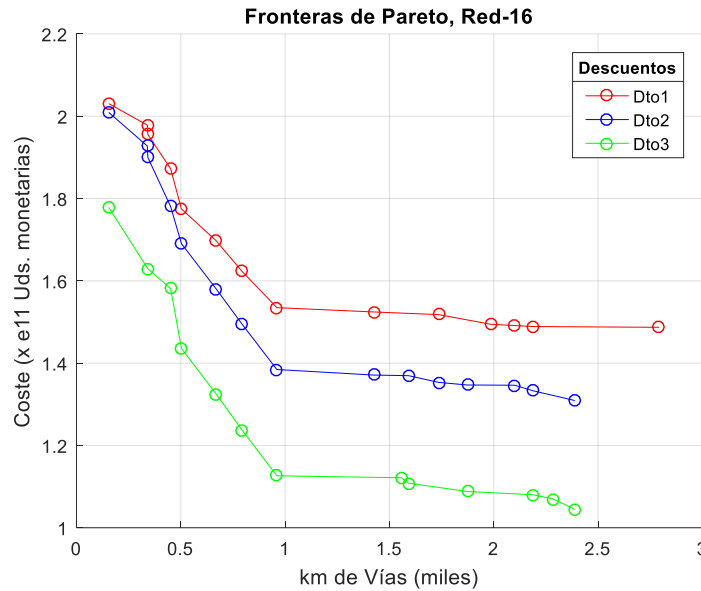


Fig. 30 Comparación soluciones no dominadas Red 16, fuente: Elaboración propia.

HUBs Dto. 1					HUBs Dto. 2					HUBs Dto. 3				
4	5	11	12	14	4	5	11	12	14	4	5	11	12	14
4	5	6	11	14	4	5	6	11	14	4	6	10	11	14
4	6	11	13	14	4	6	11	13	14	4	5	6	11	14
4	5	6	12	14	3	4	11	12	14	3	4	11	12	14
4	5	6	13	14	4	5	6	13	14	1	4	6	11	12
1	4	6	11	14	1	4	6	11	12	1	4	5	6	14
1	4	6	12	14	1	4	6	11	14	1	4	6	12	14
1	4	6	14		1	4	6	12	14	1	4	6	14	
1	6	12	14		1	4	6	14		1	6	12	14	
1	6	14			1	6	12	14		1	6	14		
1	4	14			1	6	14			1	4	14		
1	6				1	4	14			1	6			
1	13	14			1	6				6	11			
6	11				1	13	14							
					6	11								

Tabla 52 Comparación HUBs elegidos para los 3 Dtos

Para ilustrar las soluciones se representan las redes para cada elección de HUBs, comparando entre diversos descuentos. Los mapas representados muestran la red de carreteras y la red de ferrocarril, diferenciando en verde las vías de flujo menor (< 1% del flujo total), las azules las vías de flujo intermedio (1% < flujo vía < 5 %, del flujo total) y en rojo las vías de mayor flujo (> 5% del flujo total).

**Solución 1, Hubs seleccionados 4,6,11,13,14 descuentos 1 y 2**

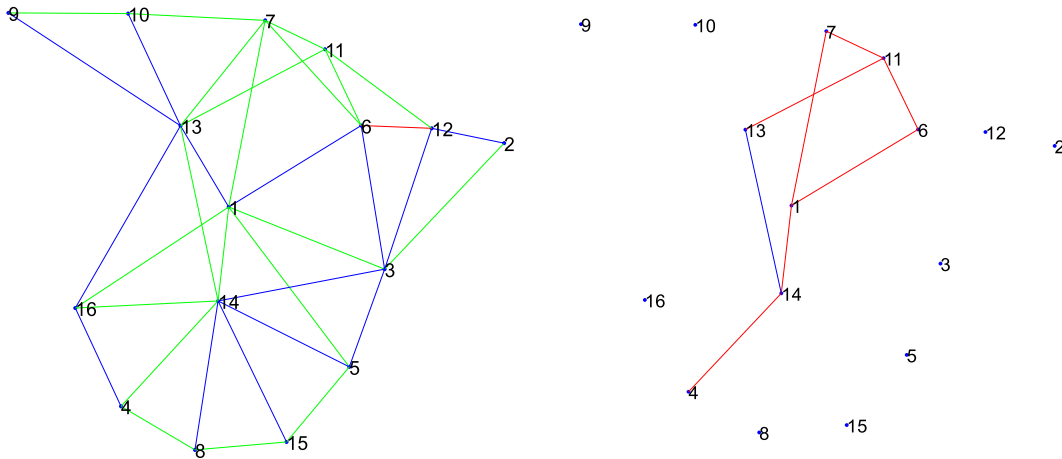


Fig. 31 Solución 1 Red16 Dto1, red carreteras y tren , fuente: Elaboración propia.

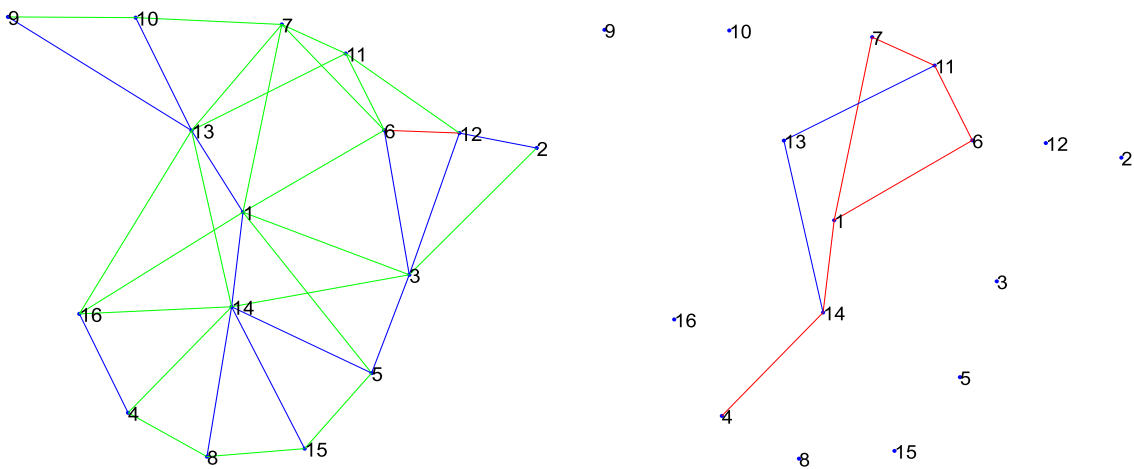


Fig. 32 Solución 1 Red16 Dto2, red carreteras y tren, fuente: Elaboración propia.)

En esta solución, el cambio de los descuentos aplicados a la red no tiene gran relevancia en el diseño final de la misma. El coste tampoco varía en gran medida (dto 1 1,95e11 Uds. – Dto2 1,9e11 Uds.).

Solució 2, Hubs seleccionados 1,4,6,12,14 descuentos 1,2,3

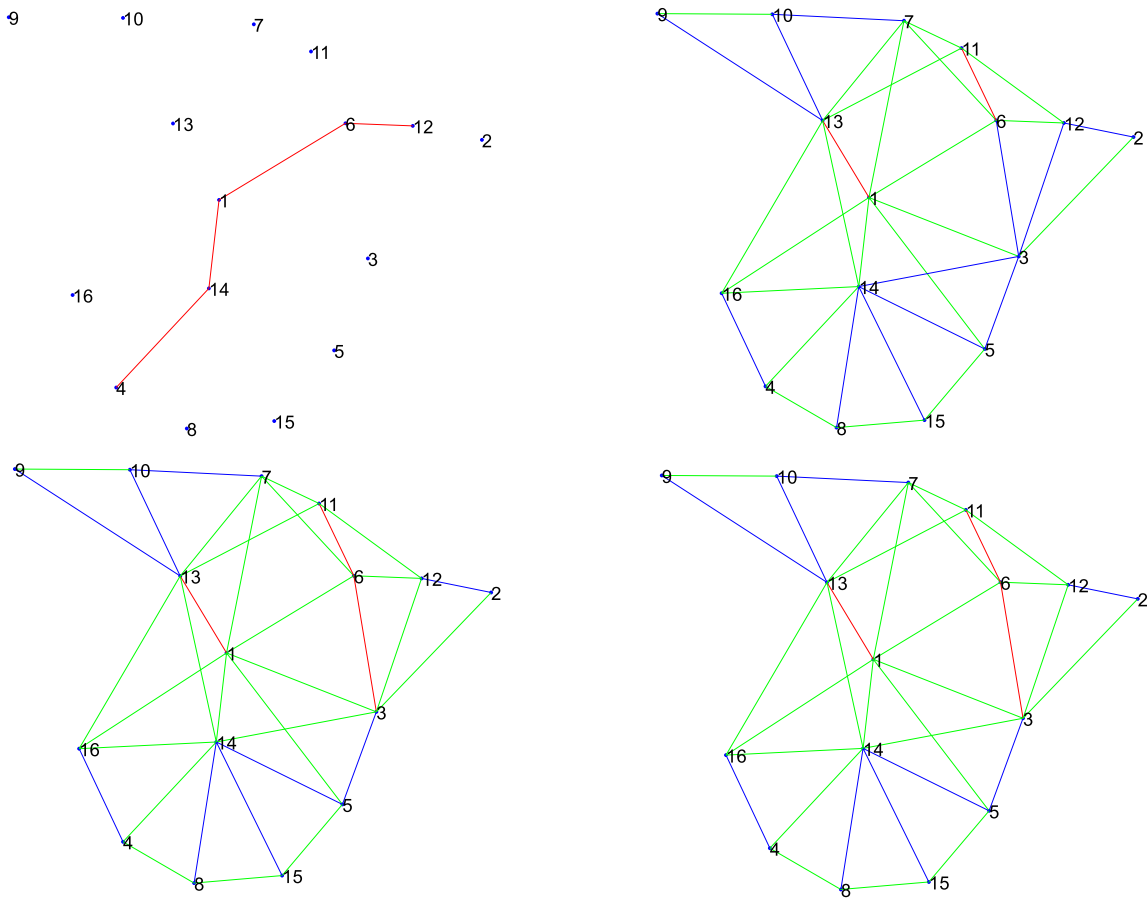


Fig. 33 Solució 2 Red16 Dtos. 1,2,3, red tren y comparativa red carreteras, fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar solo se ha representado una red de ferrocarril, dado que para las tres soluciones el diseño es el mismo. Por otra parte, se observa como la red de carreteras mantiene el mismo flujo de mercancías, excepto para los enlaces 6-3 y 3-12 del descuento 1.

Solució 3 Hubs seleccionados 1,4,14 descuentos 1 y

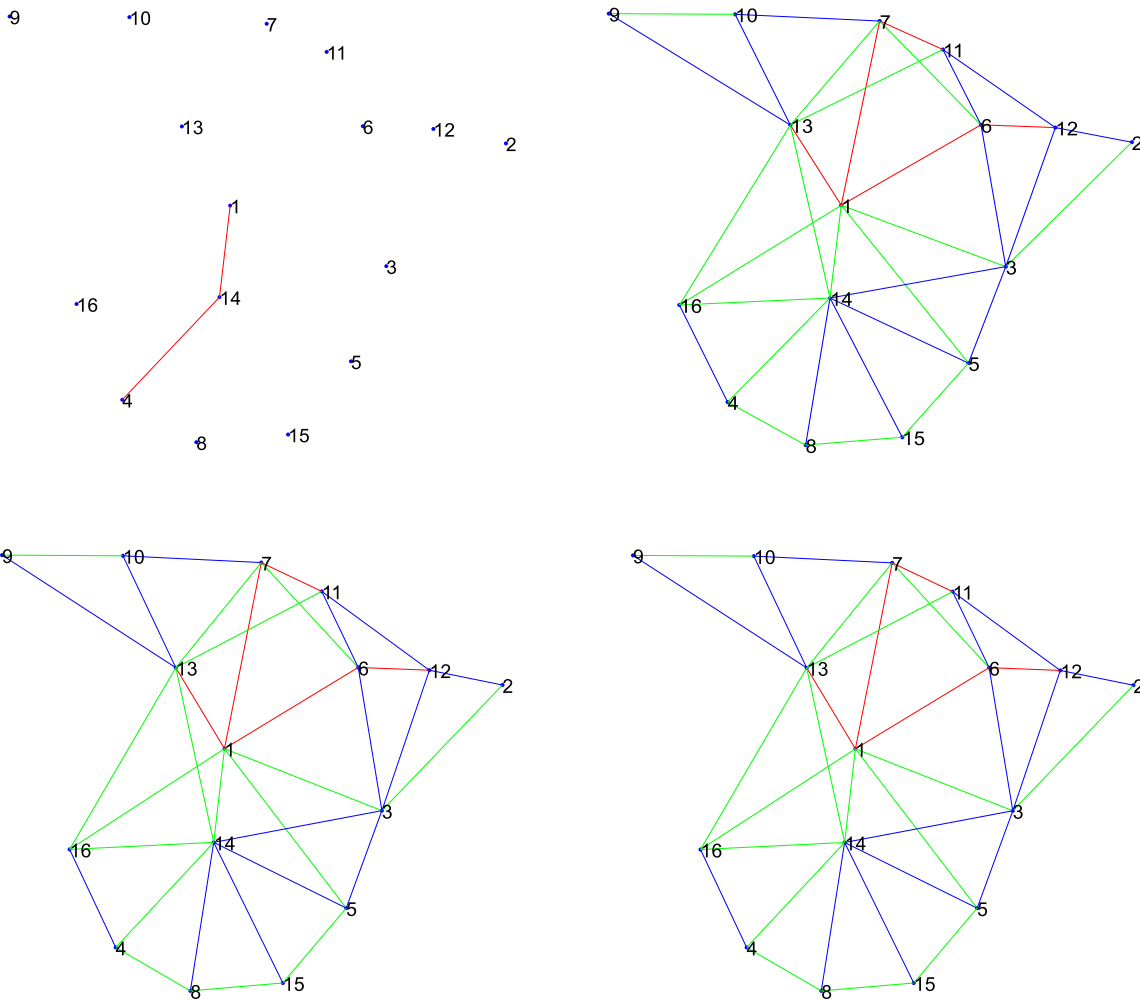


Fig. 34 Solució 3 Red16 Dtos 1,2,3, red carreteras y tren, fuente: Elaboración propia.

La tercera solució representada de la red de 16 nodos con los mismos HUBs, pero los tres descuentos también presentan la característica de tener un diseo y flujos similares para todos los descuentos.

5.3.1.4.1 Conclusió análisis red de una red de 16 nodos

Se puede deducir que para una red con pocos nodos la variación de los descuentos no supone un factor decisivo en la solució final, los nodos que localizan HUBs no cambian en gran medida .Dados los pocos enlaces entre nodos y al tener pocos enlaces totales el camino elegido entre los nodos no cambia en gran medida aunque sí lo haga el coste total de transporte debido a los descuentos aplicados, como se puede observar en la comparativa de las fronteras de Pareto entre los tres descuentos aplicados(Fig. 30).

5.3.2 Simulación 2: estudio de una red de 34 nodos aplicando diferentes descuentos

5.3.2.1 Red 34 nodos, aplicando descuento tipo 1

En la Fig. 35 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 34 nodos aplicando los descuentos tipo 1. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 53 representa los valores dados de estas soluciones.

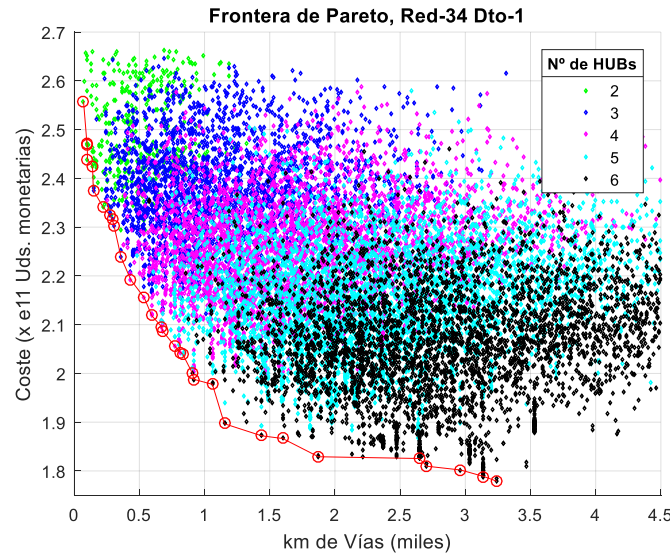


Fig. 35 Soluciones Red 34 Dto. 1, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs							
108	1,78	3,24	6	0,35	0,50	4	17	20	27	31	33		
104	1,79	3,14	6	0,20	0,65	4	20	22	27	31	33		
107	1,80	2,96	6	0,35	0,35	1	17	20	22	27	31		
109	1,81	2,70	6	0,35	0,65	4	8	20	27	31	33		
105	1,83	2,65	6	0,20	0,80	4	20	22	27	31	34		
110	1,83	1,87	6	0,35	0,80	4	8	20	22	27	31		
107	1,87	1,60	6	0,35	0,35	4	8	20	22	28	31		
110	1,87	1,44	6	0,35	0,80	1	4	8	20	22	31		
107	1,90	1,15	6	0,35	0,35	4	17	20	22	27	28		
107	1,98	1,06	6	0,35	0,35	1	4	22	27	28	34		
108	1,99	0,92	6	0,35	0,50	1	4	17	20	27	28		
109	2,00	0,91	6	0,35	0,65	1	4	17	22	27	28		
85	2,04	0,83	5	0,35	0,80	1	4	17	22	27			
55	2,04	0,81	4	0,20	0,80	4	22	27	34				
64	2,06	0,77	4	0,50	0,65	4	18	22	27				
58	2,09	0,68	4	0,35	0,5	4	20	27	28				
64	2,10	0,67	4	0,5	0,65	4	22	27	28				
59	2,12	0,59	4	0,35	0,65	1	4	22	27				
63	2,15	0,54	4	0,5	0,5	4	18	27	28				
58	2,19	0,44	4	0,35	0,5	1	4	27	28				
35	2,24	0,36	3	0,35	0,8	1	4	27					
31	2,30	0,31	3	0,35	0,2	1	4	22					
33	2,32	0,29	3	0,35	0,5	1	4	34					
40	2,32	0,28	3	0,5	0,8	14	18	31					
31	2,38	0,15	3	0,35	0,2	1	4	28					
12	2,42	0,14	2	0,5	0,35	18	20						
22	2,44	0,10	2	0,8	0,35	9	31						
16	2,47	0,10	2	0,65	0,2	5	16						
21	2,47	0,10	2	0,8	0,2	2	23						
6	2,56	0,07	2	0,35	0,2	1	4						

Tabla 53 Soluciones frontera de Pareto Red 34 Dto1

5.3.2.2 Red 34 nodos, aplicando descuento tipo 2

En la Fig. 36 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 34 nodos aplicando los descuentos tipo 2. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 54 representa los valores dados de estas soluciones.

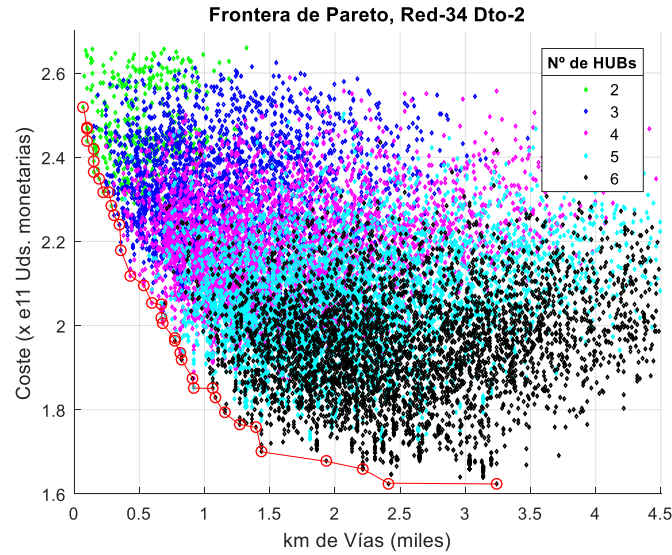


Fig. 36 Soluciones Red 34 Dto. 1, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs					
						4	17	20	27	31	33
110	1,624	3,241	6	0,35	0,80	4	17	20	27	31	33
106	1,626	2,410	6	0,35	0,20	4	17	20	22	27	31
110	1,659	2,213	6	0,35	0,80	4	17	20	22	31	34
110	1,677	1,935	6	0,35	0,80	4	8	22	31	33	34
108	1,700	1,438	6	0,35	0,50	4	8	20	22	28	31
118	1,758	1,398	6	0,65	0,50	1	16	17	20	22	27
108	1,765	1,267	6	0,35	0,50	4	20	22	27	28	34
81	1,793	1,152	5	0,35	0,20	4	17	20	22	27	
106	1,829	1,079	6	0,35	0,20	1	17	22	27	28	34
82	1,851	0,913	5	0,35	0,35	4	20	22	27	28	
106	1,874	0,908	6	0,35	0,20	1	4	17	22	27	28
110	1,918	0,827	6	0,35	0,80	1	4	8	20	27	28
53	1,935	0,814	4	0,20	0,50	4	22	27	34		
87	1,969	0,769	5	0,5	0,35	1	4	8	22	31	
69	2,005	0,679	4	0,65	0,65	4	20	27	28		
81	2,020	0,673	5	0,35	0,2	1	4	17	27	28	
95	2,049	0,665	5	0,65	0,8	1	3	4	18	27	
57	2,055	0,594	4	0,35	0,35	1	4	22	27		
60	2,097	0,535	4	0,35	0,8	1	27	28	34		
60	2,118	0,435	4	0,35	0,8	1	4	27	28		
35	2,178	0,360	3	0,35	0,8	1	4	27			
35	2,239	0,349	3	0,35	0,8	14	20	31			
31	2,261	0,306	3	0,35	0,2	1	4	22			
6	2,285	0,288	2	0,35	0,2	1	27				
37	2,316	0,266	3	0,5	0,35	14	18	34			
1	2,318	0,220	2	0,2	0,2	4	34				
6	2,349	0,196	2	0,35	0,2	8	31				
11	2,364	0,155	2	0,5	0,2	22	25				
6	2,390	0,147	2	0,35	0,2	4	28				
16	2,420	0,146	2	0,65	0,2	5	22				
24	2,438	0,102	2	0,8	0,65	9	31				
16	2,468	0,100	2	0,65	0,2	5	16				
21	2,470	0,098	2	0,8	0,2	2	23				
6	2,520	0,072	2	0,35	0,2	1	4				

Tabla 54 Soluciones frontera de Pareto Red 34 Dto2



5.3.2.3 Red 34 nodos, aplicando descuento tipo 3

En la Fig. 37 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 34 nodos aplicando los descuentos tipo 3. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 55 representa los valores dados de estas soluciones.

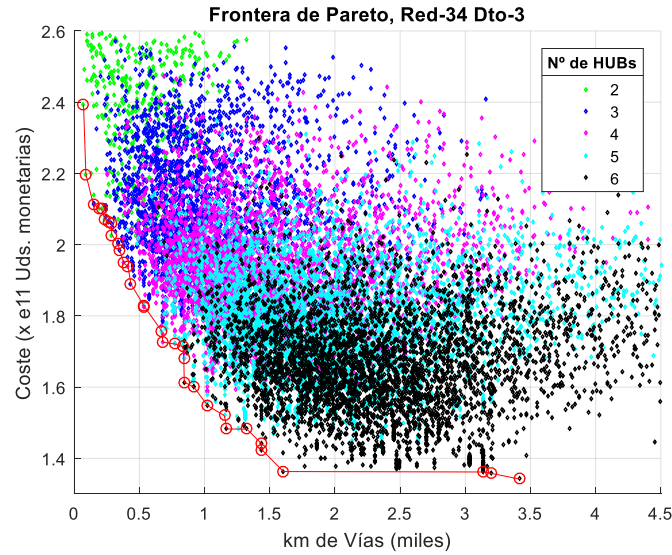


Fig. 37 Soluciones Red 34 Dto. 3, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs					
						2	4	20	27	31	33
115	1,342	3,414	6	0,50	0,80	2	4	20	27	31	33
108	1,358	3,197	6	0,35	0,50	4	17	20	22	31	33
104	1,362	3,141	6	0,20	0,65	4	20	22	27	31	33
108	1,363	1,604	6	0,35	0,50	4	8	17	20	22	31
108	1,425	1,438	6	0,35	0,50	1	4	8	20	22	31
125	1,442	1,435	6	0,80	0,80	2	4	20	27	28	33
112	1,482	1,325	6	0,50	0,35	2	17	20	22	27	28
107	1,482	1,171	6	0,35	0,35	4	8	20	27	28	33
87	1,520	1,152	5	0,50	0,35	4	17	20	22	27	
109	1,548	1,024	6	0,35	0,65	1	4	20	27	28	33
108	1,600	0,918	6	0,35	0,50	1	4	17	20	27	28
108	1,614	0,844	6	0,35	0,50	1	4	8	22	28	31
82	1,681	0,841	5	0,35	0,35	1	22	27	28	34	
83	1,713	0,835	5	0,35	0,50	4	14	17	27	28	
64	1,721	0,776	4	0,50	0,65	4	20	25	27		
59	1,726	0,679	4	0,35	0,65	4	20	27	28		
81	1,756	0,673	5	0,35	0,2	1	4	17	27	28	
65	1,827	0,538	4	0,5	0,8	4	18	27	28		
60	1,829	0,535	4	0,35	0,8	1	27	28	34		
31	1,890	0,435	3	0,35	0,2	4	27	28	0		
58	1,938	0,413	4	0,35	0,5	1	4	28	31		
59	1,948	0,381	4	0,35	0,65	1	4	22	28		
31	1,983	0,349	3	0,35	0,2	14	20	31			
35	2,003	0,336	3	0,35	0,8	8	14	31			
6	2,027	0,288	2	0,35	0,2	1	27				
35	2,061	0,285	3	0,35	0,8	1	4	14			
45	2,063	0,266	3	0,65	0,8	14	18	34			
1	2,072	0,234	2	0,2	0,2	4	22				
6	2,100	0,210	2	0,35	0,2	14	20				
6	2,101	0,196	2	0,35	0,2	8	31				
31	2,114	0,147	3	0,35	0,2	1	4	28			
16	2,198	0,090	2	0,65	0,2	13	20				
6	2,394	0,072	2	0,35	0,2	1	4				

Tabla 55 Soluciones frontera de Pareto Red 34 Dto3

5.3.2.4 Análisis de una Red de 34 nodos

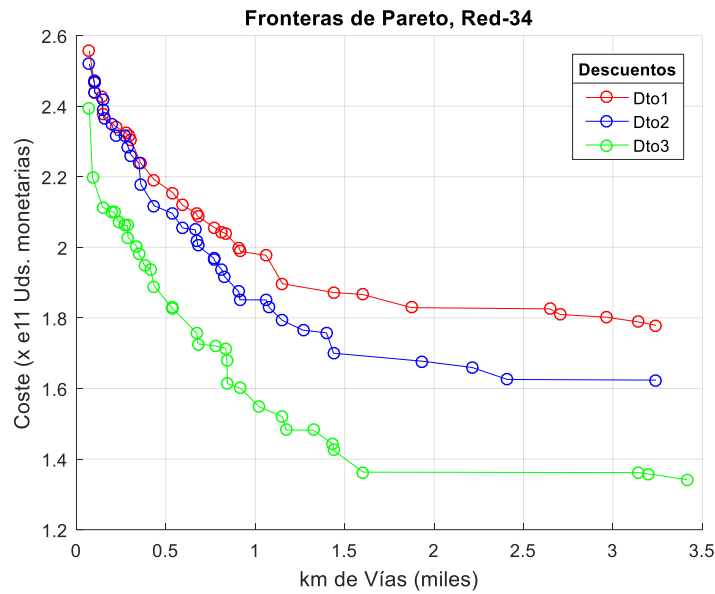


Fig. 38 Comparativa fronteras de Pareto Red 34, fuente: Elaboración propia.

HUBs Dto. 1						HUBs Dto. 2						HUBs Dto. 3					
4	17	20	27	31	33	4	17	20	27	31	33	2	4	20	27	31	33
4	20	22	27	31	33	4	17	20	22	27	31	4	17	20	22	31	33
1	17	20	22	27	31	4	17	20	22	31	34	4	20	22	27	31	33
4	8	20	27	31	33	4	8	22	31	33	34	4	8	17	20	22	31
4	20	22	27	31	34	4	8	20	22	28	31	1	4	8	20	22	31
4	8	20	22	27	31	1	16	17	20	22	27	2	4	20	27	28	33
4	8	20	22	28	31	4	20	22	27	28	34	2	17	20	22	27	28
1	4	8	20	22	31	4	17	20	22	27		4	8	20	27	28	33
4	17	20	22	27	28	1	17	22	27	28	34	4	17	20	22	27	
1	4	22	27	28	34	1	4	22	27	28	34	1	4	20	27	28	33
1	4	17	20	27	28	4	20	22	27	28		1	4	17	20	27	28
1	4	17	22	27	28	1	4	17	22	27	28	1	4	8	22	28	31
1	4	17	22	27		1	4	8	20	27	28	1	22	27	28	34	
4	22	27	34			4	22	27	34			4	14	17	27	28	
4	18	22	27			1	4	17	25	27	28	4	20	25	27		
4	20	27	28			1	4	8	22	31		4	20	27	28		
4	22	27	28			4	20	27	28			1	4	17	27	28	
1	4	22	27			1	4	17	27	28		4	18	27	28		
4	18	27	28			1	3	4	18	27		1	27	28	34		
1	4	27	28			1	4	22	27			4	27	28	0		
1	4	27				1	27	28	34			1	4	28	31		
1	4	22				1	4	27	28			1	4	22	28		
1	4	34				1	4	27				14	20	31			
14	18	31				14	20	31				8	14	31			
4	34					1	4	22				1	27				
1	4	28				1	27					1	4	14			
18	20					14	18	34				14	18	34			
9	31					4	34					4	22				
5	16					8	31					14	20				
2	23					22	25					8	31				
1	4					4	28					1	4	28			
						5	22					13	20				
						9	31					1	4				
						1	4										

Tabla 56 Asignación de Hubs soluciones Red 34

Solución 1 comparativa de asignación de HUBs centrales descuentos 1,2,3

Descuento 3, HUBs 1,4,22,28.

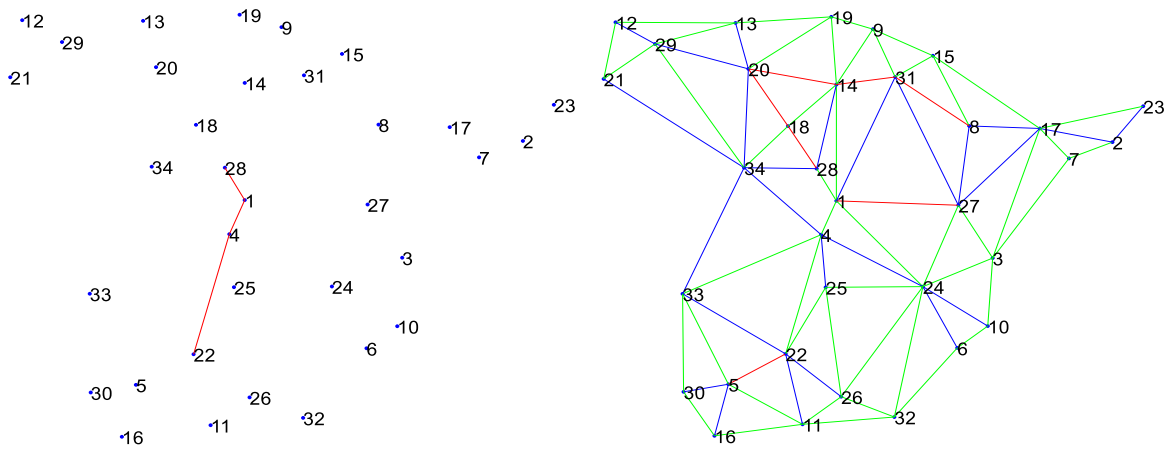


Fig. 39 Solución 1 Red34 Dto3, red carreteras y tren, fuente: Elaboración propia.

Descuento 1, HUBs 1,4,27,28.

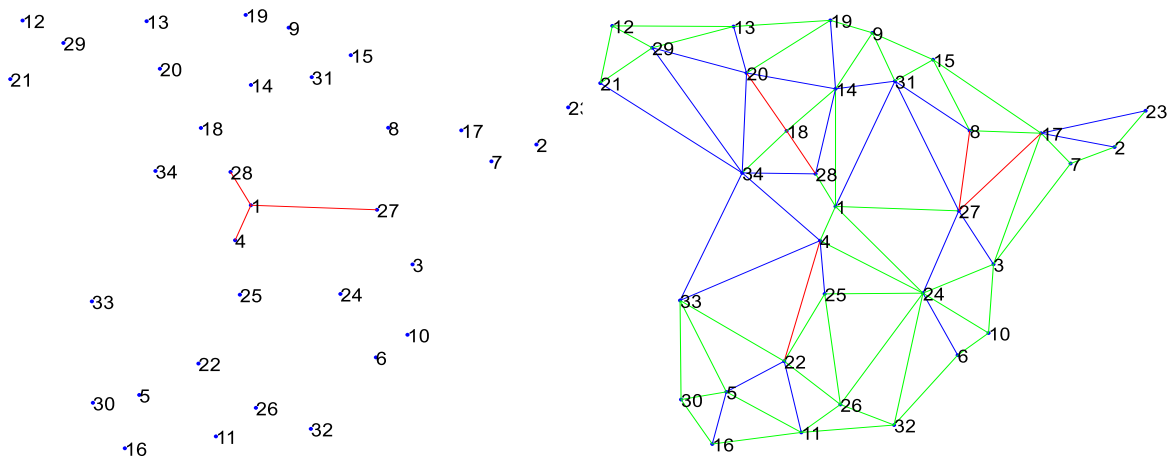


Fig. 40 Solución 1 Red34 Dto1, red carreteras y tren, fuente: Elaboración propia.

Descuento 2, HUBs 1,3,4,18,27

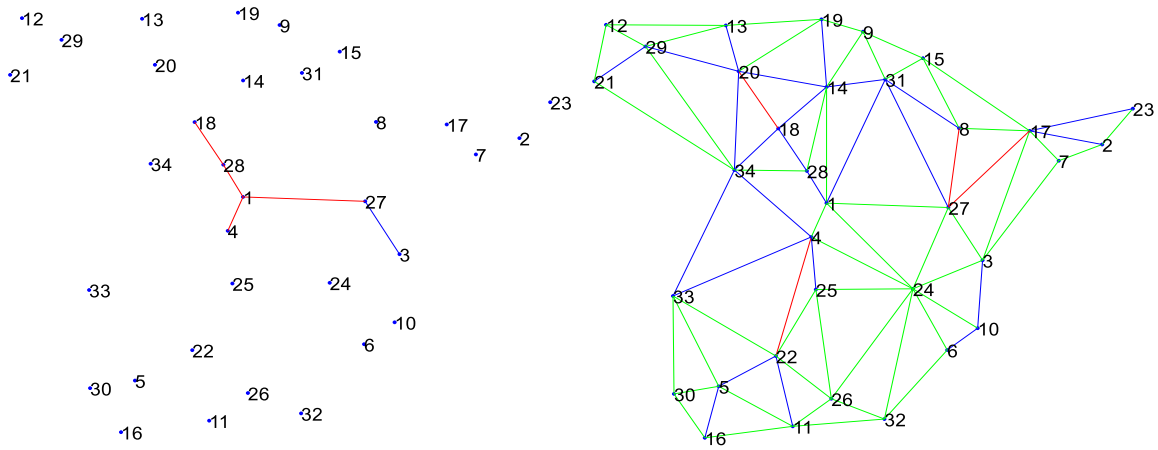


Fig. 41 Solución 1 Red16 Dto2, red carreteras y tren, fuente: Elaboración propia.

Como se puede deducir al observar las soluciones no dominadas para la red de 34 nodos, en la zona central, donde se concentran la solución con mejor relación coste/km de vías; destacan las soluciones con los nodos asignados 1,4,22,27 (Madrid, Toledo, Sevilla y Teruel) entre otros. Esto puede ser debido a que el propio algoritmo establece que es más rentable crear una red central de tamaño reducido por donde pase toda la mercancía y así se reduzcan los costes.

**Solución 2 comparativa entre diferentes asignaciones descuento 3**

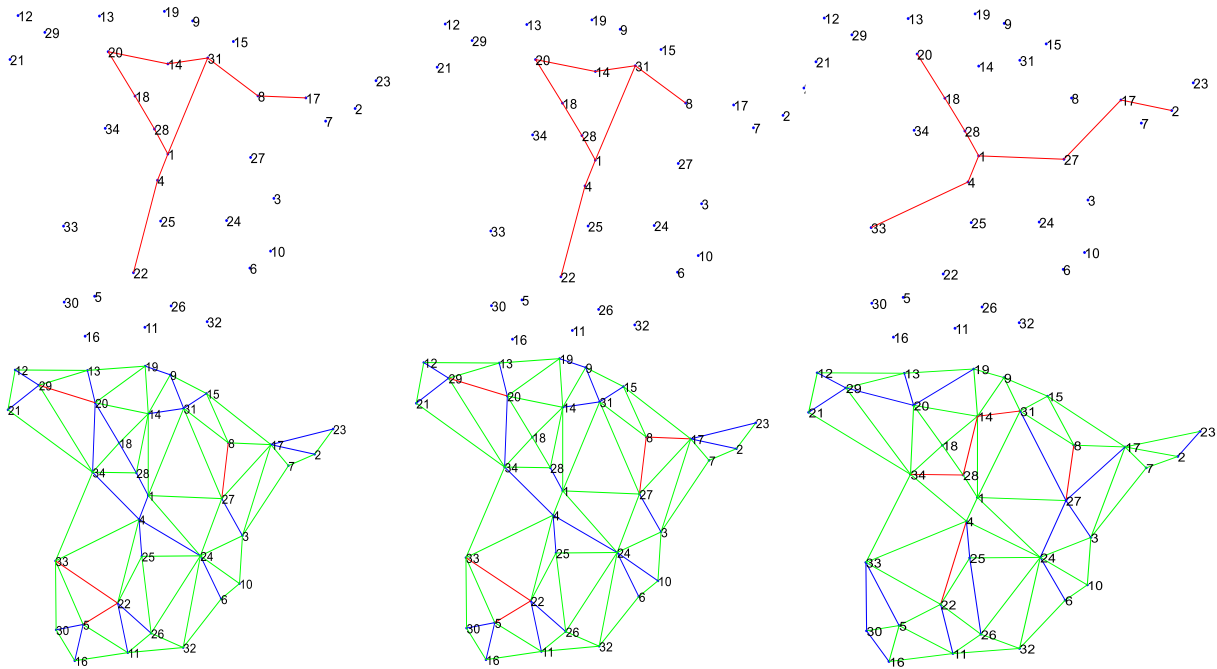


Fig. 42 Comparativa soluciones con Dto. 3, fuente: Elaboración propia.

Si se amplía el número de HUBs asignados y en consecuencia los kilómetros de vías, se puede observar que la tendencia es a construir un corredor norte-sur o este-oeste. La peculiaridad del mismo es el recorrido, el cual siempre incluye el nodo 1 o 4 (Madrid y Toledo) dada la cantidad de flujo que circula por el mismo.

### 5.3.3 Simulación 3: estudio de una red de 47 nodos aplicando diferentes descuentos

#### 5.3.3.1 Red 47 nodos, aplicando descuento tipo 1

En la Fig. 43 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 47 nodos aplicando los descuentos tipo 1. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 57 representa los valores dados de estas soluciones.

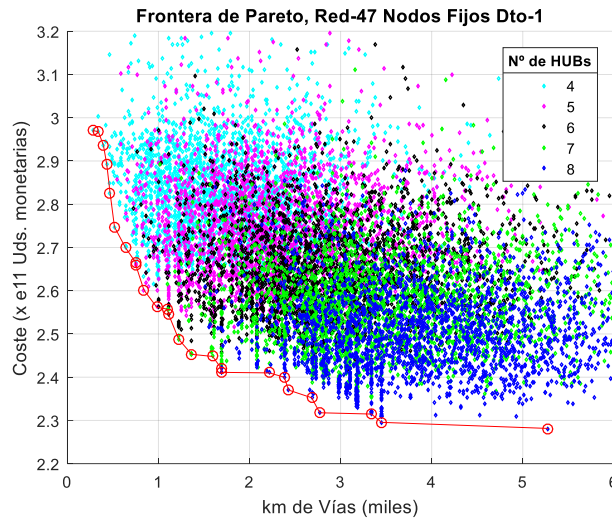


Fig. 43 Soluciones Red 47 Dto. 1, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs									
						3	7	27	29	36	40	43	45		
107	2,281	5,280	8	0,35	0,35	3	7	27	29	36	40	43	45		
104	2,296	3,449	8	0,20	0,65	1	3	7	8	27	28	29	42		
105	2,315	3,339	8	0,20	0,80	1	3	7	8	27	28	29	43		
115	2,318	2,771	8	0,50	0,80	1	7	27	29	40	42	45	47		
105	2,352	2,683	8	0,20	0,80	1	8	19	27	28	29	42	43		
105	2,370	2,428	8	0,20	0,80	3	7	8	19	27	28	42	43		
108	2,400	2,382	8	0,35	0,50	1	4	7	27	38	40	42	45		
105	2,410	2,217	8	0,20	0,80	1	7	8	19	28	29	42	43		
105	2,411	1,688	8	0,20	0,80	1	7	8	19	27	29	42	43		
105	2,421	1,688	8	0,20	0,80	1	7	8	19	27	29	42	43		
83	2,448	1,596	7	0,35	0,50	1	4	7	8	27	29	45			
85	2,453	1,365	7	0,35	0,80	8	19	23	27	29	42	43			
80	2,488	1,223	7	0,20	0,80	1	7	8	19	29	42	43			
58	2,546	1,110	6	0,35	0,50	8	19	23	29	42	43				
84	2,557	1,099	7	0,35	0,65	1	4	7	8	23	38	45			
28	2,562	0,983	5	0,2	0,5	1	8	19	27	29					
30	2,602	0,840	5	0,2	0,8	1	7	8	19	29					
29	2,660	0,751	5	0,2	0,65	1	7	8	19	43					
4	2,666	0,750	4	0,2	0,65	1	8	19	42						
6	2,748	0,517	4	0,35	0,2	1	8	19	23						
18	2,826	0,469	4	0,65	0,5	7	8	19	36						
6	2,936	0,397	4	0,35	0,2	3	7	11	19						
14	2,968	0,340	4	0,5	0,65	1	21	23	41						
16	2,970	0,277	4	0,65	0,2	15	21	41	42						

Tabla 57 Soluciones frontera de Pareto Red 47 Dto. 1

### 5.3.3.2 Red 47 nodos, aplicando descuento tipo 2

En la Fig. 44 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 47 nodos aplicando los descuentos tipo 2. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 58 representa los valores dados de estas soluciones.

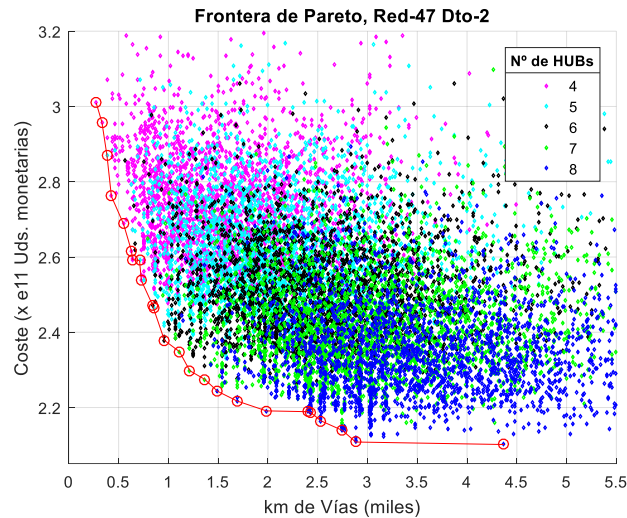


Fig. 44 Soluciones Red 47 Dto. 2, , fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs								
114	2,102	4,371	8	0,50	0,65	1	3	7	8	29	36	44	45	
105	2,108	2,881	8	0,20	0,80	1	3	7	8	27	28	29	42	
103	2,139	2,750	8	0,20	0,50	3	7	8	19	27	29	42	43	
103	2,165	2,533	8	0,20	0,50	1	3	7	19	27	28	29	42	
105	2,187	2,428	8	0,20	0,80	1	3	7	8	27	28	42	43	
105	2,189	2,402	8	0,20	0,80	3	7	19	27	28	29	42	43	
110	2,191	1,983	8	0,35	0,80	4	8	19	27	29	38	42	43	
104	2,217	1,688	8	0,20	0,65	1	7	8	19	27	29	42	43	
108	2,243	1,494	8	0,35	0,50	8	19	23	27	29	38	43	45	
78	2,275	1,365	7	0,20	0,50	1	8	19	27	29	42	43		
79	2,298	1,215	7	0,20	0,65	1	8	19	27	29	42	43		
84	2,349	1,111	7	0,35	0,65	4	8	19	23	28	42	43		
53	2,378	0,960	6	0,20	0,50	1	8	19	29	42	43			
29	2,464	0,850	5	0,20	0,65	1	8	19	29	43				
60	2,472	0,840	6	0,35	0,80	1	4	7	8	23	29			
4	2,538	0,728	4	0,2	0,65	1	8	19	29					
31	2,591	0,710	5	0,35	0,2	1	4	7	8	23				
9	2,593	0,639	4	0,35	0,65	1	8	19	43					
5	2,616	0,630	4	0,2	0,8	1	7	8	19					
10	2,688	0,549	4	0,35	0,8	1	4	8	43					
13	2,761	0,427	4	0,5	0,5	1	4	8	23					
38	2,870	0,383	5	0,5	0,5	15	21	36	41	44				
17	2,958	0,332	4	0,65	0,35	4	42	43	44					
8	3,009	0,275	4	0,35	0,5	1	4	23	29					

Tabla 58 Soluciones frontera de Pareto Red 47 Dto2

5.3.3.3 Red 47 nodos, aplicando descuento tipo 3

En la Fig. 45 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 47 nodos aplicando los descuentos tipo 3. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 59 representa los valores dados de estas soluciones.

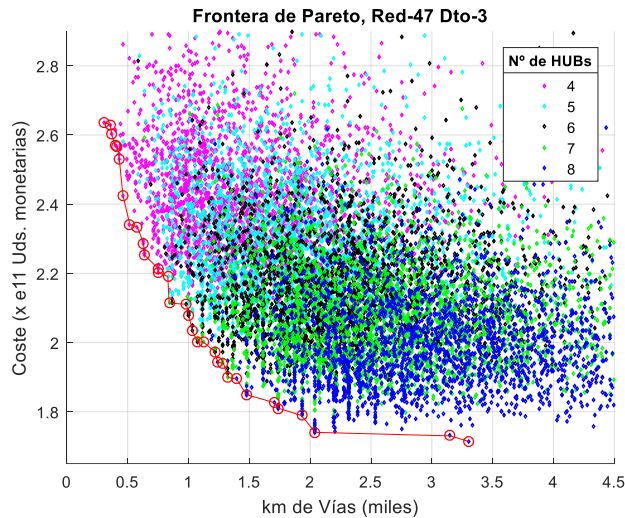


Fig. 45 Soluciones Red 47 Dto. 3, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs											
						7	19	21	27	28	29	36	38	43	44	45	
113	1,714	3,305	8	0,50	0,50	7	19	21	27	28	29	36	38				
113	1,730	3,148	8	0,50	0,50	3	4	7	27	28	44	45	47				
104	1,740	2,041	8	0,20	0,65	3	7	8	27	28	29	42	43				
102	1,789	1,930	8	0,20	0,35	1	3	7	8	27	28	29	43				
104	1,810	1,738	8	0,20	0,65	1	8	19	27	28	29	42	43				
108	1,826	1,711	8	0,35	0,50	1	7	8	27	29	40	43	45				
103	1,849	1,477	8	0,20	0,50	1	7	8	19	27	29	42	43				
106	1,896	1,393	8	0,35	0,20	1	8	19	23	27	29	43	45				
80	1,899	1,327	7	0,20	0,80	1	7	8	19	27	29	42					
79	1,941	1,285	7	0,20	0,65	1	8	19	27	28	42	43					
109	1,942	1,239	8	0,35	0,65	1	4	8	19	29	38	43	45				
54	1,974	1,215	6	0,20	0,65	1	8	19	27	29	42						
83	2,002	1,120	7	0,35	0,50	4	7	8	19	23	43	45					
53	2,002	1,073	6	0,20	0,50	1	7	8	19	29	42						
54	2,034	1,031	6	0,20	0,65	1	8	19	28	42	43						
54	2,078	1,004	6	0,2	0,65	1	8	19	27	42	43						
58	2,111	0,983	6	0,35	0,5	1	8	19	23	27	29						
85	2,114	0,840	7	0,35	0,8	1	4	7	8	19	23	29					
31	2,191	0,830	5	0,35	0,2	1	4	8	19	42							
4	2,202	0,751	4	0,2	0,65	1	7	8	43								
5	2,215	0,750	4	0,2	0,8	1	8	19	42								
3	2,253	0,639	4	0,2	0,5	1	8	19	43								
2	2,287	0,630	4	0,2	0,35	1	7	8	19								
4	2,334	0,579	4	0,2	0,65	1	8	42	43								
13	2,341	0,517	4	0,5	0,5	1	8	19	23								
13	2,424	0,461	4	0,5	0,5	8	15	21	36								
15	2,532	0,430	4	0,5	0,8	15	21	32	47								
12	2,565	0,414	4	0,5	0,35	15	41	44	47								
13	2,569	0,397	4	0,5	0,5	3	7	11	19								
11	2,603	0,367	4	0,5	0,2	1	23	42	44								
23	2,630	0,356	4	0,8	0,5	1	4	32	41								
13	2,637	0,304	4	0,5	0,5	15	21	41	43								

Tabla 59 Soluciones frontera de Pareto Red 47 Dto3

5.3.3.4 Análisis de una Red de 47 nodos

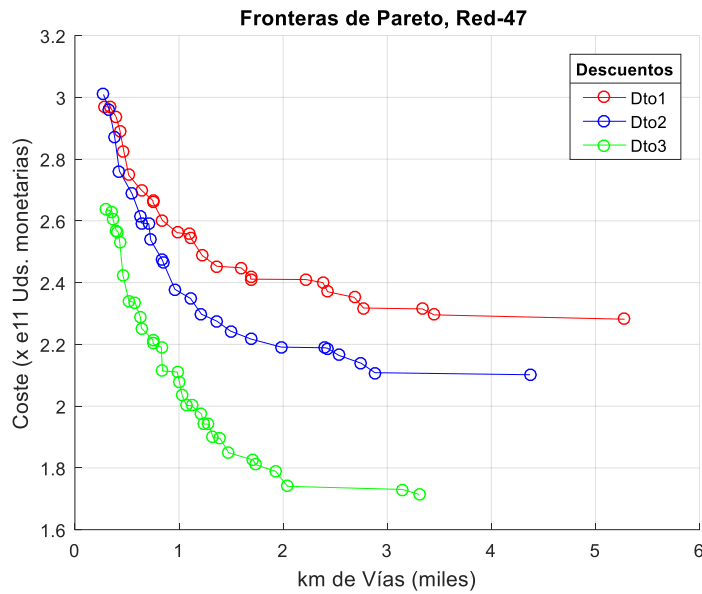


Fig. 46 Comparación soluciones no dominadas Red 47, fuente: Elaboración propia.

HUBs Dto 1								HUBs Dto 2								HUBs Dto 3							
3	7	27	29	36	40	43	45	1	3	7	8	29	36	44	45	7	19	21	27	28	29	36	38
1	3	7	8	27	28	29	42	1	3	7	8	27	28	29	42	3	4	7	27	29	44	45	47
1	3	7	8	27	28	29	43	3	7	8	19	27	29	42	43	3	7	8	27	28	29	42	43
1	7	27	29	40	42	45	47	1	3	7	19	27	28	29	42	1	3	7	8	27	28	29	43
1	8	19	27	28	29	42	43	1	3	7	8	27	28	42	43	1	8	19	27	28	29	42	43
3	7	8	19	27	28	42	43	3	7	19	27	28	29	42	43	1	7	8	27	29	40	43	45
1	4	7	27	38	40	42	45	4	8	19	27	29	38	42	43	1	7	8	19	27	29	42	43
1	7	8	19	28	29	42	43	1	7	8	19	27	29	42	43	1	8	19	23	27	29	43	45
1	7	8	19	27	29	42	43	8	19	23	27	29	38	43	45	1	7	8	19	27	29	42	
1	7	8	19	27	29	42	43	1	8	19	27	29	42	43		1	8	19	27	28	42	43	
1	4	7	8	27	29	45		1	8	19	27	29	42	43		1	4	8	19	29	38	43	45
8	19	23	27	29	42	43		4	8	19	23	28	42	43		1	8	19	27	29	42		
1	7	8	19	29	42	43		1	8	19	29	42	43			4	7	8	19	23	43	45	
8	19	23	29	42	43			1	8	19	29	43				1	7	8	19	29	42		
1	4	7	8	23	38	45		1	4	7	8	23	29			1	8	19	28	42	43		
1	8	19	27	29				1	8	19	29					1	8	19	27	42	43		
1	7	8	19	29				1	4	7	8	23				1	8	19	23	27	29		
1	7	8	19	43				1	8	19	43					1	4	7	8	19	23	29	
1	8	19	42					1	7	8	19					1	4	8	19	42			
1	8	19	43					1	4	8	43					1	7	8	43				
1	8	19	23					1	4	8	23					1	8	19	42				
7	8	19	36					15	21	36	41	44				1	8	19	43				
1	4	23	45					4	42	43	44					1	7	8	19				
3	7	11	19					1	4	23	29					1	8	42	43				
1	21	23	41													1	8	19	23				
15	21	41	42													8	15	21	36				
																15	21	32	47				
																15	41	44	47				
																3	7	11	19				
																1	23	42	44				
																1	4	32	41				
																15	21	41	43				

Tabla 60 Soluciones frontera de Pareto red 47



Al estudiar la red española sin reducir el número de nodos se observa cómo las soluciones siguen la tendencia general de disminución de coste en función del descuento aplicado. Como elemento a destacar de estas soluciones creadas es la asignación de HUBs, la cual selecciona las provincias del centro de la península y la propia capital en multitud de soluciones. Otro elemento a destacar es la no elección de la segunda provincia por tráfico de flujo (Barcelona) en ninguna solución, sin embargo, sí que se eligen las provincias cercanas.

Solución 1 comparativa de asignación de HUBs descuentos 1,2,3

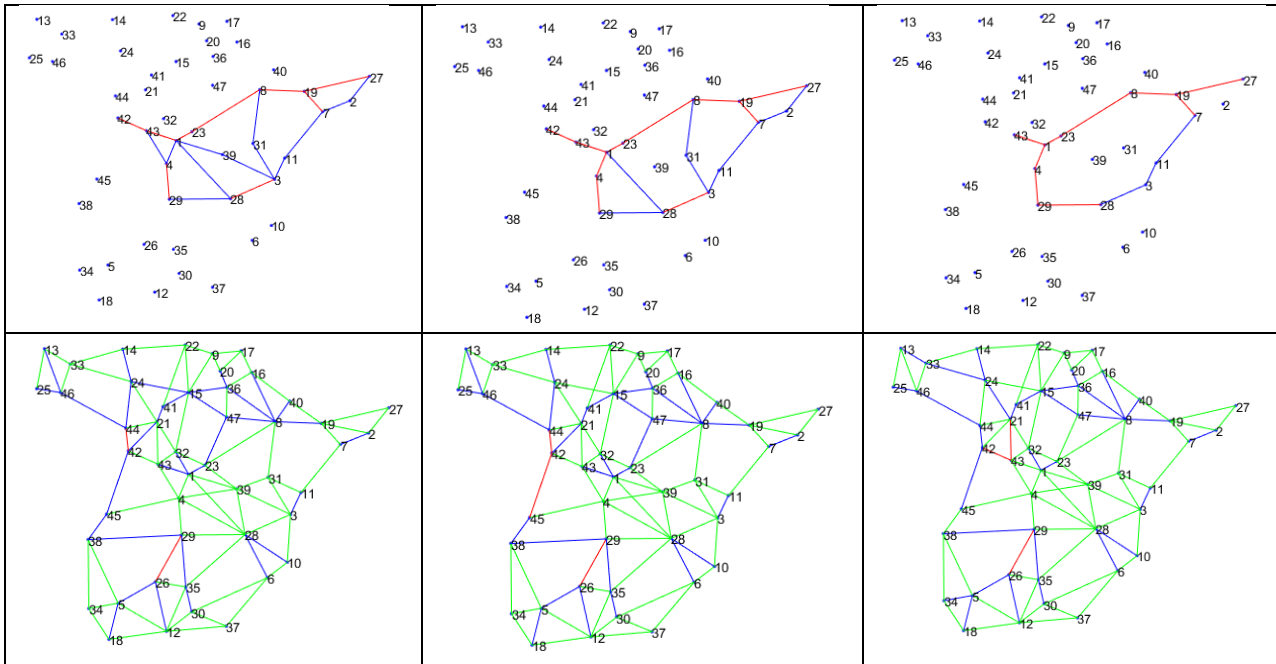


Fig. 47 Comparativa asignación Dtos 1,2,3, fuente: Elaboración propia.

En el análisis de esta comparativa hay que destacar que, a pesar de la elección de los mismos nodos como HUBs 1,3,7,8,27,28,29 y 42, la cantidad de kilómetros de ferrocarril disminuye en proporción al factor de descuento empleado. Esto se puede observar en la Fig. 47, donde en el descuento 1 se aprecia más cantidad e kilómetro de vías que con el descuento 2 y el 3 .

Otra conclusión es que, si se permite un número mayor de kilómetros de vías además de seguir un corredor central basado en Madrid- Barcelona, también se incluyen líneas que conecten Madrid- Valencia- Barcelona.

Comparativa de soluciones de asignación de HUBs descuento 1

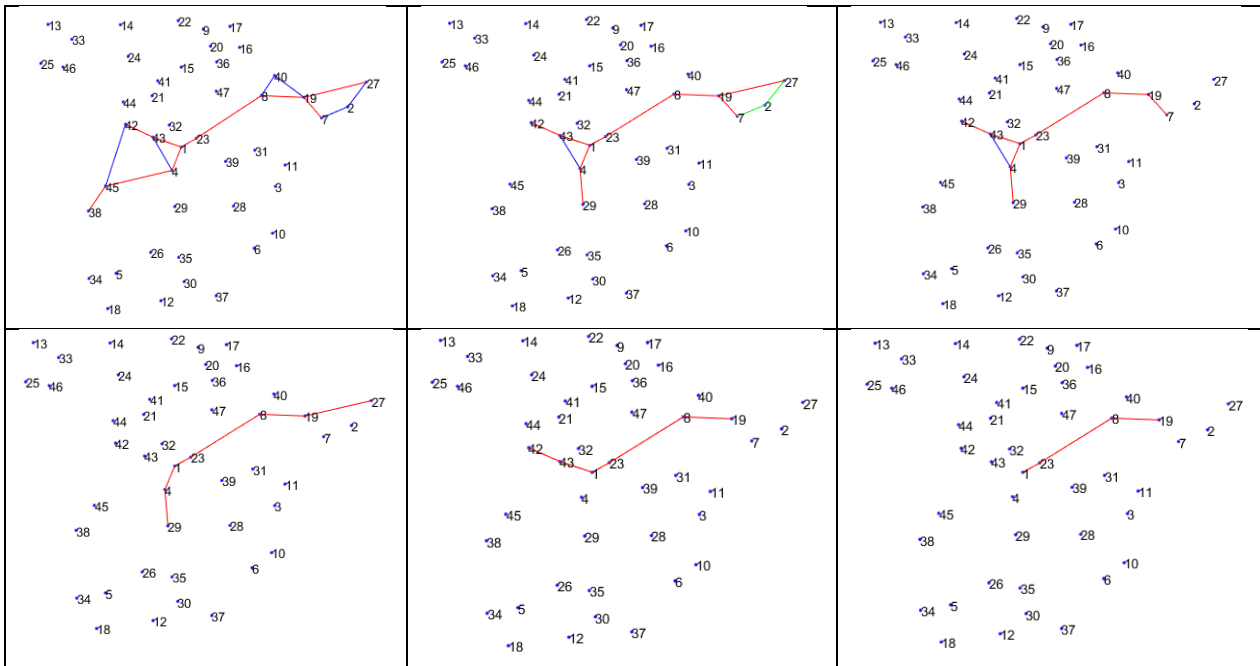


Fig. 48 Comparativa soluciones Red 47 Dto1, fuente: Elaboración propia.

Comparativa de soluciones de asignación de HUBs descuento 2

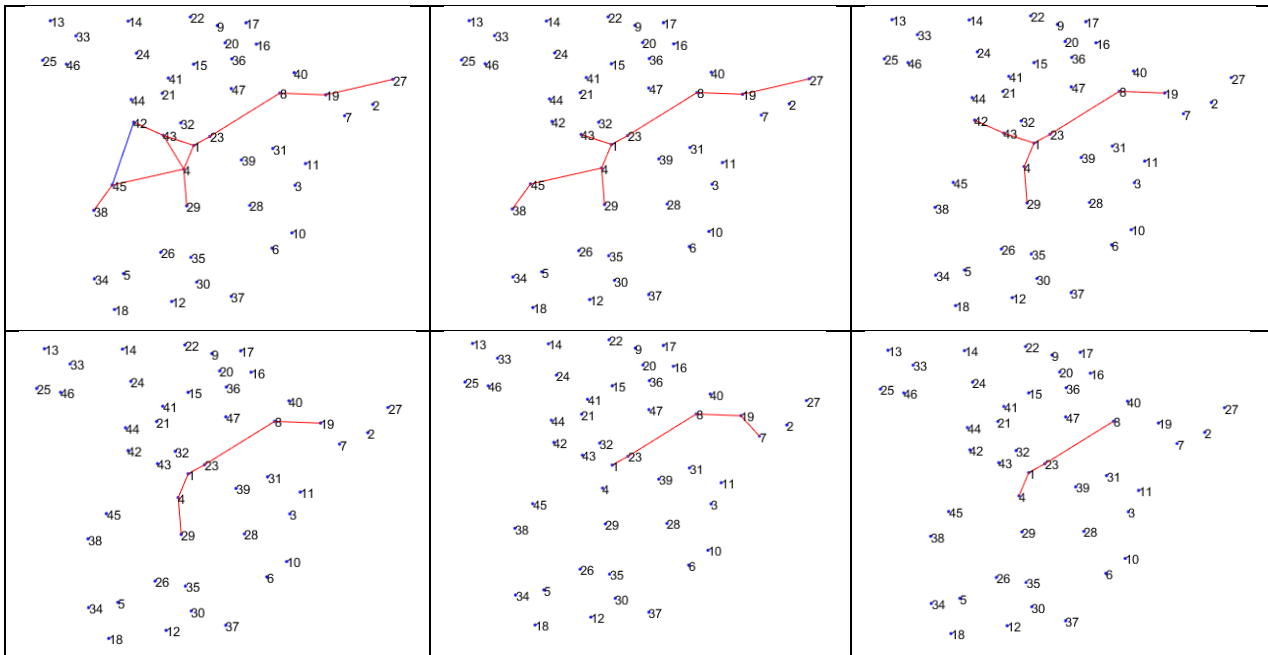


Fig. 49 Comparativa soluciones Red 47 Dto. 2 , fuente: Elaboración propia.

**Comparativa de soluciones de asignación de HUBs descuento 3**

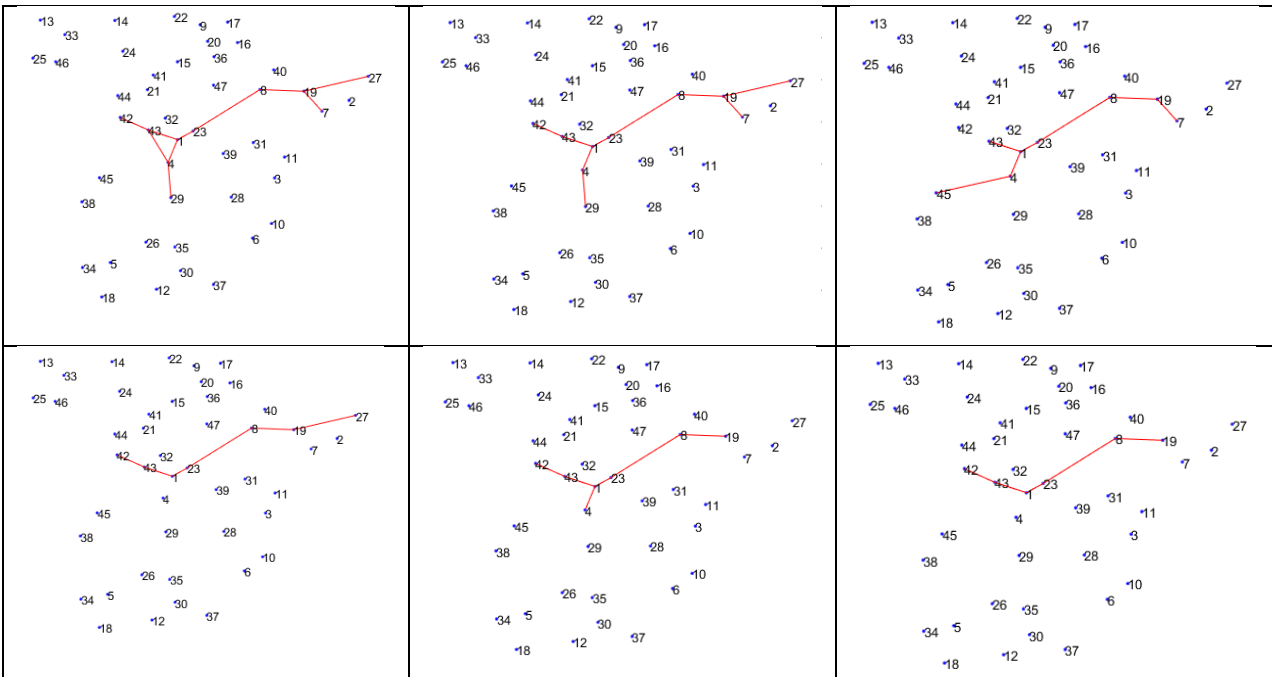


Fig. 50 Comparativa soluciones Red 47 Dto. 3, fuente: Elaboración propia.

Ante la comparativa de las soluciones para diversos factores de descuento se observa cómo el propio factor de descuento no afecta a la tendencia general en el trazado de la red de ferrocarril. La tendencia del trazado tiende a conectar Madrid y provincias cercanas del sur- oeste con Barcelona. Otro elemento a estudiar es la conexión por carretera. Como ejemplo se muestra la red de carretera de la última red de ferrocarril de la Fig. 50. En esta red se puede deducir que la tendencia es a implementar una red de carreteras que conecte provincias lejanas con el nodo HUB más cercano, y a su vez aprovechando la concentración de flujo hacia las carreteras de mayor flujo.

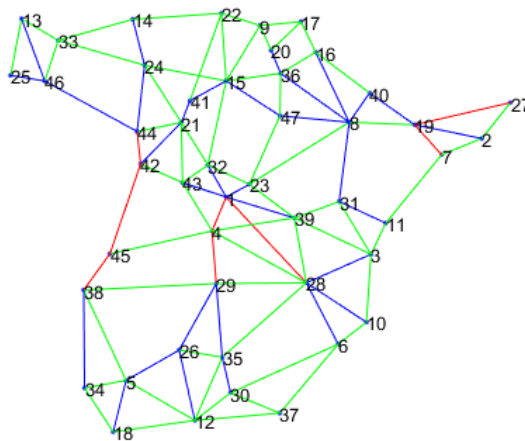


Fig. 51 Red de carreteras Red 47 Dto3, fuente: Elaboración propia.

5.3.4 Simulación 4: estudio de una red de 47 nodos con nodos fijos, aplicando diferentes descuentos

5.3.4.1 Red 47 nodos con nodos fijos, aplicando descuento tipo 1

En la Fig. 52 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 47 nodos aplicando los descuentos tipo 1. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 61 representa los valores dados de estas soluciones.

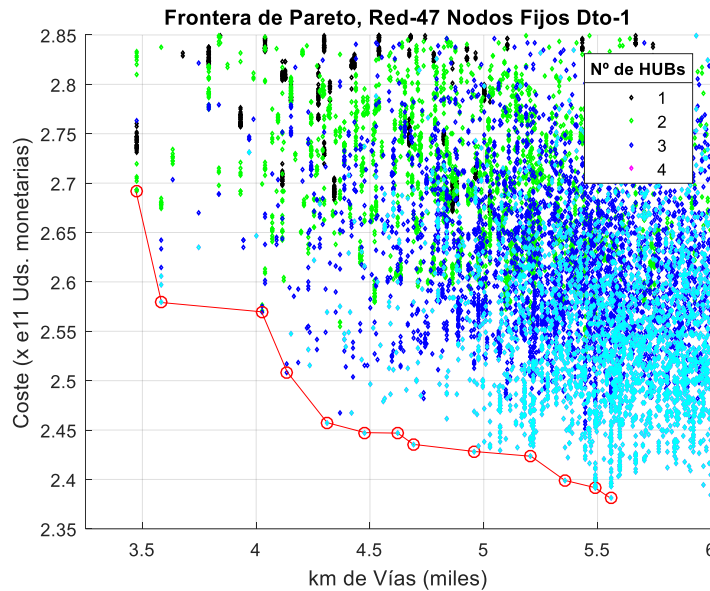


Fig. 52 Soluciones Red 47 Nodos Fijos Dto. 1, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs											
78	2,381	5,559	4	0,20	0,50	2	3	7	8	9	18	29	43				
79	2,392	5,487	4	0,20	0,65	1	2	3	8	9	18	29	42				
89	2,399	5,356	4	0,50	0,65	2	3	8	9	18	21	29	32				
78	2,423	5,208	4	0,20	0,50	1	2	3	7	8	9	18	42				
79	2,428	4,958	4	0,20	0,65	1	2	3	8	9	18	28	42				
92	2,436	4,691	4	0,65	0,35	2	3	4	9	15	18	26	43				
94	2,447	4,622	4	0,65	0,65	2	3	4	9	15	18	21	26				
92	2,447	4,478	4	0,65	0,35	1	2	3	9	18	19	26	43				
99	2,457	4,312	4	0,80	0,65	2	3	8	9	15	18	26	32				
70	2,509	4,136	3	0,65	0,80	1	2	3	9	18	19	26					
75	2,570	4,024	3	0,80	0,80	1	2	3	5	9	18	26					
92	2,579	3,584	4	0,65	0,35	2	3	7	9	18	19	36	41				
44	2,691	3,472	2	0,65	0,65	2	3	9	18	36	41						

Tabla 61 Soluciones frontera de Pareto Red 47 nodos fijos Dto1

### 5.3.4.2 Red 47 nodos con nodos fijos, aplicando descuento tipo 2

En la Fig. 53 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 47 nodos aplicando los descuentos tipo 2. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 62 representa los valores dados de estas soluciones.

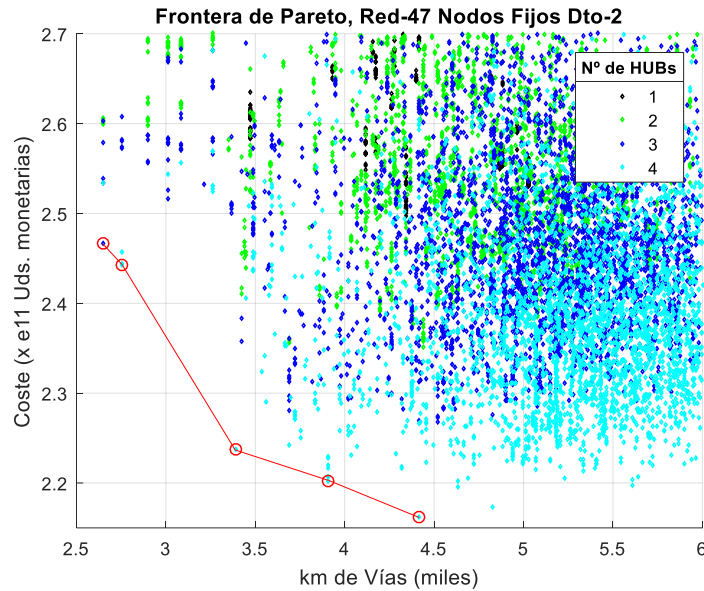


Fig. 53 Soluciones Red 47 Nodos Fijos Dto. 2, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs											
92	2,162	4,417	4	0,65	0,35	1	2	3	8	9	18	21	35				
79	2,203	3,910	4	0,20	0,65	2	3	8	9	18	28	29	43				
92	2,237	3,388	4	0,65	0,35	2	3	4	7	9	18	21	26				
77	2,443	2,755	4	0,20	0,35	2	3	9	18	19	27	28	29				
69	2,466	2,647	3	0,65	0,65	2	3	7	9	18	26	29					

Tabla 62 Soluciones frontera de Pareto Red 47 nodos fijos Dto2

5.3.4.3 Red 47 nodos con nodos fijos, aplicando descuento tipo 3

En la Fig. 54 se representan las diferentes soluciones (25000) obtenidas para la red de 47 nodos aplicando los descuentos tipo 3. También se han destacado las soluciones no dominadas encontradas, la Tabla 63 representa los valores dados de estas soluciones.

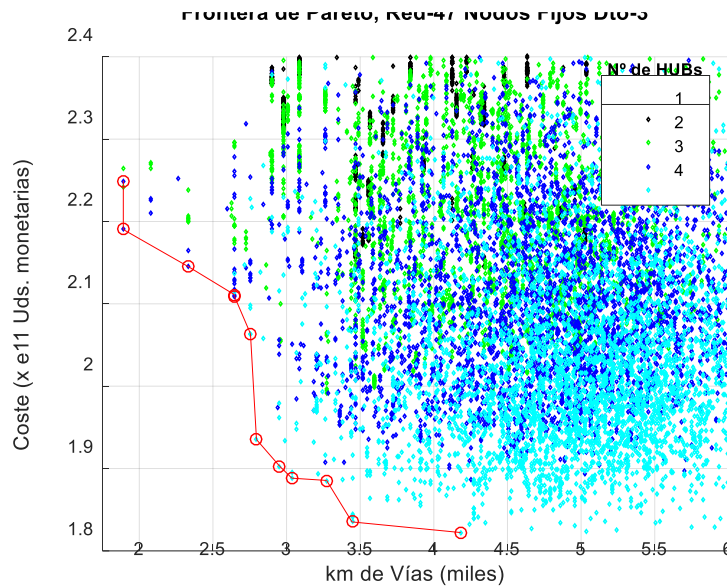


Fig. 54 Soluciones Red 47 Nodos Fijos Dto. 3, fuente: Elaboración propia.

Iter	Coste	kmVías	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs							
89	1,822	4,182	4	0,50	0,65	2	3	9	18	21	28	38	40
80	1,835	3,444	4	0,20	0,80	2	3	7	8	9	18	29	43
99	1,886	3,272	4	0,80	0,65	2	3	4	9	18	21	28	29
92	1,888	3,036	4	0,65	0,35	2	3	7	9	18	21	29	32
93	1,903	2,954	4	0,65	0,50	1	2	3	7	9	18	38	41
88	1,935	2,796	4	0,50	0,50	2	3	4	7	9	15	18	29
77	2,064	2,755	4	0,20	0,35	2	3	9	18	19	27	28	29
70	2,109	2,647	3	0,65	0,80	2	3	7	9	18	26	29	
62	2,111	2,647	3	0,50	0,35	2	3	9	18	19	28	29	
73	2,145	2,335	3	0,80	0,50	2	3	5	9	18	26	36	
73	2,190	1,892	3	0,80	0,50	2	3	5	7	9	18	35	
70	2,249	1,892	3	0,65	0,80	2	3	7	9	11	18	26	

Tabla 63 Soluciones frontera de Pareto Red 47 nodos fijos Dto3

5.3.4.4 Análisis de una Red de 47 nodos con nodos fijos

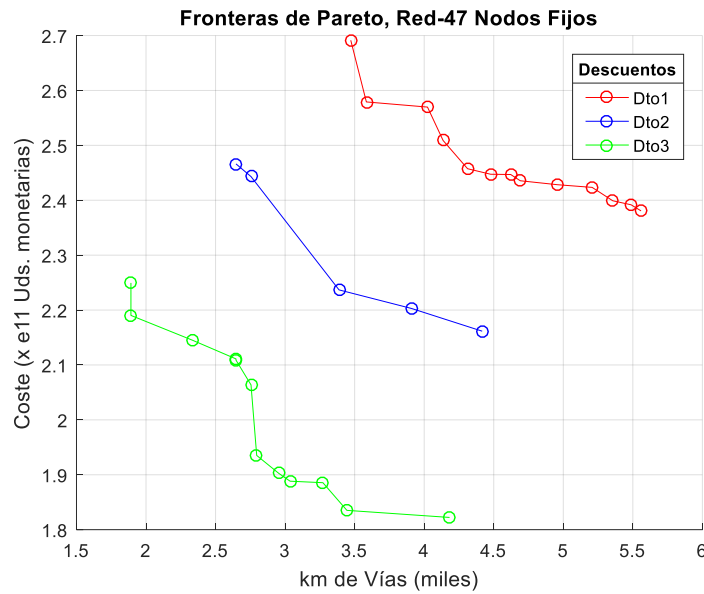


Fig. 55 Comparación soluciones no dominadas Red 47 Nodos Fijos, fuente: Elaboración propia.

HUBs Dto. 1								HUBs Dto. 2							HUBs Dto. 3								
2	3	7	8	9	18	29	43	1	2	3	8	9	18	21	35	2	3	9	18	21	28	38	40
1	2	3	8	9	18	29	42	2	3	8	9	18	28	29	43	2	3	7	8	9	18	29	43
2	3	8	9	18	21	29	32	2	3	4	7	9	18	21	26	2	3	4	9	18	21	28	29
1	2	3	7	8	9	18	42	2	3	9	18	19	27	28	29	2	3	7	9	18	21	29	32
1	2	3	8	9	18	28	42	2	3	7	9	18	26	29	1	2	3	7	9	18	38	41	
2	3	4	9	15	18	26	43								2	3	4	7	9	15	18	29	
2	3	4	9	15	18	21	26								2	3	9	18	19	27	28	29	
1	2	3	9	18	19	26	43								2	3	7	9	18	26	29		
2	3	8	9	15	18	26	32								2	3	9	18	19	28	29		
1	2	3	9	18	19	26									2	3	5	9	18	26	36		
1	2	3	5	9	18	26									2	3	5	7	9	18	35		
2	3	7	9	18	19	36	41								2	3	7	9	11	18	26		
2	3	9	18	36	41																		

Tabla 64 Soluciones frontera de Pareto red 47 con nodos fijos

La red de 47 nodos con nodos fijos como HUBs en cada solución es el intento de representar con la mayor fidelidad posible la red de transporte española, donde los puertos más importantes tienen una infraestructura de conexión mediante ferrocarril.

En este caso la comparativa de las soluciones no dominadas (Fig. 55) arroja una gran desviación de costes y kilómetros de vías entre los diferentes factores de descuento.

Comparativa soluciones no dominadas descuento 1

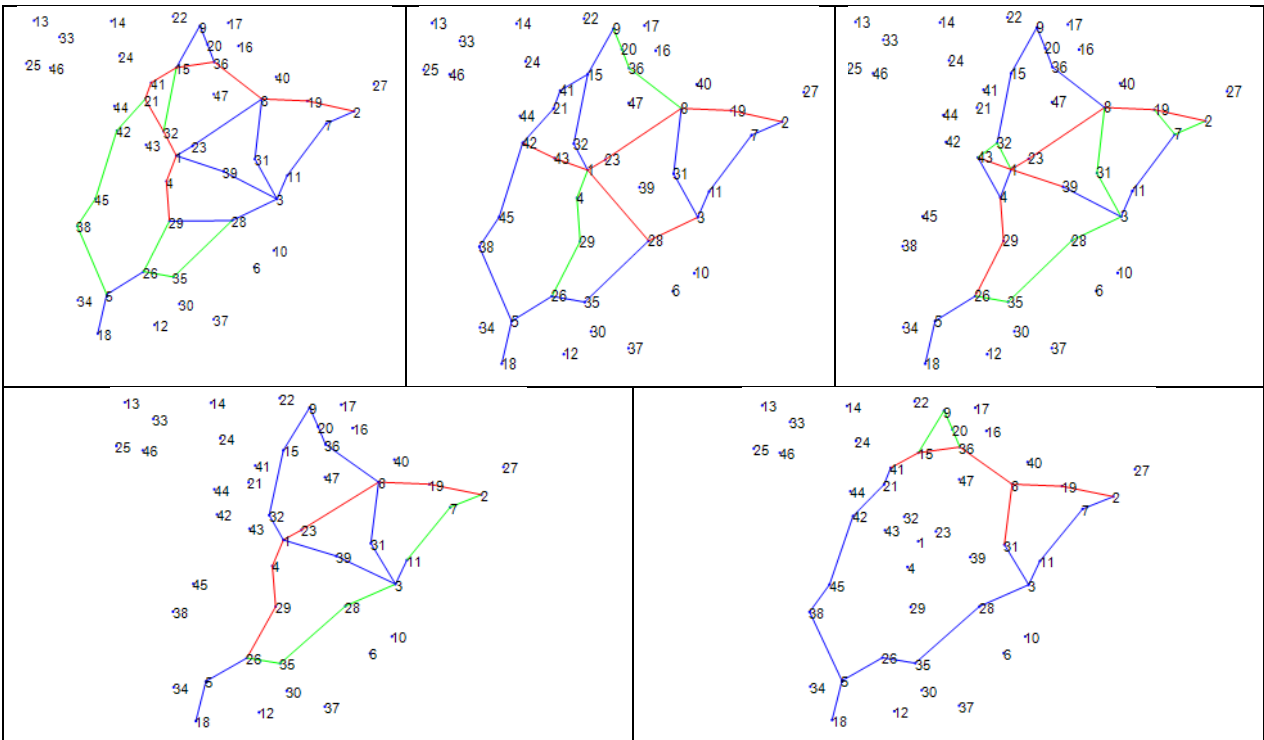


Fig. 56 Soluciones no dominadas Red 47 nodos fijos Dto. 1, fuente: elaboración propia

Comparativa soluciones no dominadas descuento 2

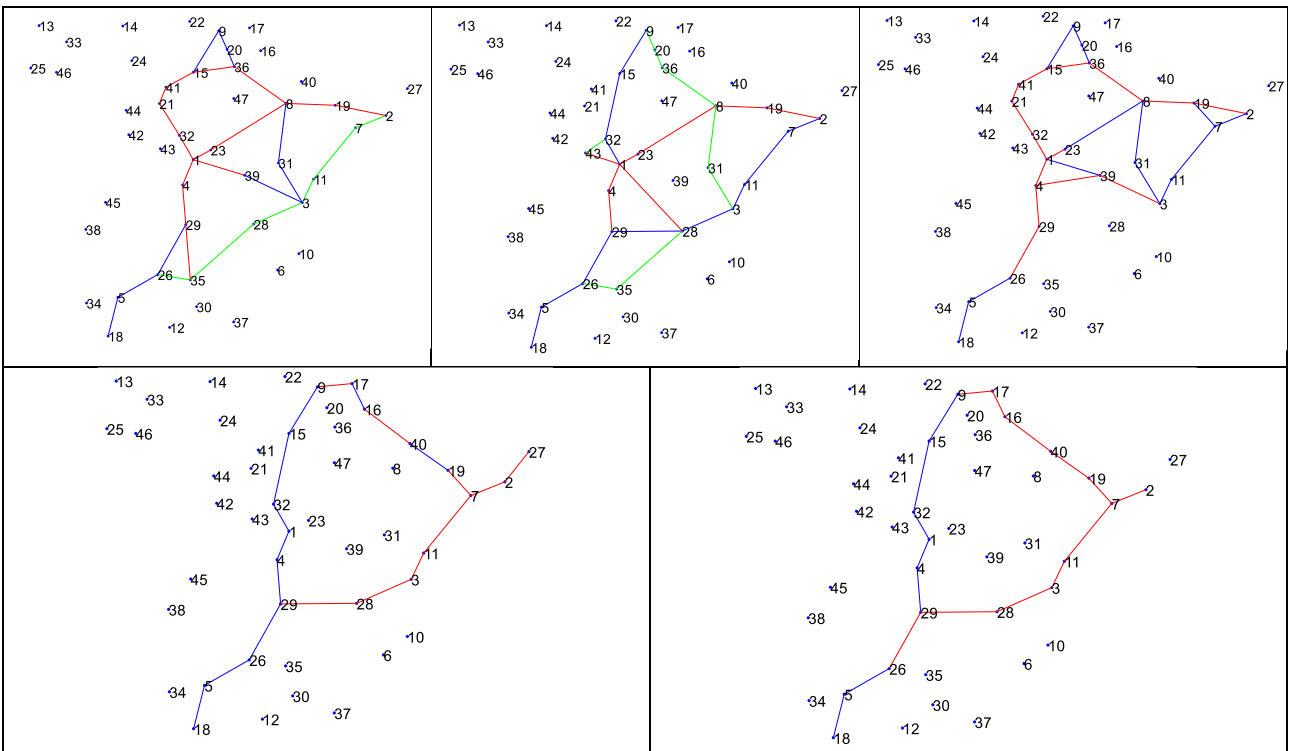


Fig. 57 Soluciones no dominadas Red 47 nodos fijos Dto. 2, fuente : elaboración propia



**Comparativa soluciones no dominadas descuento 3**

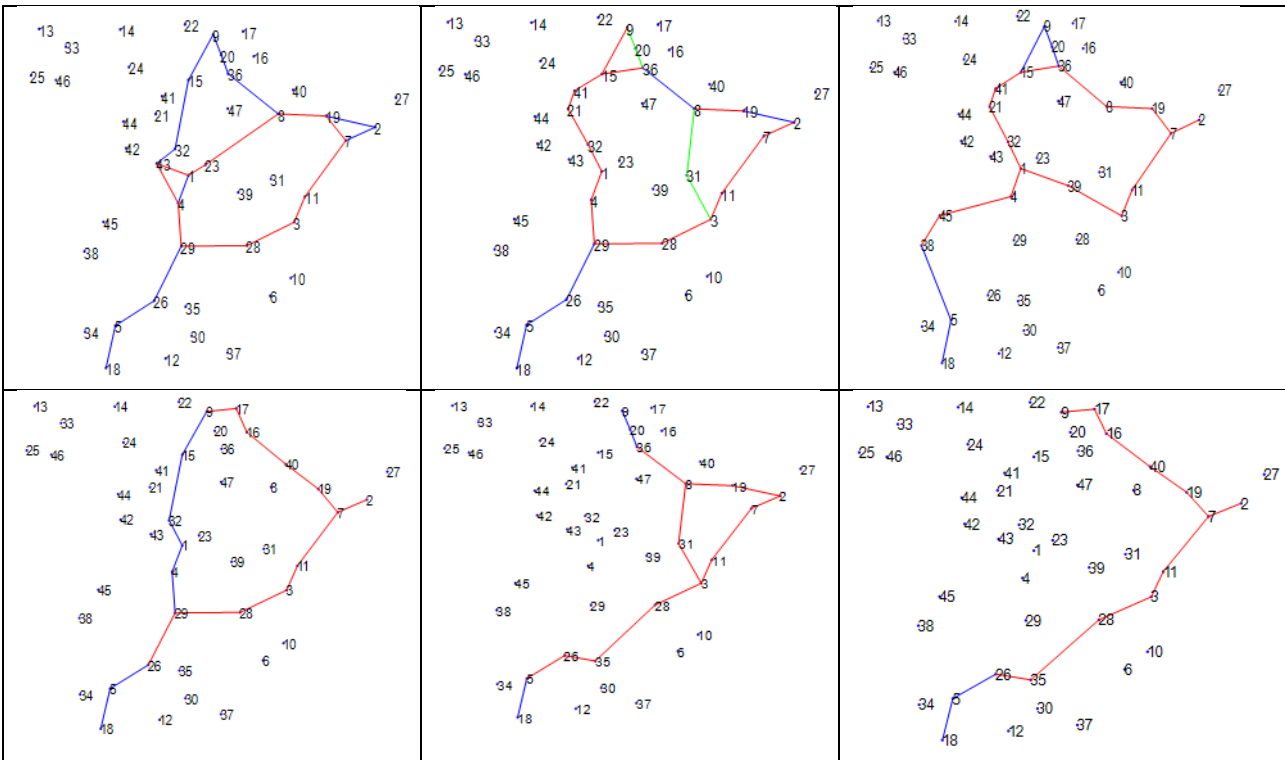


Fig. 58 Soluciones no dominadas Red 47 Dto3, fuente: elaboración propia

Al establecer una serie de nodos HUB fijos la estructura de la red cambia radicalmente, propiciando que el trazado de la red de ferrocarril se centre en un eje norte-sur y en una conexión entre el puerto de Bilbao-Barcelona y Madrid- Barcelona que pase por Valencia.

En el estudio de las soluciones del descuento 1 se observa que, al no tener tanta preferencia el transporte por ferrocarril, las líneas tienen una menor saturación y una mayor distancia total, no aprovechando la confluencia dada por un factor de descuento mayor.

El estudio de la red con el factor de descuento 2 presenta mayores rasgos de confluencia y en consecuencia la distancia de la red de ferrocarril disminuye su distancia total. En las soluciones con menor distancia de vías de ferrocarril se observa cómo las vías que se establecen, presentan un flujo de mercancías más elevado. Al disminuir el número de Hubs asignados éstos se centran en las provincias de mayor flujo de mercancías, obviando las provincias cercanas a éstas.

En el estudio de la red con un factor de descuento 3, el mayor de todos, la concentración de vías continúa la tendencia de establecer conexiones norte- sur pasando por Madrid, la conexión de Bilbao-Barcelona y Madrid-Barcelona pasando por valencia. Sin embargo, al disminuir la cantidad de HUBS a asignar la red obvia la conexión con Madrid y se centra en la conexión Bilbao-Barcelona y Algeciras-Barcelona pasando por Valencia.

## 5.4 ANÁLISIS GENERAL

### 5.4.1 Tipo de asignación de HUBs

Como análisis general se pueden destacar dos tipos de resultados. Los primeros, donde en la red no se establecen nodos fijos y los segundos en los que el algoritmo decide aleatoriamente la localización de los HUBs. En los primeros, las soluciones tienden a presentar estructuras viarias las cuales tienden a una tipología tipo corredor. Este corredor siempre discurre por el centro pasando por Madrid intentando desviarse hacia el sur y el noroeste, y conectando con la zona de Barcelona. Ésto es debido a la confluencia del algoritmo y a las características del cálculo de coste.

El método del cálculo de coste propicia mediante el empleo del algoritmo de Floyd-Warshall y el método iterativo de aplicación de descuentos, que las soluciones que componen la frontera de Pareto estén compuestas por nodos cercanos entre sí o que conformen un corredor. Esta topología de red de ferrocarril es complementada por una estructura de la red de carreteras que de la misma forma intenta conectar las provincias más cercanas a cada HUB mediante una confluencia de carreteras de mayor capacidad hasta llegar a él, aprovechando nuevamente el mayor factor de descuento aplicado a estas carreteras.

El estudio de la red con nodos fijos establece otras características a tener en cuenta. El algoritmo no puede establecer la red solo por el centro peninsular y en consecuencia el papel de la red de carretera cobra mayor relevancia. Como se muestra en la Fig. 59 la solución establece las uniones entre los diferente nodos fijos y el resto los asigna en la ruta que establecen éstos entre ellos.

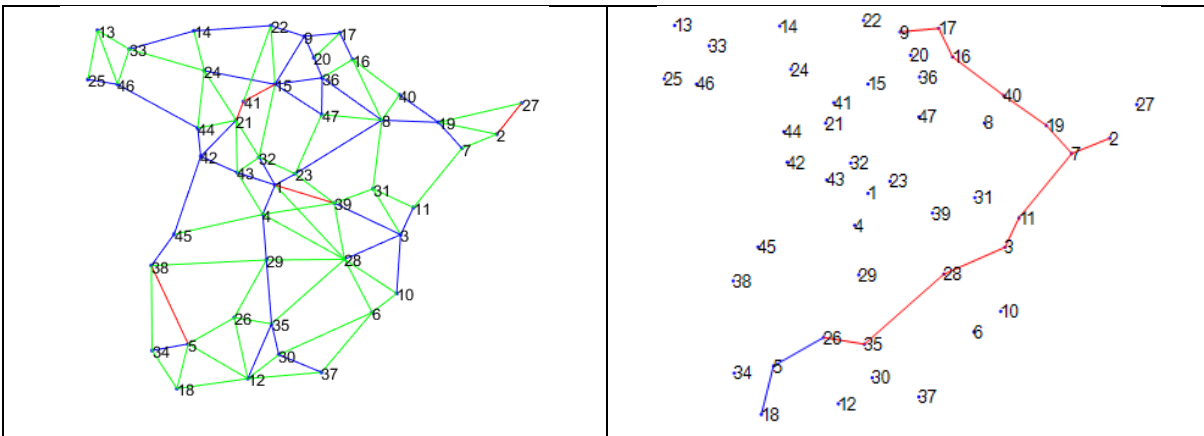


Fig. 59 Solución Red 47 Dto. 3, fuente: Elaboración propia.

Como comparativa entre las soluciones con nodos fijos y las soluciones a elección del algoritmo se pueden estudiar las fronteras de Pareto entre la red con nodos fijos y la que no los presenta (Fig. 60).

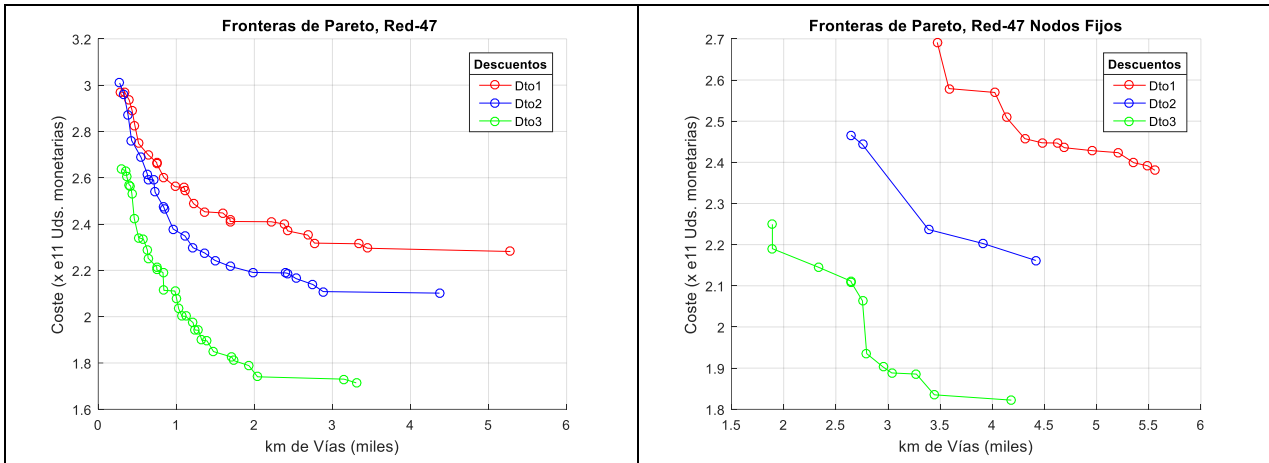


Fig. 60 Comparativa fronteras de Pareto, fuente: Elaboración propia.

Al analizar ambas gráficas se observa como al no tener que establecerse nodos fijos las redes consiguen empezar la asignación desde casi 0 kilómetros de vías. En la red con nodos fijos este límite se establece a partir de 1500 kilómetros, si se aplica un factor de descuento elevado, que permita la concentración de flujo en las vías. El coste total de transporte también presenta unos valores más acotados, estableciendo un límite superior más bajo y uno inferior más alto en la red con nodos fijos.

Otro elemento a estudiar es la forma de las fronteras de Pareto y la cantidad de las soluciones aportadas para la red con nodos fijos. Se observa como no se establece una forma similar respecto al resto de fronteras de Pareto. La razón de este hecho es la mayor restricción en el trazado de la red de ferrocarril, la cual ha de seguir unas pautas definidas y no permite una concentración alrededor de un corredor que pase por el centro de la red.

#### 5.4.2 Funcionamiento del algoritmo

Una vez analizadas las soluciones y la tendencia que demuestra el algoritmo a la hora de construirlas, se puede establecer la conveniencia en la elección de los parámetros para el cálculo de las mismas. Estos parámetros son los factores de elección de HUBs y de nodos- HUB. El análisis se ha hecho sobre las diferentes soluciones no dominadas de las 4 simulaciones, después de la eliminación de las soluciones duplicadas.

Como se puede observar en la Fig. 61 y teniendo en cuenta la media (0.3949) y la mediana (0.35), que la mayoría de las soluciones se componen a partir de HUBs con valores elevados de índice de sensibilidad. Con estos datos se puede determinar que para la construcción de buenas soluciones los nodos que se han de seleccionar como HUBs son los que presenten un mayor flujo a través de sus vías adyacentes.

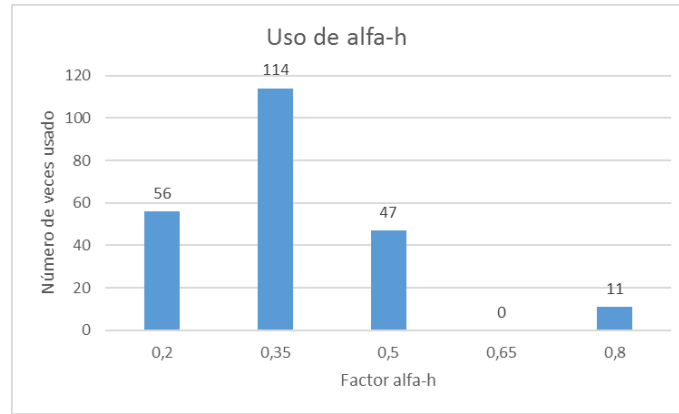


Fig. 61 Uso alfa-h, fuente: Elaboración propia.

Analizando la distribución de la elección por parte del algoritmo del parámetro alfa-n (Fig. 62), media 0.5443 y mediana 0.5, se puede deducir que no hay una clara relación entre el índice de sensibilidad y la asignación de nodos a HUBs. Sin embargo, después de un análisis de los factores de descuento aplicados se deduce que la elección de factores alfa altos (asignación de nodos-HUB con bajo índice de sensibilidad) es debida a que entre un nodo y su HUB asignado hay un descuento aplicado. Si aleatoriamente el algoritmo asigna un nodo distante a un HUB, esa línea disfrutará de una rebaja en el coste de transporte que hará que el coste total disminuya y el algoritmo dará por válida esa nueva solución, aunque no tenga sentido su asignación.

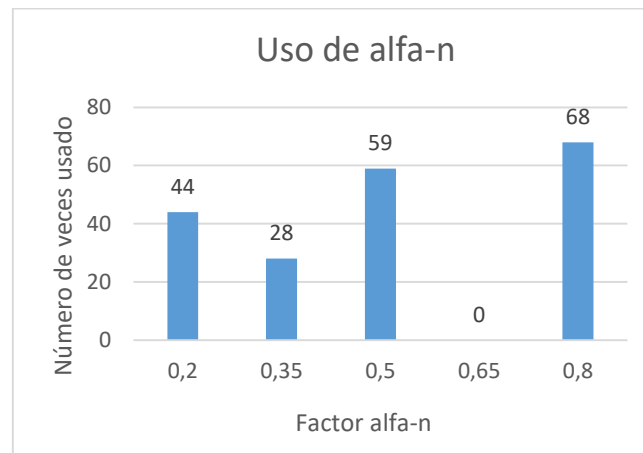


Fig. 62 Uso alfa-n, fuente: Elaboración propia.

Como conclusión a la elección de los factores alfa se deduce que a partir de un valor superior al 0,6 las soluciones dadas no ofrecen resultados de bajo coste y pocos kilómetros de vías.

### 5.4.3 Número de nodos de la red a estudiar y tiempo de ejecución

En relación al número de nodos de nuestra red, se puede deducir que a mayor número, mayor fidelidad de los resultados con la realidad. Por otra parte, al aumentar el número de nodos el tiempo de ejecución aumenta exponencialmente, debido especialmente a la aplicación del algoritmo de Floyd-Warshall el cual, aumenta exponencialmente su tiempo de ejecución. Debido a esta relación entre fidelidad y tiempo de ejecución, la ventaja se establece en la elección de un hardware de procesamiento con la mayor capacidad posible.

## 5.5 CONCLUSIÓN

Este capítulo ha mostrado el sistema de experimentos que se ha diseñado, con el que se han conseguido diversos resultados en la asignación de centros de transporte sobre las diferentes redes estudiadas. También se han analizado esos resultados de forma que se puedan establecer líneas generales de actuación en la distribución de la red de transporte española. Como la aplicación puede estudiar y proponer soluciones para cualquier tipo de red, también se ha propuesto una determinada forma de realizar los experimentos para así obtener unos resultados coherentes y con sentido, pero sin excederse en los tiempos de cálculo.



## 6 CONCLUSIONES FINALES

Como conclusión final, el conjunto del trabajo realizado, ejemplifica el proceso seguido para la obtención de soluciones al problema de localización de centros de transporte. Se ha introducido la problemática, describiendo las características de este tipo de problemas. El segundo capítulo ha introducido las peculiaridades de este tipo de problemas además de introducir diversas bases matemáticas necesarias para la resolución de este tipo de problemas. La herramienta de creación de redes a pesar de no ser parte del objetivo principal del proyecto permite un estudio más rápido con soluciones simplificadas, además de permitir el estudio de casi cualquier tipo de red. Con la herramienta de localización de centros de transporte se ha establecido un elemento adicional en el estudio de redes de transporte, como es el factor de descuento variable en función del flujo acumulado de cada uno de los enlaces de la red.

### 6.1 SOLUCIÓN PROPUESTA

Como conclusión final a la solución en la distribución de la red de ferrocarril en España se compararán las soluciones propuestas con la red existente.

Como puede observarse en las diversas soluciones para la red de 47 nodos, tanto con nodos fijos (Fig. 64), como si no (Fig. 63), el trazado coincide en gran medida con la red de ferrocarril existente en España (Fig. 65).

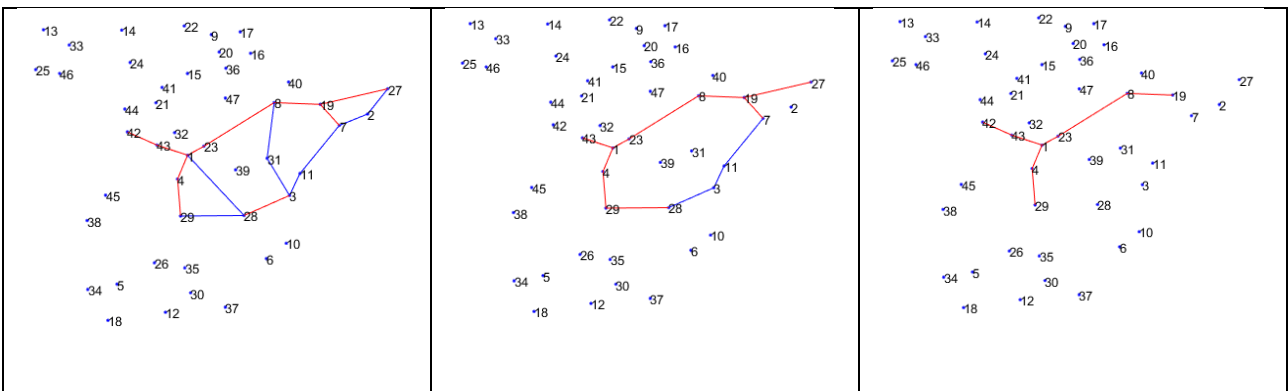


Fig. 63 Soluciones red 46 nodos, fuente: elaboración propia

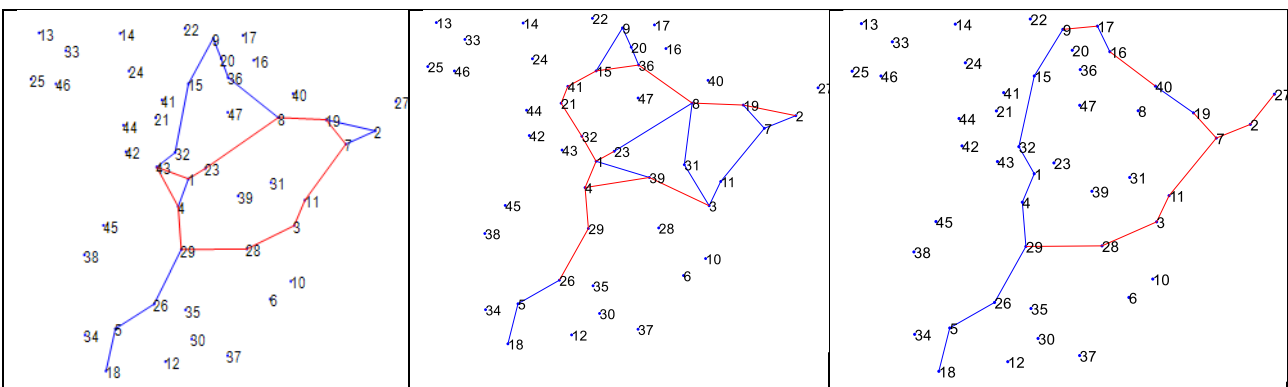


Fig. 64 Soluciones red 47 nodos con nodos fijos, fuente: elaboración propia

En la Fig. 65 se pueden observar la vías de gran capacidad en azul. El diseño de la red de ferrocarril propuesto mantiene los itinerarios que se dan en la realidad, donde se establece un eje norte sur y la conexión de Madrid-Barcelona, Madrid-Valencia y Madrid-Oeste peninsular.



Fig. 65 Red de ferrocarril española, (BCH, 2015)

Sin embargo, en la red existente según las soluciones propuestas sería necesaria una conexión Valencia-Barcelona y Bilbao-Barcelona. Estas consideraciones se pueden aplicar a planes que se pretenden aplicar en la actualidad, con el corredor mediterráneo o el corredor cantábrico-mediterráneo. En el caso del corredor mediterráneo, como ya se ha expuesto, la línea Valencia-Barcelona sería la prioridad absoluta para mejorar la red existente. El resto de la línea no cobraría relevancia dado que un corredor central aglutina de forma más eficiente la mercancía, ya que las provincias litorales con mayor flujo de mercancías conectarían con distancias cortas con este corredor. Para el caso del corredor cantábrico-mediterráneo la implementación del mismo no tendría la misma relevancia que el tramo Valencia-Barcelona, pero sin duda sería la segunda actuación en importancia sobre la red de transporte. Otras líneas a analizar sería la conexión del noroeste peninsular, la peculiaridad de esta zona sin tanto flujo de mercancías como otras zonas da resultados confusos. Sin embargo, parece que la unión Madrid-Galicia muestra tendencias en los resultados. El caso de la zona sur la solución sería, como muestran las simulaciones, un corredor central Madrid-Algeciras.

## 6.2 TRABAJO FUTURO

Una vez se ha concluido el trabajo se han advertido diferentes ámbitos de mejora en el mismo. En primer lugar, se debería implementar una mejora en la herramienta de creación de redes que refleje más fielmente la red existente o que pueda establecer cruces y enlaces intermedios, sin tener que conectar nodos directamente.

El modelo propuesto con la asignación de nodos a HUB puede que pierda sentido ante el sistema de cálculo implementado, donde la mercancía elige el camino mínimo recorrido entre nodos, sin



importar más factores que el coste de cada enlace y la suma total de estos. Además, esta asignación de nodos-HUB es la causante de la mayor cantidad de tiempo de cálculo, dado que la etapa de búsqueda en el algoritmo GRASP es la que más veces evalúa la función objetivo y en consecuencia invierte más tiempo de cálculo. La eliminación de la necesidad de asignación nodos-HUB también permitiría implementar más fácilmente otro tipo de análisis en las redes, como introducir estimaciones estadísticas de evolución en el tráfico de flujo, variación poblacional, establecer HUBs con capacidad limitada e imponer otro tipo de restricciones a la hora de implementar la red de ferrocarriles entre otras.

El algoritmo utilizado (GRASP) también es un factor a mejorar para la construcción de las soluciones. La tendencia natural sería la implementación de un procedimiento de búsqueda Tabú, el cual dada la capacidad de aprendizaje que posee puede no explorar tantas soluciones irrelevantes como el algoritmo GRASP. La implementación de metaheurísticas basadas en poblaciones, como algoritmos genéticos, puede tener utilidad, como se ha demostrado en la bibliografía, pero presenta inconvenientes a la hora de realizar los pasos del algoritmo (recombinación, mutación) los cuales las metaheurísticas basadas en trayectorias no presentan y con mayor relevancia al trabajar con matrices asociadas a grafos.

Por último, la determinación del flujo circulante en la red no toma en cuenta factores de flujo externos como pudiera ser el flujo entre los países adyacentes. Esta consideración de flujo entre Portugal-Marruecos-Francia y el resto de Europa podría variar los resultados obtenidos de forma considerable si el volumen de mercancía fuese elevado respecto del presente en la red actual. Otra consideración a tener en cuenta respecto al flujo sería la variación del mismo respecto del tiempo, donde se podrían establecer diversos escenarios en función de las redes diseñadas y así establecer una red más acorde con los cambios de tendencia en el tráfico de mercancías.



## 7 BIBLIOGRAFÍA

---

- Alumur, S. A., Kara, B. Y., & Karasan, O. E. (2012). Multimodal hub location and hub network design. *Omega*, 40(6), 927–939. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.02.005>
- Caris, A., Macharis, C., & Janssens, G. K. (2013). Decision support in intermodal transport: A new research agenda. *Computers in Industry*, 64(2), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.12.001>
- Demir, E., Huang, Y., Scholts, S., & Woensel, T. Van. (2015). A selected review on the negative externalities of the freight transportation : Modeling and pricing. *Transportation Research Part E*, 77, 95–114. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.02.020>
- Farahani, R. Z., Hekmatfar, M., Arabani, A. B., & Nikbakhsh, E. (2013). Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. *Computers and Industrial Engineering*, 64(4), 1096–1109. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.01.012>
- Ghane-Ezabadi, M., & Vergara, H. A. (2016). Decomposition approach for integrated intermodal logistics network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.009>
- He, Y., Wu, T., Zhang, C., & Liang, Z. (2015). An improved MIP heuristic for the intermodal hub location problem. *Omega (United Kingdom)*, 57, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.04.016>
- Hosseini, M. S., Makui, A., & Torkestani, S. S. (2016). Hierarchical Facility Location and Hub Network Problems : A literature review, (October).
- Ishfaq, R., & Sox, C. R. (2011). Hub location-allocation in intermodal logistic networks. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 213–230. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.09.017>
- Kim, H., & O’Kelly, M. E. (2009). Reliable p-hub location problems in telecommunication networks. *Geographical Analysis*, 41(3), 283–306. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2009.00755.x>
- Lin, C., Chiang, Y., & Lin, S. (2014). Computers & Operations Research Efficient model and heuristic for the intermodal terminal location problem. *Computers and Operation Research*, 51, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.05.004>
- Lin, C., & Lin, S. (2016). Computers & Operations Research Two-stage approach to the intermodal terminal location problem. *Computers and Operation Research*, 67, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.09.009>
- Maheut, J., & Borey, A. (2012). *Informe sobre el problema de localización de hubs para la optimización de los flujos de contenedores en la red de transporte española.*
- Martins, E., Sá, D., Contreras, I., & Cordeau, J. (2015). Exact and heuristic algorithms for the design of hub networks with multiple lines, 246, 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.017>
- O’Kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32(3), 393–404. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(87\)80007-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(87)80007-3)
- Reis, V. (2014). Analysis of mode choice variables in short-distance intermodal freight transport

using an agent-based model. *TRANSPORTATION RESEARCH PART A*, 61, 100–120.  
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.01.002>

Santos, B. F., Limbourg, S., & Carreira, J. S. (2015). The impact of transport policies on railroad intermodal freight competitiveness – The case of Belgium. *TRANSPORTATION RESEARCH PART D*, 34, 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.015>

Serper, E. Z., & Alumur, S. A. (2016). The design of capacitated intermodal hub networks with different vehicle types. *Transportation Research Part B: Methodological*, 86, 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.01.011>

Sörensen, K., Vanovermeire, C., & Busschaert, S. (2012). Efficient metaheuristics to solve the intermodal terminal location problem. *Computers and Operations Research*, 39(9), 2079–2090. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.10.005>

Stadieseifi, M., Dellaert, N. P., Nuijten, W., Van Woensel, T., & Raoufi, R. (2014). Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 233(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.055>

Taghipourian, F., Mahdavi, I., Mahdavi-amiri, N., & Makui, A. (2012). A fuzzy programming approach for dynamic virtual hub location problem. *Applied Mathematical Modelling*, 36(7), 3257–3270. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.10.016>

Thorup, M. (2004). Integer priority queues with decrease key in constant time and the single source shortest paths problem, 69, 330–353. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2004.04.003>

Wiegmans, B., & Behdani, B. (2017). A review and analysis of the investment in, and cost structure of, intermodal rail terminals. *Transport Reviews*, 0(0), 1–19. <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1297867>

Woxenius, J. (2007). Alternative transport network designs and their implications for intermodal transshipment technologies. *European Transport*, 35, 27–45.

Yang, K., Yang, L., & Gao, Z. (2016). Planning and optimization of intermodal hub-and-spoke network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E*, 95, 248–266. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.10.001>

BCH.(2015). Obtenido de [http://www.ferropedia.es/mediawiki/images/a/a3/BCH\\_Iberian\\_peninsula\\_sp.gif](http://www.ferropedia.es/mediawiki/images/a/a3/BCH_Iberian_peninsula_sp.gif)

Roy, B. (1959). Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002001901000027X>

Tutosingeniería. (2015). Obtenido de [www.tutosingenieria.blogspot.com](http://www.tutosingenieria.blogspot.com)

## 8 ANEXOS

### 8.1 CÓDIGO MATLAB

#### 8.1.1 Código base

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% TFM011 Grasp TERMINADO, pareto
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
close all
clear all
clc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% estimación
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load('locdattodos.mat');
ptos0(:,2)=table2array(locdattodos(:,4));
ptos0(:,1)=table2array(locdattodos(:,5))+10;
ptos0(:,3)=table2array(locdattodos(:,7));
plot(ptos0(:,1),ptos0(:,2),'.','MarkerSize',1)
nn=size(ptos0,1)
ptosnom0=table2array(locdattodos(:,3));
diste=calcdistptos(ptos0(:,1:2),111);
%%% FLUJO
flujo=zeros(nn);
for i=1:nn
    flujo(:,i)=(ptos0(:,3)./(sum(ptos0(:,3))).*ptos0(i,3)./10);
end
flujo=flujo.*((rand(nn,nn)./2.5)+(ones(nn).*0.8));
flujo=floor(flujo);
flujo0=flujo-eye(nn).*flujo;

ptos0(:,3)=m123(nn,1); % asigno número
% valor 3 de ptos = flujo export+ import
ptos0(:,4)=sum(flujo0,2)+sum(flujo0)'; % variable asignada al nodos
[adya,ptos,ptosnom,parejas,parnum,flujo]=redcrear2(ptos0,ptosnom0,flujo0,diste,100,250,0.999);
reddibuja(ptos,asig2parnum(adya),0)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% cargo excel
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load('DatosProvincial.mat')
ptos0(:,1)=table2array(DatNodos(:,4))+10;
ptos0(:,2)=table2array(DatNodos(:,3));
ptosnom0=table2array(DatNodos(:,2));
nn=size(ptos0,1); % número de nodos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% flujo total a partir de los datos del excel
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
flujo0=zeros(nn);
%elimino 0 de datflujopn
DatFlujopn(DatFlujopn(:,3)==0,:)=[];
% preparo flujo p-n
for i=1:size(DatFlujopn,1)
    flujo0(DatFlujopn(i,4),DatFlujopn(i,3))=DatFlujopn(i,1);
    flujo0(DatFlujopn(i,3),DatFlujopn(i,4))=DatFlujopn(i,2);
end
% añadido flujo nn
flujo0=flujo0+DatFlujonn;
%quito diagonal
flujo0=flujo0-eye(nn).*flujo0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Cálculo precio de transporte

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
diste=calcdistptos(ptos0,111); % distancia euclidea entre todos los puntos
mprecios=(DatCoste./diste);
mprecios(mprecios>9999999)=0; % diag =0
precio=sum(sum(mprecios))/(size(mprecios,1))^2; % €/km/Ud

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% establezco la estructura de la matriz ptos:
% coordenadas-nº- variable(hab o flujo)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ptos0(:,3)=m123(nn,1); % asigno número
% valor 3 de ptos = flujo export+ import
ptos0(:,4)=sum(flujo0,2)+sum(flujo0)'; % variable asignada al nodo
% muestro tabla con coord-nº-flujo-nom
reddibuja(ptos0,[],0)
[array2table(ptos0) cell2table(ptosnom0)]
% hasta aqui tengo los ptos con la estructura idoneas para comenzar el
% procesamiento de los mismos

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Cálculo de la red provincial
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% +- 16 NODOS -----
[adya,ptos,ptosnom,parejas,parnum,flujo]=redcrear(ptos0,ptosnom0,flujo0,diste,140,450,0.9
5);% funcion crear red
reddibuja(ptos,parnum,0)
nn=size(ptos,1); % número de nodos
% añadido enlaces
anadir=[16 1;14 3;13 11];
elim=[];

[array2table(ptos) array2table(m123(nn,1)) cell2table(ptosnom)] % muestra los puntos
namee={'Longitud' 'Latitud' 'num_alf' 'flujo' 'num' 'Nombre'}
table(ptos(:,1),ptos(:,2),ptos(:,3),ptos(:,4),m123(nn,1),ptosnom,'VariableNames',namee)
lnf=[]

% %%% +- 34 NODOS -----

[adya,ptos,ptosnom,parejas,parnum,flujo]=redcrear(ptos0,ptosnom0,flujo0,diste,70,400,0.91
5)
[adya,ptos,ptosnom,parejas,parnum,flujo]=redcrear(ptos0,ptosnom0,flujo0,70,190,0.9);%
funcion crear red
reddibuja(ptos,parnum,0)
nn=size(ptos,1); % número de nodos
[array2table(ptos) array2table(m123(nn,1)) cell2table(ptosnom)] % muestra los puntos%
añado enlaces
anadir=[4 24];
elim=[1 25; 4 28;32 10; 2 3];
lnf=[]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% tODOS NODOS 47 -----
[adya,ptos,ptosnom,parejas,parnum,flujo]=redcrear(ptos0,ptosnom0,flujo0,DatCoste,10,190,1
);% funcion crear red
% reddibuja(ptos,parnum,0)
nn=size(ptos,1); % número de nodos
[array2table(ptos) array2table(m123(nn,1)) cell2table(ptosnom)] % muestra los puntos
% añadido enlaces
anadir=[19 27;8 23;6 37;12 18;12 37;14 22;14 33;33 24;4 45;5 38;28 29;30 6;
15 24;1 28;46 44;1 39;4 39;4 28;29 38;3 39;28 35;8 36];
% elimino
elim=[10 11;47 16;;41 32;17 36;37 35;16 47;4 23;24 41;31 28;9 36]
%
[array2table(ptos) array2table(m123(nn,1)) cell2table(ptosnom)] % muestra los puntos
namee={'Longitud' 'Latitud' 'num_alf' 'flujo' 'num' 'Nombre'}
table(ptos(:,1),ptos(:,2),ptos(:,3),ptos(:,4),m123(nn,1),ptosnom,'VariableNames',namee)
lnf=[]

%%% Modifico ,acordarse de descomentar red elegida -----

```

```

parnum=sort([parnum;anadir],2); % añadido enlaces

% elimino los enlaces
elim=sort(elim,2); % ordeno
kparnum=ones(size(parnum)); % comodin

for i=1:size(elim,1)
    for j=1:size(parnum,1)
        % (parnum(j,:)==elim(i,:))
        if (parnum(j,:)==elim(i,:))
            kparnum(j,:)=0;
        end
    end
end
parnum=parnum(logical(kparnum(:,1)),:); % enlaces modificados
reddibuja(ptos,parnum,0)

% Red modificada
nn=size(ptos,1); % número de nodos
adya=parnum2adya(parnum,nn);
diste=calcdistptos(ptos,111); % distancia euclidea entre todos los punto
distu=diste.*adya;
%%% distancia dada por la matriz DatCoste -----
[ptos(:,3) m123(nn,1)]
% parnum a parnum con orden alfabético
ornod=([ptos(:,3) m123(nn,1)]);
parnumalf=zeros(nn,2);
for i=1:size(parnum,1)
    for j=1:2
        parnumalf(i,j)=ornod(parnum(i,j),1);
    end
end
% Sustituir distancia euclidea por DATCOSTE
distu=zeros(nn);
for i=1:size(parnum,1)
    distu(parnum(i,1),parnum(i,2))=DatCoste(parnumalf(i,1),parnumalf(i,2));
end
distu=distu+distu'; % matriz distancia unitaria entre nodos
%-----
%%% INFO RED
precio=1;
mdtos=[ 1 1 1 ;
        0.9 0.9 0.8 ;
        0.5 0.45 0.35 ;
        0.4 0.3 0.2 ];
niter=100;
posib=1*5*5*5
testimado=(niter*posib*1.75)/60/60
pmin=4
plmax=8
M=zeros(posib*niter,(8+plmax+size(lnf,1)));
pmax=size(lnf,1)+plmax;
%%% bucle simulación
i=1;
for d=1:1 % dtos
    dtos=mdtos(:,d); % descuentos seleccionados
    for p=pmin:plmax % num nodos
        for alfaf=0.2:0.15:0.8 % hubs seleccionados
            for alfan=0.2:0.15:0.8 % nodos seleccionados
                alfa(1,1)=max([floor((nn-size(lnf,1))*alfah) p-1]);
                alfa(2,1)=max([floor(alfan*(p+size(lnf,1))) 1]);
            end
        end
    end
    %
    [pos,mcoste,mvias,mtempo,mha,~]=GRASPphub04(p,adya,distu,flujo,precio,dtos,niter,lnf,alfa);
end
[pos,mcoste,mvias,mtempo,mha,~]=GRASPphub04(p,adya,distu,flujo,precio,dtos,niter,lnf,alfa);

```

```

M((i-1)*niter+1:(i*niter),:)= [i*ones(niter,1) mcoste/(1e11) mvias/1000 mtempo
d*ones(niter,1) p*ones(niter,1) alfa*ones(niter,1) alfa_n*ones(niter,1) mha
zeros(niter, (pmax-size(mha,2)))];
% [i mcoste(pos)/1e11 mvias(pos)/1e3 median(mtempo) p ]
% i=i+1
% pause(10)
end
end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Guardo Datos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nomsim='Sim.mat' % nombre archivo
save(nomsim,'M') % guardo
M=M(M(:,2)~=0,:);
M=[M ml23(size(M,1),1)]; % numero soluciones
%elimino duplicados
kM=1;
i=1;
while i<=size(M,1)
kM=(M(:,2)==M(i,2)).*(M(:,3)==M(i,3));
kM(i)=0;
M=M(kM==0,:);
i=i+1;
end
M=sortrows(M,2);% ordeno
%%% -----ptos frontera de pareto-----%%%
evprto=[];
for i=1:size(M,1)
evprto(i,1)=sum((M(:,2)<M(i,2)).*(M(:,3)<=M(i,3)));
end
Pprto=[];
Pprto=M((evprto==0),:);
Pprto(:,1:(size(Pprto,2)-1))

%%% -----dibujo frontera de pareto-----%%%
figure
title('Frontera de Pareto')
xlabel('km de Vías (miles)')
ylabel('Coste (x ell Uds. monetarias)')
grid on
hold on
% ptos por n° de hubs
sizp=1.5;
P1=M(M(:,6)==1,:);
plot(P1(:,3),P1(:,2),'kd','MarkerSize',sizp)
P2=M(M(:,6)==2,:);
plot(P2(:,3),P2(:,2),'gd','MarkerSize',sizp)
P3=M(M(:,6)==3,:);
plot(P3(:,3),P3(:,2),'bd','MarkerSize',sizp)
P4=M(M(:,6)==4,:);
plot(P4(:,3),P4(:,2),'cd','MarkerSize',sizp)
P5=M(M(:,6)==5,:);
plot(P5(:,3),P5(:,2),'md','MarkerSize',sizp)

% dibujo de frontera de pareto
for i=2:1:size(Pprto,1)
plot([Pprto(i-1,3) Pprto(i,3)], [Pprto(i-1,2) Pprto(i,2)], 'r');
end
% puntos de la frontera
plot(Pprto(:,3),Pprto(:,2), 'ro')
l = legend('4','5','6','7','8');
title(l,'N° de HUBs')
axis([0 6 2.2 3.2])

```



## 8.1.2 GRASP

```
function
[pcm,mcoste,mvias,mtempo,mha,emasig]=GRASPphubword(p,adya,distu,flujo,precio,dtos,niter,lnf,alfa)
nn=size(adya,1); % numero de nodos
nnf=size(lnf,1);
[mdist,macceso]=FloydWarshall(distu); % calculo acceso y costes de transporte
flujoacum=flujoacum(flujo,macceso);% flujoacumulado por cada vía
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PREPROCESAMIENTO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ISh=[(sum(flujoacum,1)+sum(flujoacum,2)).*(sum(flujo,1)+sum(flujo,2)) m123(nn,1)];
knf=ones(nn,1);% elimino hubs fijos
for i=1:nnf
    knf(lnf(i),1)=0;
end
ISh=ISh(logical(knf),:); % quito los fijos del índice
ISoh=sortrows(ISh,1);
ISn=zeros(nn);% nodos asignados a hub
for i=1:nn
    % IndSens de los diferente nodos respecto a los candidatos hub
    ISn(:,i)=(flujo(i,:)/(mdist(i,:).^3)'+flujo(:,i)/(mdist(:,i).^3))*(1000);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mtempo=zeros(niter,1);% preasigno variables
mcoste=zeros(niter,1);
mvias=zeros(niter,1);
mha=zeros(niter,p+size(lnf,1));
pcm=1;
for iter=1:niter % -----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Construcción
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% asigno los nodos fijos
masig=zeros(nn);
for i=1:nnf
    masig(lnf(i),lnf(i))=1;
end
lrch=ISoh((nn-nnf)-alfa(1,1):end,2); %LRCH
i=1;
% ha=zeros(p,1); % hub allocation
while sum(diag(masig))<(p + nnf) % sum diag masig -> HUBS
    k=randi(size(lrch,1));
    masig(lrch(k),lrch(k))=1;
    i=i+1;
end
ha=diag(masig).*m123(nn,1);% lista de hubs
ha=ha(ha>0);
naa=(diag(masig)<1).*m123(nn,1);
naa=naa(naa>0);
ISnr=ISn(:,(diag(masig)>=1));
lrcn=zeros((nn-nnf-p),alfa(2,1));
for i=1:nn-(nnf+p)
    for j=1:alfa(2,1)
        [~,vbn]=max(ISnr(naa(i),:));
        % lrcn((i-1)*3+j,:)= [i ha(vbn)];
        lrcn(i,j)=[ha(vbn)];
        ISnr(naa(i),vbn)=0;
    end
end
na=zeros(nn-nnf-p,2);%%% Bucle NODOS
for i=1:(nn-p-nnf)
    na(i,:)=[naa(i) lrcn(i,randi(alfa(2,1)))]; % nodos elegidos
    masig(na(i,1),na(i,2))=1; % asigno
    masig(na(i,2),na(i,1))=1; % asigno contrario
end
for i=1:(p+nnf)
    for j=1:(p+nnf)
        masig(ha(j),ha(i))=1;
        masig(ha(i),ha(j))=1;
    end
end
[coste]=fcst(adya,precio,masig,distu,flujo,dtos);% coste
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% BÚSQUEDA
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% cambio de nodos
for i=min([2 alfa(2,1)]):-1:1
%   naa=na(:,1);
  for j=1:nn-p-nnf
    if masig(na(j,1),lrcn(j,i))==0 % si esta asignado no lo valoro

      masig(na(j,1),lrcn(j,i))=1; % asigno el punto mejor
      masig(lrcn(j,i),na(j,1))=1; % simétrico
      masig(na(j,1),na(j,2))=0;% borro el otro punto
      masig(na(j,2),na(j,1))=0; % simétrico

      % evaluo la función
      [fcl]=fcst(adya,precio,masig,distu,flujo,dtos);

      if fcl>coste % si el coste es mayor , deshago los cambios
        masig(na(j,1),lrcn(j,i))=0; % asigno el punto mejor a 0
        masig(lrcn(j,i),na(j,1))=0; % simétrico
        masig(na(j,1),na(j,2))=1;% pongo el punto inicial
        masig(na(j,2),na(j,1))=1; % simétrico
      else fcl<=coste;
        coste=fcl;
        na(j,2)=lrcn(j,i);
      end
    end
  end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% variables fin de iteración
[coste,vias,~,~,~]=funcost(adya,precio,masig,distu,flujo,dtos);
mcoste(iter)=coste(4);
mvias(iter)=vias(3)+vias(4);
mha(iter,:)=ha';
if coste(4)<=mcoste(pcm)
  emasig=masig;
  pcm=iter;
end
mtempo(iter)=toc;
end % end for GRASP -----
end % end function

```

### 8.1.3 Cálculo de coste

```

function [coste]=wfcst(adya,precio,masig,distu,flujo,dtos)
nn=size(adya,1);
[masigh,masighh]=matasignacion(masig);
masignn=adya-masighh;
masignn=(masignn==1)*1;
[distt,maccesso]=FloydWarshall(distu);
sf=sum(sum(flujo));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% modo1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
parnh=asig2parnum(masighn);% parnum n-h
adyal=acces2adya(maccesso,parnh);% adyacencia a partir de maccessos y nodos
mcosteum1n=distu.*adyal*precio*dtos(1,1)+distu.*(adyal<1)*precio;% coste unitario entre nodos red 1
con dto inicial
[mcosteum1,maccesso1]=FloydWarshall(mcosteum1n); % calculo acceso y costes de transporte
mcosteum1=mcosteum1-0.1*(masigh.*mcosteum1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% modo2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
parhh=asig2parnum(masighh);% asig2parnum
mcosteum2n=distt.*(acces2adya(maccesso,parhh))*precio*dtos(3,1); % coste unitario entre nodos red 2
con dto inicial
[mcoste2,maccesso2]=FloydWarshall(mcosteum2n); %coste min transport mod2
mcoste2(mcoste2==Inf)=0; % acondiciono
mcosteum2=masighh.*mcoste2; %seleccion de caminos hub-hub

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% TOTAL
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mcosteum1(mcosteum1==0)=Inf;
mcosteum2(mcosteum2==0)=Inf;

```

```

mcosteumin=zeros(nn);
for i=1:nn %minimo coste entre m1 y m2, de nodo a nodo
    for j=1:nn
        mcosteumin(i,j)=min(mcosteum1(i,j),mcosteum2(i,j));
    end
end
% acceso total y coste total de tranport
[~,maccessot]=FloydWarshall(mcosteumin);% minimo coste total de transporte
% coste2=sum(sum(mcostet.*flujo));
flujoacum=fluacum(flujo,maccessot);% flujoacumulado por cada vía
kcoste=zeros(7,1);
kcoste(1)=Inf;
for it=2:7
    %%% DTO MODO1
    flujoacumnn=fluacum(masignn.*flujoacum,maccessot);% flujo acumulado de nodo a nodo
    kfann=flujoacumnn>=sf*0.01;% dtos a las lineas con mas flujo
    dtol=zeros(nn)+kfann*dtos(2,1);
    dtol(dtol==0)=dtos(1,1);
    mcosteum1=distt.*adya*precio.*dtol;
    mcosteum1=mcosteum1-0.1*(masignh.*mcosteum1);

    %%% DTO MODO2
    dto2=zeros(nn)+simetric((fluacum(masighh.*flujoacum,maccessot2))>=sf*0.05)*dtos(4,1);
    dto2(dto2==0)=dtos(3,1);
    % coste entre nodos que conectan hubs
    mcosteum2n=distt.*acces2adya(maccesso2,parhh)*precio.*dto2;
    %actualizo adyacencia en los nodos entre hubs
    [mcoste2,maccesso2]=FloydWarshall(mcosteum2n);
    % adya2=acces2adya(maccesso2,parhh);
    mcoste2(mcoste2==Inf)=0; % acondiciono
    mcosteum2=masighh.*mcoste2; %seleccion de caminos hub-hub
    %%% mcosteu minima
    mcosteum1(mcosteum1==0)=Inf;
    mcosteum2(mcosteum2==0)=Inf;
    mcosteumin=zeros(nn);
    for i=1:nn %minimo coste entre m1 y m2, de nodo a nodo
        for j=1:nn
            mcosteumin(i,j)=min(mcosteum1(i,j),mcosteum2(i,j));
        end
    end
end
% acceso total y coste total de tranport
[mcostet,maccessot]=FloydWarshall(mcosteumin);% minimo coste total de transporte
% sum(sum(mcostet.*flujo))
flujoacum=fluacum(flujo,maccessot);% flujoacumulado por cada vía
kcoste(it)=(sum(sum(mcostet.*flujo)));
coste=kcoste(2);
if kcoste(it-1)<kcoste(it)
    coste=kcoste(it-1);
    break;
end
end % end iter
end

```

### 8.1.4 Flujo acumulado

```

function [flujoacum]=fluacum(flujo,maccesso)
nn=size(maccesso,1);
flujoacum=zeros(nn); % flujo que atraviesa cada linea entre hubs
for i=1:nn % recorro filas
    for j=1:nn % columnas
        k=i+1; % nodo intermedio
        w=j; % variable comodin
        while k~=i % hasta que recorra todos los nodos intermedion de i a j
            k=maccesso(i,w); % nodo intermedio
            if k~=Inf
                flujoacum(k,w)=flujoacum(k,w)+flujo(i,j); % sumo al anterior

                w=k; % comodin= intermedio
            else
                k=i;
            end
        end
    end
end
end
end

```

### 8.1.5 Floyd-Warshall

```
function [matcoste,MatAcces]=FloydWarshall(matcoste)
dim=size(matcoste,1);
MatAcces=m123(dim,dim).*(matcoste>0);
MatAcces(MatAcces==0)=Inf;
for i=1:dim
    MatAcces(i,i)=i;
end
matcoste(matcoste==0)=Inf; % cero a camino infinito
for i=1:dim
    matcoste(i,i)=0;
end
% Busqueda
for k=1:1:dim
    for i=1:1:dim
        for j=1:1:dim
            if (matcoste(i,k)+matcoste(k,j)<matcoste(i,j)
                matcoste(i,j)=(matcoste(i,k)+matcoste(k,j));
                MatAcces(i,j)=MatAcces(k,j);
            end
        end
    end
end
end
end
```

### 8.1.6 Crear red

```
function
[adya,ptos3,ptosnom3,parejas,parnum,flujo]=redcrear2(ptos1,ptosnom1,flujo,diste,distmin,v
iamax,residuopor)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% fase de eliminacion de nodos, asignacion local al mas grande
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
dt=diste;
dt(diste==0)=99999; % variable para la eliminación
k=1;
for r=1:size(ptos1,1)
    [~, posmh]=max(ptos1(:,4)); % posicion del mas grande población

    [distelm, poselm]=min(dt(posmh,:)); % mínimo mas cercano

    if distelm<distmin % si esta lo suficientemente cerca

        ptos1(posmh,4)=ptos1(posmh,4)+ptos1(poselm,4); % se queda su valor
        ptos1(poselm,:)=NaN; % elimino el pequeño
        dt(:,poselm)=99999;
        dt(poselm,:)=99999;
        ptosnom1(poselm)=cell(1);
        flujo(posmh,:)=flujo(posmh,:)+flujo(poselm,:);
        flujo(:,posmh)=flujo(:,posmh)+flujo(:,poselm);
        flujo(poselm,:)=0;
        flujo(:,poselm)=0;
    else % si no hay puntos cerca
        ptos2(k,:)=ptos1(posmh,:); % lo asigno a la nueva lista de puntos
        ptos1(posmh,:)=NaN; % lo quito de la antigua lista
        dt(:,posmh)=99999;
        dt(posmh,:)=99999;
        ptosnom2(k,:)=ptosnom1(posmh,:); % el nombre
        ptosnom1(posmh)=cell(1);
        k=k+1;
    end
end
end
```

```

diste2=calcdistptos(ptos2,111);% nueva distancia entre puntos PTOS2
nn2=size(ptos2,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% fase eliminacion de residuos x%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
kelim=max(ptos2(:,4)-residuopor*(max(ptos2(:,4))-min(ptos2(:,4))));
nodsels=double(ptos2(:,4)>=kelim-1);
for i=1:nn2
dist2elim(i,:)=nodsels.*diste2(i,:);
end
dist2elim(dist2elim==0)=max(max(diste2(:,4)))*10;

for i=1:nn2
if nodsels(i,1)==0
[~,pos2gr]=min(dist2elim(i,:));
ptos2(pos2gr,4)=ptos2(i,4)+ptos2(pos2gr,4);

flujo(pos2gr,:)=flujo(pos2gr,:)+flujo(i,:);
flujo(:,pos2gr)=flujo(:,pos2gr)+flujo(:,i);
end

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ptos3=ptos2(ptos2(:,4)>=kelim-1,:); % nuevos puntos
diste3=calcdistptos(ptos3,111);
ptosnom3=ptosnom2(ptos2(:,4)>=kelim-1);
nn3=size(ptos3,1);
flujo=flujo(ptos2(:,4)>=kelim-1,:);
flujo=flujo(:,ptos2(:,4)>=kelim-1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% fase de enlace de nodos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
dt=triu(diste3);
dt(dt==0)=99999;
parejas=[];
adya=zeros(nn3);
i=1;
va=0;
com=0;
while va<viamax
n=0;
% va
[val, posa]=min(dt);
[va, posb]=min(val);
a=ptos3(posa(1:2),1:2);
b=ptos3(posb(1:2),1:2);
for j=1:size(parejas,1)
[sino]=corteselementos(a,b,parejas(j,1:2),parejas(j,3:4)); % corta? si 1 no 0
n=n+sino;
end

if n==0
parejas(i,1:2)=a;
parejas(i,3:4)=b;
parnum((com+1),:)=[posa(posb) posb];
dt(posa(posb),posb)=99999;
adya(posa(posb),posb)=1;
i=i+1;
else
dt(posa(posb),posb)=99999;
end

com=com+1;
if com>(nn3^2)
break;
end
end
end

```

```
% matriz de adyacencia simétrica
adya=matsimetrica(adya);
kpn=sum(parnum==0,2);
parnum=parnum(kpn==0,:);
flujo=flujo-eye(nn3).*flujo;
end
```

### 8.1.7 Dibujar red

```
function reddibuja(ptos,parnum,varenl)
nn=size(ptos,1);
figure
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% pinto puntos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
plot(ptos(:,1),ptos(:,2),'b.')
hold on
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% pinto enlaces
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[parcord]=pranum2parcord(ptos,parnum);
% si no hay relaciones
if varenl==0
varenl=ones(nn);
end
% limites de colores
varen2=(varenl==0).*9999999999+varenl;
lim1ve=max(max(varenl))-0.2*(max(max(varenl))-min(min(varen2)));
lim2ve=max(max(varenl))-0.9*(max(max(varenl))-min(min(varen2)));
% si no hay relaciones
if sum(sum(varenl))==0
lim1ve=6;
lim2ve=5;
end
for i=1:size(parnum,1)

    if varenl(parnum(i,1),parnum(i,2))>lim1ve
        plot([parcord(i,1) parcord(i,3)],[parcord(i,2) parcord(i,4)],'-r');
    elseif
(lim1ve>varenl(parnum(i,1),parnum(i,2)))&&(varenl(parnum(i,1),parnum(i,2))>lim2ve)
        plot([parcord(i,1) parcord(i,3)],[parcord(i,2) parcord(i,4)],'-b');
    else %flujoacum(parnum(i,1),parnum(i,2))<lim2fluac
        plot([parcord(i,1) parcord(i,3)],[parcord(i,2) parcord(i,4)],'-g');
    end
end
for i=1:nn
text(ptos(i,1),ptos(i,2),num2cell(i)); % num ciudad
end
hold off;
end
```

## 8.2 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS

Para ilustrar los diferentes conjuntos de soluciones, se ha mostrar un extracto de las diferentes soluciones y se indicará el total de las mismas que la tabla completa tendría. El conjunto total de las misma se podrá consultar en:

### 8.2.1 Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 1

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs				
2	1,925	0,9510	0,004337	1	2	0,20	0,35	4	12	0	0	0
2	1,925	0,9510	0,004337	1	2	0,20	0,35	4	12	0	0	0
8	2,128	0,1668	0,006078	1	2	0,35	0,50	6	12	0	0	0
8	1,832	0,7937	0,003823	1	2	0,35	0,50	4	6	0	0	0
10	1,985	0,4513	0,006426	1	2	0,35	0,80	1	4	0	0	0
10	2,055	0,1608	0,006363	1	2	0,35	0,80	1	14	0	0	0
11	2,109	0,1850	0,003781	1	2	0,50	0,20	3	5	0	0	0
13	2,156	0,3929	0,006137	1	2	0,50	0,50	1	5	0	0	0
17	1,919	0,7616	0,003843	1	2	0,65	0,35	11	16	0	0	0
20	2,128	0,1668	0,006085	1	2	0,65	0,80	6	12	0	0	0
22	2,128	0,7978	0,003851	1	2	0,80	0,35	5	10	0	0	0
23	2,164	0,5355	0,006220	1	2	0,80	0,50	10	14	0	0	0
29	1,843	0,9510	0,006149	1	3	0,20	0,65	4	12	14	0	0
32	1,896	0,4513	0,006489	1	3	0,35	0,35	1	4	14	0	0
33	1,803	0,5031	0,006172	1	3	0,35	0,50	1	6	14	0	0
37	2,041	1,1554	0,006177	1	3	0,5	0,35	1	3	12	0	0
41	1,826	1,7294	0,007067	1	3	0,65	0,2	3	4	11	0	0
44	1,867	0,5091	0,006113	1	3	0,65	0,65	1	6	12	0	0
46	1,750	0,9605	0,003962	1	3	0,8	0,2	4	6	12	0	0
48	1,854	1,4204	0,006171	1	3	0,8	0,5	6	14	15	0	0
49	1,901	1,3320	0,005378	1	3	0,8	0,65	11	12	15	0	0
51	1,634	1,8739	0,006242	1	4	0,2	0,2	4	11	12	14	0
51	1,634	1,8739	0,006266	1	4	0,2	0,2	4	11	12	14	0
53	1,594	1,8739	0,051782	1	4	0,2	0,5	4	11	12	14	0
58	1,589	1,4250	0,054959	1	4	0,35	0,5	4	6	11	14	0
59	1,617	1,4250	0,037213	1	4	0,35	0,65	1	4	6	11	0
60	1,682	1,1345	0,048446	1	4	0,35	0,8	1	6	11	14	0
63	1,889	1,8417	0,054710	1	4	0,5	0,5	1	3	5	11	0
66	1,787	2,6830	0,006252	1	4	0,65	0,2	11	12	14	16	0
67	1,820	3,2887	0,007272	1	4	0,65	0,35	1	5	11	16	0
67	2,0037	1,3664	0,006084	1	4	0,65	0,35	1	3	5	10	0
69	1,83	2,4157	0,055820	1	4	0,65	0,65	3	5	11	16	0
71	1,9676	1,5534	0,006250	1	4	0,8	0,2	1	5	8	14	0
73	1,7046	2,1535	0,039880	1	4	0,8	0,5	3	4	13	14	0
73	1,6996	2,1000	0,043222	1	4	0,8	0,5	5	11	13	14	0
76	1,5888	1,8773	0,006237	1	5	0,2	0,2	4	6	11	12	14
77	1,5888	1,8773	0,006301	1	5	0,2	0,35	4	6	11	12	14
77	1,5888	1,8773	0,006477	1	5	0,2	0,35	4	6	11	12	14
77	1,5888	1,8773	0,007514	1	5	0,2	0,35	4	6	11	12	14
85	1,5582	0,9605	0,052515	1	5	0,35	0,8	1	4	6	12	14

Tabla 65 Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 1

## 8.2.2 Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 2

30000 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs				
4	1,776	0,9281	0,004058	2	2	0,20	0,65	4	11	0	0	0
8	1,900	0,3423	0,006126	2	2	0,35	0,50	1	6	0	0	0
16	1,961	0,5091	0,003816	2	2	0,65	0,20	1	12	0	0	0
17	2,246	0,3380	0,006327	2	2	0,65	0,35	14	16	0	0	0
18	1,916	0,6883	0,006145	2	2	0,65	0,50	3	4	0	0	0
22	2,313	0,3880	0,006176	2	2	0,80	0,35	8	16	0	0	0
34	1,772	0,6375	0,006178	2	3	0,35	0,65	1	11	14	0	0
34	1,650	0,9605	0,005354	2	3	0,35	0,65	4	6	12	0	0
35	1,647	0,9605	0,045818	2	3	0,35	0,80	4	6	12	0	0
38	1,743	1,5559	0,006222	2	3	0,50	0,50	5	11	14	0	0
38	1,808	1,4465	0,006691	2	3	0,50	0,50	1	4	5	0	0
40	2,011	0,4477	0,038937	2	3	0,50	0,80	3	5	12	0	0
42	1,857	1,7281	0,006149	2	3	0,65	0,35	3	6	16	0	0
43	1,984	1,4758	0,003854	2	3	0,65	0,50	3	12	13	0	0
49	1,987	1,5981	0,006159	2	3	0,80	0,65	13	15	16	0	0
51	1,482	1,8739	0,006283	2	4	0,2	0,2	4	11	12	14	0
53	1,440	1,8739	0,045916	2	4	0,2	0,5	4	11	12	14	0
54	1,440	1,8739	0,058290	2	4	0,2	0,65	4	11	12	14	0
55	1,440	1,8739	0,060764	2	4	0,2	0,8	4	11	12	14	0
57	1,666	1,4259	0,006590	2	4	0,35	0,35	1	6	11	12	0
57	1,614	0,9605	0,003880	2	4	0,35	0,35	1	4	12	14	0
62	1,550	1,8239	0,006281	2	4	0,5	0,35	1	3	4	6	0
62	1,547	2,4612	0,007144	2	4	0,5	0,35	4	5	6	11	0
63	1,529	3,0559	0,048535	2	4	0,5	0,5	4	5	11	13	0
65	1,498	2,4612	0,052497	2	4	0,5	0,8	4	5	6	11	0
67	1,972	0,7978	0,006175	2	4	0,65	0,35	1	5	10	13	0
68	1,640	2,8011	0,046235	2	4	0,65	0,5	1	4	5	12	0
68	1,792	1,4489	0,060400	2	4	0,65	0,5	1	3	5	11	0
68	1,550	1,8239	0,054378	2	4	0,65	0,5	1	3	4	6	0
77	1,449	1,8773	0,006548	2	5	0,2	0,35	4	6	11	12	14
78	1,4088	1,8773	0,046183	2	5	0,2	0,5	4	6	11	12	14
79	1,4088	1,8773	0,057879	2	5	0,2	0,65	4	6	11	12	14
80	1,4088	1,8773	0,067606	2	5	0,2	0,8	4	6	11	12	14
82	1,4323	1,2135	0,006338	2	5	0,35	0,35	1	4	11	12	14
88	1,4054	3,5739	0,038132	2	5	0,5	0,5	4	5	6	11	12
90	1,3987	2,2735	0,031597	2	5	0,5	0,8	3	4	11	13	14
91	1,6332	2,0687	0,006927	2	5	0,65	0,2	1	6	10	11	13
91	1,6711	1,2239	0,006244	2	5	0,65	0,2	1	4	13	14	16
92	1,4964	1,1986	0,006352	2	5	0,65	0,35	1	4	6	10	13
98	1,5843	2,2878	0,026965	2	5	0,8	0,5	1	5	6	8	15

Tabla 66 Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 2



### 8.2.3 Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 3

25000 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs				
2	1,818	0,2854	0,004284	3	2	0,20	0,35	11	12	0	0	0
2	1,686	0,6605	0,006502	3	2	0,20	0,35	12	14	0	0	0
7	1,820	0,5091	0,006141	3	2	0,35	0,35	1	12	0	0	0
8	1,818	0,2854	0,003808	3	2	0,35	0,50	11	12	0	0	0
9	1,571	0,5031	0,006149	3	2	0,35	0,65	6	14	0	0	0
9	1,640	0,6375	0,006166	3	2	0,35	0,65	11	14	0	0	0
10	1,820	0,5091	0,006147	3	2	0,35	0,80	1	12	0	0	0
10	1,778	0,1546	0,003948	3	2	0,35	0,80	6	11	0	0	0
11	1,897	0,6023	0,006126	3	2	0,50	0,20	4	5	0	0	0
12	1,804	0,6511	0,004315	3	2	0,50	0,35	12	13	0	0	0
15	1,686	0,6605	0,006426	3	2	0,50	0,80	12	14	0	0	0
18	1,829	0,2627	0,005103	3	2	0,65	0,50	3	12	0	0	0
20	1,899	0,2906	0,006141	3	2	0,65	0,80	4	14	0	0	0
21	1,725	0,8950	0,006186	3	2	0,80	0,20	8	11	0	0	0
36	1,677	0,5585	0,006129	3	3	0,50	0,20	1	3	14	0	0
39	1,651	0,6871	0,003827	3	3	0,5	0,65	6	12	13	0	0
41	1,762	0,5355	0,006124	3	3	0,65	0,2	10	13	14	0	0
44	1,677	0,8733	0,006210	3	3	0,65	0,65	3	4	5	0	0
49	1,635	1,9777	0,006637	3	3	0,8	0,65	6	15	16	0	0
55	1,187	1,8739	0,051303	3	4	0,2	0,8	4	11	12	14	0
56	1,466	1,1405	0,006247	3	4	0,35	0,2	1	6	11	12	0
57	1,366	1,1345	0,006292	3	4	0,35	0,35	1	6	11	14	0
63	1,334	1,2669	0,046864	3	4	0,5	0,5	1	5	6	14	0
63	1,539	1,7140	0,045297	3	4	0,5	0,5	1	3	12	14	0
71	1,648	1,3311	0,003888	3	4	0,8	0,2	13	14	15	16	0
75	1,606	1,3390	0,058276	3	4	0,8	0,8	4	8	12	16	0
80	1,135	2,5377	0,055830	3	5	0,2	0,8	4	6	11	12	14
80	1,135	2,5377	0,070695	3	5	0,2	0,8	4	6	11	12	14
81	1,164	1,5919	0,006295	3	5	0,35	0,2	1	4	6	11	12
84	1,158	1,2135	0,055350	3	5	0,35	0,65	1	4	11	12	14
84	1,1369	2,5377	0,055847	3	5	0,35	0,65	4	6	11	12	14
87	1,2389	2,4260	0,006336	3	5	0,5	0,35	4	5	12	13	14
90	1,2304	1,5867	0,055072	3	5	0,5	0,8	1	6	11	12	14
93	1,2849	2,1350	0,042839	3	5	0,65	0,5	3	6	10	11	16
93	1,4337	2,6903	0,044710	3	5	0,65	0,5	4	5	10	14	16
94	1,4099	1,1401	0,054209	3	5	0,65	0,65	1	5	6	10	13
96	1,2545	3,3639	0,006362	3	5	0,8	0,2	5	10	11	12	16
96	1,5416	2,2744	0,006282	3	5	0,8	0,2	3	4	12	15	16
99	1,5014	3,1574	0,058116	3	5	0,8	0,65	5	6	10	13	15
100	1,118	1,6209	0,066630	3	5	0,8	0,8	3	4	6	12	14

Tabla 67 Soluciones simulación red 16 nodos descuento aplicado 3

8.2.4 Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 1  
25000 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs						
1	2,314	0,5346	0,022338	1	2	0,20	0,20	27	34	0	0	0	0	
6	2,531	0,2136	0,036098	1	2	0,35	0,20	1	14	0	0	0	0	
8	2,531	0,2136	0,035649	1	2	0,35	0,50	1	14	0	0	0	0	
8	2,477	0,3911	0,035714	1	2	0,35	0,50	4	20	0	0	0	0	
21	2,569	0,1288	0,036052	1	2	0,80	0,20	18	34	0	0	0	0	
23	2,459	0,6392	0,035600	1	2	0,80	0,50	17	25	0	0	0	0	
28	2,462	0,9943	0,035583	1	3	0,20	0,50	22	33	34	0	0	0	
30	2,179	1,4787	0,519947	1	3	0,20	0,80	20	27	33	0	0	0	
31	2,159	1,0006	0,022001	1	3	0,35	0,20	8	20	33	0	0	0	
32	2,301	0,9604	0,035897	1	3	0,35	0,35	20	27	34	0	0	0	
38	2,324	0,9186	0,036028	1	3	0,50	0,50	1	31	34	0	0	0	
39	2,297	0,6049	0,022250	1	3	0,50	0,65	1	8	25	0	0	0	
43	2,554	1,1031	0,035681	1	3	0,65	0,50	13	16	18	0	0	0	
44	2,172	0,8178	0,021976	1	3	0,65	0,65	4	17	34	0	0	0	
44	2,304	0,9895	0,021944	1	3	0,65	0,65	20	29	33	0	0	0	
46	2,295	1,5528	0,022020	1	3	0,8	0,2	5	27	31	0	0	0	
51	2,150	1,5893	0,035826	1	4	0,2	0,2	20	22	31	34	0	0	
51	2,189	1,0268	0,021997	1	4	0,2	0,2	4	20	22	34	0	0	
55	2,130	1,1842	0,723512	1	4	0,2	0,8	4	22	31	33	0	0	
58	2,205	1,7322	0,662266	1	4	0,35	0,5	14	22	31	33	0	0	
60	2,249	1,3965	0,812765	1	4	0,35	0,8	14	20	27	28	0	0	
61	2,371	0,4883	0,035794	1	4	0,5	0,2	1	4	20	25	0	0	
62	2,210	1,4419	0,022146	1	4	0,5	0,35	8	20	24	27	0	0	
63	2,177	1,6550	0,447881	1	4	0,5	0,5	4	14	29	31	0	0	
65	2,083	1,6832	0,745876	1	4	0,5	0,8	4	17	18	31	0	0	
69	2,179	2,6254	0,555458	1	4	0,65	0,65	17	20	24	34	0	0	
69	2,212	1,6963	0,491236	1	4	0,65	0,65	1	2	11	17	0	0	
71	2,354	1,1074	0,022044	1	4	0,8	0,2	9	14	22	26	0	0	
74	2,275	2,9700	0,533321	1	4	0,8	0,65	5	20	21	24	0	0	
77	1,947	2,5739	0,035994	1	5	0,2	0,35	4	20	22	31	33	0	
80	2,0021	2,3711	0,747268	1	5	0,2	0,8	20	22	27	33	34	0	
82	2,1317	0,8173	0,035572	1	5	0,35	0,35	4	8	22	27	28	0	
85	2,0193	1,7171	0,940892	1	5	0,35	0,8	1	4	17	20	33	0	
90	2,1314	3,1857	0,547335	1	5	0,5	0,8	2	18	22	25	29	0	
99	2,2621	1,6954	0,785954	1	5	0,8	0,65	2	6	24	25	27	0	
103	1,8335	3,0301	0,755628	1	6	0,2	0,5	4	20	27	31	33	34	
110	1,9093	1,8885	0,710113	1	6	0,35	0,8	1	17	20	27	33	34	
114	2,1984	3,5235	0,840977	1	6	0,5	0,65	2	8	16	17	25	31	
117	2,0924	3,7546	0,392677	1	6	0,65	0,35	2	11	14	20	24	31	
119	2,1851	4,6948	0,823653	1	6	0,65	0,65	2	5	13	24	27	33	

Tabla 68 Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 1

8.2.5 Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 2  
25000 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs						
1	2,432	0,2671	0,023486	2	2	0,20	0,20	22	33	0	0	0	0	
4	2,504	0,7043	0,036534	2	2	0,20	0,65	27	33	0	0	0	0	
5	2,401	0,5726	0,035851	2	2	0,20	0,80	22	31	0	0	0	0	
6	2,459	0,2854	0,035964	2	2	0,35	0,20	4	14	0	0	0	0	
8	2,479	0,2466	0,035660	2	2	0,35	0,50	1	34	0	0	0	0	
12	2,556	0,8522	0,037734	2	2	0,50	0,35	8	33	0	0	0	0	
16	2,344	0,6969	0,021875	2	2	0,65	0,20	13	27	0	0	0	0	
17	2,432	0,2671	0,022362	2	2	0,65	0,35	22	33	0	0	0	0	
19	2,306	0,7031	0,022051	2	2	0,65	0,65	8	22	0	0	0	0	
21	2,468	0,1898	0,021839	2	2	0,80	0,20	5	11	0	0	0	0	
23	2,498	0,5364	0,037670	2	2	0,80	0,50	2	24	0	0	0	0	
25	2,245	0,5456	0,021846	2	2	0,80	0,80	8	20	0	0	0	0	
28	2,212	0,7043	0,035770	2	3	0,20	0,50	4	27	33	0	0	0	
29	2,166	1,1978	0,035782	2	3	0,20	0,65	22	31	34	0	0	0	
33	2,307	0,8753	0,039467	2	3	0,35	0,50	8	14	33	0	0	0	
33	2,321	0,6299	0,036055	2	3	0,35	0,5	4	14	33	0	0	0	
34	2,474	0,1470	0,036152	2	3	0,35	0,65	1	4	28	0	0	0	
43	2,265	1,1704	0,022003	2	3	0,65	0,5	1	5	34	0	0	0	
45	2,326	1,0608	0,730314	2	3	0,65	0,8	17	25	33	0	0	0	
45	2,181	0,9428	0,802363	2	3	0,65	0,8	4	17	33	0	0	0	
55	1,922	1,4438	0,697600	2	4	0,2	0,8	4	27	33	34	0	0	
56	2,073	1,4902	0,026844	2	4	0,35	0,2	8	22	28	33	0	0	
59	2,010	0,9935	0,516122	2	4	0,35	0,65	8	20	31	34	0	0	
66	2,364	1,4419	0,036189	2	4	0,65	0,2	2	3	21	28	0	0	
74	2,256	0,7071	0,604184	2	4	0,8	0,65	1	9	18	24	0	0	
80	1,806	1,8696	0,615526	2	5	0,2	0,8	4	20	27	33	34	0	
81	1,963	1,6196	0,035813	2	5	0,35	0,2	17	22	27	28	33	0	
84	1,892	1,8375	0,691217	2	5	0,35	0,65	1	14	22	27	33	0	
84	1,816	2,0122	0,821521	2	5	0,35	0,65	1	8	17	20	22	0	
88	1,992	1,5117	0,570693	2	5	0,5	0,5	1	17	24	29	34	0	
99	2,1166	1,3409	0,571013	2	5	0,8	0,65	2	8	14	27	31	0	
101	1,7842	2,2438	0,035697	2	6	0,2	0,2	4	22	27	31	33	34	
108	1,8481	1,4024	0,814751	2	6	0,35	0,5	4	14	20	22	28	31	
109	2,016	1,0484	0,819077	2	6	0,35	0,65	1	4	14	17	27	28	
111	2,0542	3,1410	0,036361	2	6	0,5	0,2	8	16	17	20	27	29	
115	1,9475	1,7448	0,751151	2	6	0,5	0,8	1	4	8	24	31	33	
117	2,0712	2,1010	0,514883	2	6	0,65	0,35	2	4	5	8	11	16	
118	1,9388	3,8644	0,695597	2	6	0,65	0,5	2	4	5	8	21	24	
119	1,9473	3,0505	0,717781	2	6	0,65	0,65	3	4	21	29	31	34	
121	2,1398	3,0599	0,036667	2	6	0,8	0,2	13	18	23	26	27	29	

Tabla 69 Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 2

8.2.6 Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 3  
30000 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs						
2	2,134	0,5346	0,036079	3	2	0,20	0,35	27	34	0	0	0	0	
6	2,227	0,3632	0,035853	3	2	0,35	0,20	27	28	0	0	0	0	
24	2,141	0,7113	0,021912	3	2	0,80	0,65	21	31	0	0	0	0	
24	2,141	0,7113	0,021912	3	2	0,80	0,65	21	31	0	0	0	0	
32	2,041	0,7971	0,035779	3	3	0,35	0,35	20	31	34	0	0	0	
33	1,925	1,5817	0,035873	3	3	0,35	0,50	8	22	28	0	0	0	
33	2,044	0,7730	0,035724	3	3	0,35	0,50	17	27	34	0	0	0	
34	2,181	0,5380	0,035631	3	3	0,35	0,65	1	4	34	0	0	0	
39	2,196	1,1789	0,035845	3	3	0,50	0,65	2	18	29	0	0	0	
45	2,157	0,9204	0,717721	3	3	0,65	0,80	2	22	24	0	0	0	
47	2,155	2,0011	0,022298	3	3	0,80	0,35	19	21	24	0	0	0	
53	1,795	1,0704	0,740282	3	4	0,20	0,50	20	31	33	34	0	0	
53	1,671	1,8218	0,565283	3	4	0,20	0,50	20	22	27	34	0	0	
62	1,793	1,3848	0,022209	3	4	0,50	0,35	1	16	27	29	0	0	
62	1,824	1,5859	0,035620	3	4	0,50	0,35	18	22	24	27	0	0	
64	1,792	0,8457	0,445027	3	4	0,5	0,65	17	20	27	28	0	0	
67	1,825	1,1519	0,036228	3	4	0,65	0,35	17	20	22	28	0	0	
67	1,941	0,9909	0,038493	3	4	0,65	0,35	8	11	14	22	0	0	
69	1,829	1,3576	0,737540	3	4	0,65	0,65	4	13	22	24	0	0	
70	1,715	1,7812	0,862274	3	4	0,65	0,8	1	14	22	27	0	0	
70	1,936	2,1252	0,560041	3	4	0,65	0,8	14	18	21	22	0	0	
71	2,042	2,0592	0,036603	3	4	0,8	0,2	2	4	19	29	0	0	
72	1,983	1,0587	0,022879	3	4	0,8	0,35	1	3	14	24	0	0	
74	1,858	0,9510	0,684392	3	4	0,8	0,65	8	20	28	31	0	0	
75	1,866	0,9705	0,703772	3	4	0,8	0,8	1	3	29	34	0	0	
76	1,691	2,4271	0,036235	3	5	0,2	0,2	20	22	27	31	34	0	
78	1,563	3,2020	0,616135	3	5	0,2	0,5	20	22	27	31	34	0	
78	1,507	1,6055	0,459492	3	5	0,2	0,5	4	22	27	31	34	0	
93	2,187	1,2478	0,662767	3	5	0,65	0,5	2	8	17	21	29	0	
94	1,737	2,7213	0,526431	3	5	0,65	0,65	5	8	13	27	29	0	
94	1,9939	1,2020	0,824378	3	5	0,65	0,65	3	11	16	18	24	0	
102	1,4064	2,3049	0,575416	3	6	0,2	0,35	4	22	27	31	33	34	
110	1,5218	2,7939	0,565191	3	6	0,35	0,8	8	17	20	22	28	34	
120	1,656	3,0079	0,799651	3	6	0,65	0,8	3	5	14	17	20	24	
121	1,7386	2,5323	0,024758	3	6	0,8	0,2	8	9	16	17	19	22	
121	1,6449	2,4635	0,021992	3	6	0,8	0,2	2	3	4	8	9	18	
122	1,8575	3,8875	0,738095	3	6	0,8	0,35	5	9	19	20	24	34	
123	1,7958	2,6129	0,802572	3	6	0,8	0,5	1	2	11	28	31	33	
123	1,885	4,3260	0,710042	3	6	0,8	0,5	11	19	21	23	26	31	
125	1,7681	4,2819	0,646162	3	6	0,8	0,8	16	17	18	20	23	29	

Tabla 70 Soluciones simulación red 34 nodos descuento aplicado 3

8.2.7 Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 1  
12500 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs							
5	2,681	1,5037	2,394321	1	4	0,20	0,80	1	19	28	43	0	0	0	0
7	2,894	1,2340	0,090228	1	4	0,35	0,35	1	4	27	42	0	0	0	0
13	2,682	2,1861	1,696503	1	4	0,50	0,50	19	27	28	41	0	0	0	0
18	3,047	3,3750	2,774547	1	4	0,65	0,50	10	26	27	45	0	0	0	0
18	2,696	1,6979	1,803039	1	4	0,65	0,50	1	2	21	36	0	0	0	0
22	3,023	2,7800	0,052730	1	4	0,80	0,35	6	14	17	33	0	0	0	0
26	2,819	1,9182	0,088136	1	5	0,20	0,20	1	3	27	42	43	0	0	0
30	2,540	3,0559	2,473571	1	5	0,20	0,80	3	8	27	29	42	0	0	0
36	2,734	1,4887	0,086204	1	5	0,50	0,20	7	23	29	45	47	0	0	0
37	2,740	2,2158	0,052252	1	5	0,50	0,35	1	8	11	23	44	0	0	0
44	2,728	3,0033	1,813742	1	5	0,65	0,65	3	11	16	23	27	0	0	0
50	2,896	4,5895	3,247260	1	5	0,80	0,80	5	11	14	15	23	0	0	0
52	2,626	2,3784	2,244882	1	6	0,20	0,35	3	8	19	27	42	43	0	0
52	2,596	1,5647	1,805860	1	6	0,20	0,35	1	3	7	19	42	43	0	0
57	2,825	2,3669	2,316300	1	6	0,35	0,35	1	4	28	29	38	42	0	0
59	2,573	2,8724	2,334301	1	6	0,35	0,65	7	11	19	27	36	43	0	0
59	2,561	1,6521	2,519605	1	6	0,35	0,65	1	4	7	27	40	43	0	0
62	2,665	2,5358	1,606007	1	6	0,5	0,35	8	23	36	43	45	47	0	0
66	2,724	3,1026	0,053927	1	6	0,65	0,2	16	26	30	40	44	47	0	0
70	2,664	3,7917	2,570995	1	6	0,65	0,8	2	10	16	42	43	44	0	0
77	2,516	2,3878	1,753064	1	7	0,2	0,35	1	3	7	19	27	28	43	0
78	2,470	2,6356	2,625076	1	7	0,2	0,5	1	3	7	28	29	42	43	0
79	2,477	2,3807	1,819730	1	7	0,2	0,65	1	3	7	8	19	28	42	0
86	2,518	3,6743	0,084631	1	7	0,5	0,2	1	4	7	8	15	28	45	0
86	2,580	2,6552	0,052666	1	7	0,5	0,2	1	15	36	40	42	44	45	0
93	2,504	4,8277	2,824735	1	7	0,65	0,5	1	10	15	16	19	35	42	0
95	2,426	5,1805	2,241656	1	7	0,65	0,8	7	10	11	14	29	36	43	0
102	2,391	3,3371	1,486762	1	8	0,2	0,35	1	3	8	27	28	29	42	43
102	2,419	3,1014	2,166242	1	8	0,2	0,35	1	3	7	19	27	28	29	42
103	2,407	3,3027	1,929769	1	8	0,2	0,5	1	3	8	19	28	29	42	43
103	2,3811	3,3385	2,957322	1	8	0,2	0,5	3	7	8	19	27	28	29	43
103	2,4107	3,1014	2,926747	1	8	0,2	0,5	1	3	7	19	27	28	29	42
104	2,3522	3,1681	2,199703	1	8	0,2	0,65	1	3	7	8	27	29	42	43
112	2,4727	2,9566	1,663688	1	8	0,5	0,35	1	4	7	23	28	32	45	47
118	2,5454	4,4199	2,913160	1	8	0,65	0,5	19	26	30	32	35	36	38	42
118	2,4754	4,8219	1,929267	1	8	0,65	0,5	1	3	4	8	10	16	19	38
119	2,3712	3,9605	1,908996	1	8	0,65	0,65	1	3	7	8	11	15	44	45
122	2,6202	5,3734	1,654214	1	8	0,8	0,35	3	8	11	26	38	40	44	46
123	2,6098	4,1629	2,895313	1	8	0,8	0,5	1	2	3	16	19	23	24	33
123	2,6735	3,0465	1,771699	1	8	0,8	0,5	30	36	38	41	42	44	45	47

Tabla 71 Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 1

## 8.2.8 Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 2

12500 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs							
2	2,663	0,9826	0,087588	2	4	0,20	0,35	1	19	27	29	0	0	0	0
7	2,888	0,7085	0,082123	2	4	0,35	0,35	3	7	28	40	0	0	0	0
11	2,787	1,9790	0,050720	2	4	0,50	0,20	8	11	32	41	0	0	0	0
22	2,967	2,9547	0,082435	2	4	0,80	0,35	2	12	30	45	0	0	0	0
23	2,931	0,8222	1,618904	2	4	0,80	0,50	17	21	44	46	0	0	0	0
25	2,686	4,2063	1,843284	2	4	0,80	0,80	12	27	33	42	0	0	0	0
30	2,439	2,3202	2,188267	2	5	0,20	0,80	1	3	8	19	29	0	0	0
31	2,706	3,3425	0,082829	2	5	0,35	0,20	1	3	29	36	38	0	0	0
33	2,603	1,2201	2,039690	2	5	0,35	0,50	1	19	23	36	40	0	0	0
38	2,487	2,2844	1,748916	2	5	0,50	0,50	21	27	38	40	43	0	0	0
40	2,667	1,6708	3,029932	2	5	0,50	0,80	21	28	40	41	43	0	0	0
48	2,647	1,7343	1,497248	2	5	0,80	0,50	23	35	39	40	46	0	0	0
48	2,595	4,2652	2,153025	2	5	0,80	0,50	2	5	6	12	32	0	0	0
50	2,642	1,9805	1,715597	2	5	0,80	0,80	1	11	38	39	46	0	0	0
52	2,318	2,4210	1,689018	2	6	0,20	0,35	1	19	27	28	29	42	0	0
53	2,407	1,0727	2,617608	2	6	0,2	0,5	1	7	8	29	42	43	0	0
54	2,378	1,3063	2,507822	2	6	0,2	0,65	1	7	8	19	27	29	0	0
57	2,644	1,9103	1,560249	2	6	0,35	0,35	8	11	23	38	40	45	0	0
61	2,739	2,4471	0,083676	2	6	0,5	0,2	3	11	28	40	41	43	0	0
70	2,588	3,4397	1,983609	2	6	0,65	0,8	2	14	16	19	24	28	0	0
70	2,525	3,3932	2,465411	2	6	0,65	0,8	10	21	29	40	41	47	0	0
72	2,462	3,3860	1,609744	2	6	0,8	0,35	10	14	19	29	32	43	0	0
73	2,648	1,9015	2,429011	2	6	0,8	0,5	8	23	24	32	39	47	0	0
75	2,934	2,8943	1,779051	2	6	0,8	0,8	5	14	17	24	33	46	0	0
79	2,312	2,5750	2,853847	2	7	0,2	0,65	1	7	8	19	28	29	42	0
80	2,364	1,9126	2,262404	2	7	0,2	0,8	1	3	7	8	19	42	43	0
85	2,363	2,5274	2,896971	2	7	0,35	0,8	4	7	8	11	27	28	29	0
87	2,487	1,8805	1,746503	2	7	0,5	0,35	1	15	19	23	24	27	32	0
93	2,439	3,4033	2,618457	2	7	0,65	0,5	2	11	23	26	29	32	35	0
95	2,376	3,3480	2,717548	2	7	0,65	0,8	2	3	15	19	29	30	41	0
106	2,3862	2,1623	0,083160	2	8	0,35	0,2	1	7	19	23	29	36	43	45
106	2,4244	3,7437	0,083273	2	8	0,35	0,2	3	11	23	29	36	40	43	45
107	2,3407	3,3377	2,275998	2	8	0,35	0,35	4	19	28	29	38	40	43	45
109	2,2667	3,3240	2,018070	2	8	0,35	0,65	1	3	7	11	23	27	36	45
109	2,397	3,1738	2,001455	2	8	0,35	0,65	3	8	23	38	40	42	43	45
111	2,5408	3,1718	0,082070	2	8	0,5	0,2	3	11	15	24	29	32	41	47
115	2,4291	3,9384	2,038339	2	8	0,5	0,8	3	8	11	19	28	29	36	38
118	2,4923	4,3807	1,982786	2	8	0,65	0,5	1	10	15	28	30	32	36	38
122	2,567	4,1652	1,460008	2	8	0,8	0,35	1	8	11	14	24	33	46	47
125	2,178	3,7140	2,729610	2	8	0,8	0,8	6	7	8	27	28	29	43	44

Tabla 72 Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 2

8.2.9 Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 3  
12500 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs							
4	2,240	1,5037	1,701274	3	4	0,20	0,65	1	7	28	43	0	0	0	0
6	2,547	1,0840	0,083024	3	4	0,35	0,20	1	4	27	42	0	0	0	0
9	2,189	1,1105	2,288439	3	4	0,35	0,65	19	23	29	42	0	0	0	0
9	2,137	1,2894	1,980342	3	4	0,35	0,65	19	28	43	45	0	0	0	0
10	2,432	0,7085	1,730822	3	4	0,35	0,80	11	19	28	40	0	0	0	0
10	2,392	1,2043	2,034662	3	4	0,35	0,80	7	8	40	45	0	0	0	0
15	2,525	0,8169	1,735300	3	4	0,50	0,80	1	15	32	36	0	0	0	0
18	2,397	3,1892	1,558037	3	4	0,65	0,50	11	14	27	35	0	0	0	0
18	2,633	0,4447	1,568751	3	4	0,65	0,50	14	15	24	36	0	0	0	0
20	2,801	1,4612	2,863979	3	4	0,65	0,80	15	24	26	44	0	0	0	0
20	2,499	0,9559	1,900829	3	4	0,65	0,80	8	24	36	47	0	0	0	0
21	2,892	2,0526	0,081706	3	4	0,80	0,20	3	24	30	33	0	0	0	0
25	2,409	1,5151	1,780694	3	4	0,80	0,80	3	41	45	46	0	0	0	0
26	2,262	2,4924	0,082561	3	5	0,20	0,20	7	27	28	29	43	0	0	0
26	2,313	1,6145	0,082509	3	5	0,20	0,20	3	19	28	42	43	0	0	0
27	2,202	1,4837	0,082483	3	5	0,2	0,35	8	19	28	29	42	0	0	0
28	2,152	1,8018	1,427706	3	5	0,2	0,5	1	3	8	19	43	0	0	0
31	2,636	1,5603	0,082058	3	5	0,35	0,2	7	11	19	27	38	0	0	0
36	2,952	0,7152	0,082776	3	5	0,5	0,2	1	4	21	32	44	0	0	0
38	2,151	2,6989	1,565428	3	5	0,5	0,5	7	23	24	27	45	0	0	0
40	2,248	2,2425	2,981118	3	5	0,5	0,8	8	24	29	43	47	0	0	0
40	2,131	2,1497	1,891468	3	5	0,5	0,8	3	15	24	27	38	0	0	0
42	2,133	2,1837	0,050847	3	5	0,65	0,35	2	15	21	26	42	0	0	0
45	2,331	1,4949	2,416948	3	5	0,65	0,8	8	11	21	24	47	0	0	0
45	2,406	1,2227	1,902664	3	5	0,65	0,8	11	16	26	28	35	0	0	0
51	2,075	1,7381	0,082591	3	6	0,2	0,2	8	27	28	29	42	43	0	0
54	2,136	1,7655	1,852737	3	6	0,2	0,65	3	7	8	19	27	29	0	0
55	2,137	1,0949	3,040551	3	6	0,2	0,8	1	7	8	19	27	29	0	0
74	1,982	2,5406	1,686181	3	6	0,8	0,65	2	4	11	29	36	43	0	0
84	1,915	1,9439	1,862777	3	7	0,35	0,65	11	19	23	28	38	42	43	0
84	2,0157	1,5589	1,781400	3	7	0,35	0,65	1	7	23	27	38	40	45	0
85	2,0054	2,7451	2,113921	3	7	0,35	0,8	3	4	7	23	27	29	40	0
86	2,4176	1,8280	0,083309	3	7	0,5	0,2	4	8	21	32	40	42	47	0
99	2,0901	2,3925	2,080855	3	7	0,8	0,65	8	28	29	30	40	41	47	0
103	1,8492	1,4770	1,929110	3	8	0,2	0,5	1	7	8	19	27	29	42	43
107	1,9407	2,2432	1,596549	3	8	0,35	0,35	1	3	7	8	23	27	36	43
108	1,9466	3,2380	1,704671	3	8	0,35	0,5	7	8	11	23	27	29	40	45
118	2,0748	2,6604	2,767883	3	8	0,65	0,5	10	16	19	21	32	38	41	45
123	1,9157	3,1708	2,129156	3	8	0,8	0,5	4	27	28	33	36	40	42	44
125	2,141	4,4703	3,053751	3	8	0,8	0,8	2	3	7	17	24	42	44	47

Tabla 73 Soluciones simulación red 47 nodos descuento aplicado 3

8.2.10 Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 1  
20000 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs							
4	2,689	4,3438	1,893849	1	1	0,20	0,65	2	3	9	18	42	0	0	0
8	2,682	4,8805	1,362595	1	1	0,35	0,50	2	3	4	9	18	0	0	0
11	2,832	3,7900	0,052546	1	1	0,50	0,20	2	3	7	9	18	0	0	0
17	3,024	4,4294	0,087123	1	1	0,65	0,35	2	3	9	18	26	0	0	0
19	2,848	4,6776	1,916947	1	1	0,65	0,65	2	3	9	10	18	0	0	0
21	2,794	4,2758	0,053092	1	1	0,80	0,20	2	3	9	18	28	0	0	0
23	2,837	5,4349	1,485483	1	1	0,80	0,50	2	3	6	9	18	0	0	0
24	2,684	4,8805	1,904945	1	1	0,80	0,65	2	3	4	9	18	0	0	0
24	2,821	4,4294	1,895371	1	1	0,80	0,65	2	3	9	18	26	0	0	0
24	2,828	5,7438	1,663437	1	1	0,80	0,65	2	3	9	18	46	0	0	0
25	2,789	4,2732	2,423662	1	1	0,80	0,80	2	3	9	18	38	0	0	0
28	2,703	4,7837	1,793533	1	2	0,20	0,50	2	3	9	18	19	29	0	0
31	2,752	5,5419	0,086613	1	2	0,35	0,20	2	3	9	18	36	43	0	0
34	2,588	5,0954	2,134474	1	2	0,35	0,65	1	2	3	9	18	42	0	0
36	2,842	5,4046	0,086949	1	2	0,50	0,20	2	3	9	18	23	40	0	0
38	2,686	4,8366	1,757703	1	2	0,5	0,5	2	3	9	15	18	40	0	0
41	2,749	5,1946	0,053575	1	2	0,65	0,2	2	3	9	18	30	36	0	0
43	2,638	5,4875	2,649655	1	2	0,65	0,5	2	3	9	18	29	42	0	0
47	2,819	6,6371	1,469378	1	2	0,8	0,35	2	3	9	14	18	46	0	0
48	2,614	6,1474	2,171692	1	2	0,8	0,5	2	3	9	18	24	43	0	0
52	2,543	5,1785	1,439596	1	3	0,2	0,35	2	3	9	18	19	42	43	0
52	2,488	5,4875	1,623257	1	3	0,2	0,35	1	2	3	9	18	29	42	0
58	2,592	5,5752	2,350685	1	3	0,35	0,5	2	3	4	9	18	19	40	0
63	2,672	5,6615	2,643720	1	3	0,5	0,5	2	3	9	18	21	44	47	0
68	2,689	6,5394	2,195020	1	3	0,65	0,5	2	3	9	14	18	28	40	0
69	2,720	5,3377	1,896391	1	3	0,65	0,65	2	3	9	18	26	36	40	0
71	2,684	4,8752	0,074954	1	3	0,8	0,2	2	3	8	9	11	18	24	0
72	2,674	4,8366	1,422617	1	3	0,8	0,35	2	3	9	15	18	36	40	0
74	2,533	5,5997	2,391337	1	3	0,8	0,65	2	3	9	18	19	29	42	0
77	2,591	4,7993	1,831645	1	4	0,2	0,35	2	3	7	8	9	18	19	29
78	2,4716	5,5997	3,016024	1	4	0,2	0,5	2	3	8	9	18	19	29	42
80	2,4996	5,5408	2,424952	1	4	0,2	0,8	2	3	9	18	19	27	42	43
84	2,5071	6,1023	2,173721	1	4	0,35	0,65	2	3	8	9	18	23	28	43
85	2,6457	5,1460	2,027778	1	4	0,35	0,8	2	3	7	9	11	18	27	29
87	2,4865	5,5416	1,466174	1	4	0,5	0,35	1	2	3	9	18	29	32	36
88	2,5624	5,7007	2,024333	1	4	0,5	0,5	2	3	4	9	18	23	27	36
95	2,5334	6,7794	1,798720	1	4	0,65	0,8	1	2	3	9	10	18	19	43
96	2,843	7,4818	0,087951	1	4	0,8	0,2	2	3	9	10	18	27	35	45
97	2,528	5,6953	1,403160	1	4	0,8	0,35	1	2	3	9	11	18	36	42
100	2,701	7,0528	3,137789	1	4	0,8	0,8	2	3	9	10	18	23	27	35

Tabla 74 Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 1



8.2.11 Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 2  
20000 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs							
2	2,505	4,3438	0,065270	2	1	0,20	0,35	2	3	9	18	42	0	0	0
2	2,944	2,9027	0,085917	2	1	0,20	0,35	2	3	7	9	18	0	0	0
11	2,548	4,1140	0,063741	2	1	0,50	0,20	2	3	9	18	21	0	0	0
16	2,505	4,3438	0,062748	2	1	0,65	0,20	2	3	9	18	42	0	0	0
19	2,738	4,1858	1,754907	2	1	0,65	0,65	2	3	9	18	40	0	0	0
19	2,549	4,8632	1,693146	2	1	0,65	0,65	1	2	3	9	18	0	0	0
19	2,739	4,1858	1,696928	2	1	0,65	0,65	2	3	9	18	40	0	0	0
23	2,651	4,4027	1,612592	2	1	0,80	0,50	2	3	9	18	45	0	0	0
28	2,714	4,4905	1,706189	2	2	0,20	0,50	2	3	8	9	18	27	0	0
28	2,544	4,2770	2,314694	2	2	0,20	0,50	2	3	8	9	18	29	0	0
30	2,508	4,9754	1,917785	2	2	0,20	0,80	1	2	3	7	9	18	0	0
31	2,585	4,5427	0,052349	2	2	0,35	0,20	2	3	9	18	28	29	0	0
33	2,489	5,3610	2,617595	2	2	0,35	0,50	2	3	9	18	40	42	0	0
36	2,494	5,5419	0,053123	2	2	0,50	0,20	2	3	9	18	36	43	0	0
39	2,549	5,5051	1,628592	2	2	0,50	0,65	2	3	9	18	32	47	0	0
51	2,413	5,5997	0,087818	2	3	0,2	0,2	2	3	9	18	19	29	42	0
60	2,582	2,9027	1,950650	2	3	0,35	0,8	2	3	7	9	11	18	28	0
60	2,386	4,5762	2,013078	2	3	0,35	0,8	1	2	3	9	18	29	36	0
60	2,419	6,4088	1,999948	2	3	0,35	0,8	2	3	9	18	23	38	43	0
62	2,443	4,4652	1,351822	2	3	0,5	0,35	1	2	3	4	9	18	29	0
64	2,464	5,9424	2,296014	2	3	0,5	0,65	2	3	9	18	21	23	43	0
65	2,519	5,5168	3,028412	2	3	0,5	0,8	2	3	7	9	18	21	43	0
66	2,366	6,0914	0,053406	2	3	0,65	0,2	2	3	9	18	23	35	44	0
68	2,343	5,3849	1,707370	2	3	0,65	0,5	1	2	3	9	18	21	45	0
69	2,469	4,4914	1,848981	2	3	0,65	0,65	2	3	9	15	18	32	43	0
72	2,671	4,1530	1,647868	2	3	0,8	0,35	2	3	7	9	11	18	30	0
72	2,615	5,9679	1,433364	2	3	0,8	0,35	2	3	6	9	18	26	28	0
73	2,422	4,8853	2,769476	2	3	0,8	0,5	2	3	9	18	27	42	44	0
75	2,350	5,8200	1,984828	2	3	0,8	0,8	2	3	9	14	18	29	32	0
79	2,514	4,3123	2,982674	2	4	0,2	0,65	2	3	7	8	9	18	27	29
81	2,411	5,9173	0,088861	2	4	0,35	0,2	2	3	9	18	27	42	43	45
82	2,359	4,8315	1,420567	2	4	0,35	0,35	2	3	7	9	18	29	36	45
82	2,4047	5,7055	1,810433	2	4	0,35	0,35	2	3	8	9	11	18	36	43
88	2,498	5,3490	1,695410	2	4	0,5	0,5	2	3	8	9	15	18	24	47
88	2,4088	6,0739	2,272163	2	4	0,5	0,5	2	3	8	9	18	24	45	47
89	2,4131	5,1703	2,847087	2	4	0,5	0,65	2	3	9	18	21	27	40	45
94	2,3757	5,6751	1,809912	2	4	0,65	0,65	2	3	9	18	26	41	42	44
94	2,2964	5,6970	1,923373	2	4	0,65	0,65	1	2	3	9	18	40	43	44
94	2,4767	5,5752	2,803822	2	4	0,65	0,65	2	3	4	7	9	18	19	40
95	2,4578	6,5505	2,771197	2	4	0,65	0,8	2	3	8	9	14	18	19	45

Tabla 75 Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 2

8.2.12 Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 3  
20000 soluciones, de las cuales se muestran:

Iter	Coste	kmVías	t sim	Dto	Nº HUBs	alfa-h	alfa-n	HUBs							
1	2,405	3,0875	0,050475	3	1	0,20	0,20	2	3	9	18	19	0	0	0
1	2,386	2,9027	0,050033	3	1	0,20	0,20	2	3	7	9	18	0	0	0
3	2,342	4,3438	2,485412	3	1	0,20	0,50	2	3	9	18	42	0	0	0
5	2,186	5,0255	1,805596	3	1	0,20	0,80	2	3	9	18	43	0	0	0
11	2,388	4,8805	0,082553	3	1	0,50	0,20	2	3	4	9	18	0	0	0
14	2,212	4,8632	1,713574	3	1	0,50	0,65	1	2	3	9	18	0	0	0
20	2,258	4,4743	1,734334	3	1	0,65	0,80	2	3	9	18	23	0	0	0
22	2,386	2,9027	0,050889	3	1	0,80	0,35	2	3	7	9	18	0	0	0
22	2,735	4,2256	0,085376	3	1	0,80	0,35	2	3	9	18	30	0	0	0
23	2,412	5,6694	1,320323	3	1	0,80	0,50	2	3	9	14	18	0	0	0
25	2,235	4,9616	1,837203	3	1	0,80	0,80	2	3	9	18	32	0	0	0
26	2,162	4,9754	0,052543	3	2	0,20	0,20	1	2	3	7	9	18	0	0
27	2,224	4,8908	2,265852	3	2	0,20	0,35	2	3	9	18	19	42	0	0
29	2,124	5,0548	1,580087	3	2	0,20	0,65	1	2	3	9	18	43	0	0
30	2,334	3,2650	2,081571	3	2	0,20	0,80	2	3	7	9	18	27	0	0
31	2,173	3,5999	0,087536	3	2	0,35	0,2	2	3	9	18	29	43	0	0
33	2,124	5,4629	3,027787	3	2	0,35	0,5	2	3	4	9	18	40	0	0
33	2,308	4,6438	1,742472	3	2	0,35	0,5	2	3	9	18	36	40	0	0
34	2,077	5,1127	2,037613	3	2	0,35	0,65	2	3	4	9	18	42	0	0
35	2,339	3,0106	1,823590	3	2	0,35	0,8	2	3	7	9	18	27	0	0
36	2,257	4,7970	0,084252	3	2	0,5	0,2	2	3	9	18	24	29	0	0
37	2,347	3,2650	1,397366	3	2	0,5	0,35	2	3	9	18	19	27	0	0
46	2,364	3,4442	0,082616	3	2	0,8	0,2	2	3	4	5	9	18	0	0
52	2,089	5,3151	1,464754	3	3	0,2	0,35	2	3	7	9	18	27	43	0
55	1,956	4,9977	1,911991	3	3	0,2	0,8	2	3	9	18	29	42	43	0
56	2,007	4,1594	0,063471	3	3	0,35	0,2	1	2	3	7	9	18	38	0
56	2,117	4,2967	0,083325	3	3	0,35	0,2	2	3	4	9	18	42	45	0
59	2,095	4,2658	2,358500	3	3	0,35	0,65	1	2	3	4	9	18	29	0
63	2,019	3,5223	2,395985	3	3	0,5	0,5	2	3	9	15	18	44	45	0
68	2,136	3,2866	1,914801	3	3	0,65	0,5	2	3	7	9	11	18	44	0
73	2,169	6,1435	2,362165	3	3	0,8	0,5	2	3	9	18	26	36	46	0
75	2,0735	5,5902	2,745131	3	3	0,8	0,8	2	3	9	14	18	35	41	0
76	1,9642	3,4442	0,084147	3	4	0,2	0,2	2	3	7	8	9	18	29	43
78	1,9095	5,4286	2,011917	3	4	0,2	0,5	2	3	8	9	18	27	42	43
81	2,4329	4,6679	0,083005	3	4	0,35	0,2	2	3	7	8	9	18	27	28
88	2,0007	5,3838	2,662767	3	4	0,5	0,5	1	2	3	9	15	18	19	44
95	2,1808	5,6143	2,105707	3	4	0,65	0,8	2	3	9	14	18	19	36	47
95	2,0903	7,9432	2,786480	3	4	0,65	0,8	2	3	9	10	14	18	23	38
97	2,3402	6,5656	2,236297	3	4	0,8	0,35	2	3	9	12	18	27	28	33
100	2,014	4,1992	1,867585	3	4	0,8	0,8	2	3	5	9	11	18	28	44

Tabla 76 Soluciones simulación red 47 nodos con nodos fijos descuento aplicado 3

Presupuesto



# ÍNDICE

---

Índice.....	3
1 Introducción.....	5
2 Cuadro de precios.....	6
2.1 Resumen partidas de presupuesto .....	9



# 1 INTRODUCCIÓN

---

En este documento se presenta el presupuesto del proyecto. Al ser un proyecto cuyo objetivo se enmarca en el ámbito del I+D, los costes principales representan las horas dedicadas por los ingenieros intervinientes en la realización del proyecto.

Como consideraciones a tener en cuenta:

Se establecen como costes complementarios partidas cuya cuantía es pequeña en comparación con los otros gastos y gastos difícilmente evaluables. Los costes complementarios que establezcan un 1% del total, serán debidos a una baja indeterminación de dichos costes, además de no conllevar costes de transporte. Los costes complementarios que establezcan un 3% del total se aplican si la actividad conlleva costes de transporte. Por último, unos costes complementarios de 10 % se deben a la difícil estimación de los gastos incurridos

los gastos asociados al material de uso común en la realización de estos proyectos (electricidad, papel, material de oficina, teléfono, internet) se incluyen en la partida gastos generales y se estiman en un 5% del presupuesto de ejecución.

El beneficio industrial se estima en un 6%. Esta partida establece el beneficio que una empresa ganaría con la realización de este proyecto.

## 2 CUADRO DE PRECIOS

Nº Orden	Nº Precio	Descripción	Rendimiento	Precio	Importe
01		Estudio preliminar del problema			
01.01	P01.01	Ud. Reunión entre analistas para analizar la problemática y recabar una primera información			
	MOII1	h Ingeniero industrial 1	2,00	60,00	120,00
	MOII2	h Ingeniero industrial 2	2,00	30,00	60,00
	%	Costes complementarios	0,03	180,00	5,40
				Subtotal	185,40
01.02	P01.02	Ud. Reunión entre analistas para especificar tareas a desarrollar			
	MOII1	h Ingeniero industrial 1	1,00	60,00	60,00
	MOII2	h Ingeniero Industrial 2	1,00	30,00	30,00
	%	Costes complementarios	0,03	90,00	2,70
				Subtotal	92,70
01.03	P01.03	Ud. Búsqueda bibliográfica			
	MOII1	h Ingeniero industrial 1	2,00	60,00	120,00
	MOII2	h Ingeniero Industrial 2	3,00	30,00	90,00
	%	Costes complementarios	0,03	210,00	6,30
				Subtotal	216,30
01.04	P01.04	Ud. Estudio de la información recogida y establecimiento de conclusiones para la etapa de análisis			
	MOII2	h Ingeniero Industrial 2	8,00	30,00	240,00
	%	Costes complementarios	0,01	240,00	2,40
				Subtotal	242,40
01.05	P01.05	Ud. Redacción de informes sobre bibliografía previa			
	MOII2	h Ingeniero Industrial 2	10,00	30,00	300,00
	%	Costes complementarios	0,03	300,00	9,00
				Subtotal	309,00



Nº Orden	Nº Precio	Descripción	Rendimiento	Precio	Importe
<b>02</b>					
<b>Estudio de técnicas de resolución</b>					
02.01	P02.01	Ud. Búsqueda de información			
	MOII2	h Ingeniero Industrial 2	10,00	30,00	300,00
	%	Costes complementarios	0,01	300,00	3,00
				Subtotal	303,00
02.01	P02.01	Ud. Estudio de la información recogida			
	MOII2	h Ingeniero Industrial 2	12,00	30,00	360,00
	%	Costes complementarios	0,01	360,00	3,60
				Subtotal	363,60
02.01	P02.01	Ud. Redacción de informes sobre técnicas y procedimientos matemáticos a utilizar			
	MOII2	h Ingeniero industrial 2	6,00	30,00	180,00
	%	Costes complementarios	0,01	180,00	1,80
				Subtotal	181,80
<b>03</b>					
<b>Implementación de algoritmos de resolución</b>					
03.01	P03.01	Ud. Reunión entre analistas para determinar el modo de resolución y las técnicas a utilizar			
	MOII1	h Ingeniero industrial 1	2,00	60,00	120,00
	MOII2	h Ingeniero Industrial 2	2,00	30,00	60,00
	%	Costes complementarios	0,03	180,00	5,40
				Subtotal	185,40
03.02	P03.02	Ud. Programación de algoritmos			
	MOII2	h Ingeniero Industrial 2	100,00	30,00	3000,00
	%	Costes complementarios	0,10	3000,00	300,00
				Subtotal	3300,00
03.03	P03.03	Ud. Simulación de experimentos			
	MOII2	h Ingeniero Industrial 2	20,00	30,00	600,00
	%	Costes complementarios	0,10	600,00	60,00
				Subtotal	660,00

03.04	P03.04	Ud.	Redacción de informes sobre el funcionamiento de los algoritmos y análisis de las simulaciones				
	MOII2	h	Ingeniero Industrial 2	20,00	30,00	600,00	
		%	Costes complementarios	0,01	600,00	6,00	
						Subtotal	606,00

Nº Orden	Nº Precio		Descripción	Rendimiento	Precio	Importe	
<b>04 Evaluación de resultados</b>							
04.01	P04.01	Ud.	Redacción de informe sobre el funcionamiento global de la herramienta y propuesta de soluciones				
	MOII2	h	Ingeniero industrial 2	30,00	30,00	900,00	
		%	Costes complementarios	0,01	900,00	9,00	
						Subtotal	909,00

04.02	P04.02	Ud.	Reunión para determinar la utilidad de los algoritmos diseñado y corrección de errores				
	MOII1	h	Ingeniero industrial 1	3,00	60,00	180,00	
	MOII2	h	Ingeniero industrial 2	3,00	30,00	90,00	
		%	Costes complementarios	0,03	270,00	8,10	
						Subtotal	278,10

04.03	P04.03	Ud.	Redacción de informes final y presentación de la solución propuesta				
	MOII2	h	Ingeniero industrial 2	5,00	30,00	150,00	
		%	Costes complementarios	0,01	150,00	1,50	
						Subtotal	151,50

Nº Orden	Nº Precio	Descripción	Rendimiento	Precio	Importe	
<b>05</b>						
<b>Material informático</b>						
05.01	P05.01	Ud. Software para la realización del proyecto				
	MOS1	h Matworks Matlab	120,00	10,00	1200,00	
	MOS2	h Microsoft Excel	30,00	2,00	60,00	
	MOS3	h Microsoft Word	60,00	2,00	120,00	
		% Costes complementarios	0,10	1380,00	138,00	
					Subtotal	1518,00
05.02	P05.02	Ud. Hardware para la realización del proyecto				
	MOH1	h Equipo Informático	300,00	0,50	150,00	
	MOS2	h Sistema de refrigeración adicional	1,00	30,00	30,00	
	MOS3	h Consumibles	1,00	50,00	50,00	
		% Costes complementarios	0,10	230,00	23,00	
					Subtotal	253,00

## 2.1 RESUMEN PARTIDAS DE PRESUPUESTO

Nº Orden	Nº Precio	Descripción	Subtotal
<b>01</b>			
<b>Estudio preliminar del problema</b>			
01.01	P01.01	Ud. Reunión entre analistas para analizar la problemática y recabar una primera información	185,40
01.02	P01.02	Ud. Reunión entre analistas para especificar tareas a desarrollar	92,70
01.03	P01.03	Ud. Búsqueda bibliográfica	216,30
01.04	P01.04	Ud. Estudio de la información recogida y establecimiento de conclusiones para la etapa de análisis	242,40
01.05	P01.05	Ud. Redacción de informes sobre bibliografía previa	309,00
<b>02</b>			
<b>Estudio de técnicas de resolución</b>			
02.01	P02.01	Ud. Búsqueda de información	303,00
02.01	P02.01	Ud. Estudio de la información recogida	363,60
02.01	P02.01	Ud. Redacción de informes sobre técnicas y procedimientos matemáticos a utilizar	181,80
<b>03</b>			
<b>Implementación de algoritmos de resolución</b>			
03.01	P03.01	Ud. Reunión entre analistas para determinar el modo de resolución y las técnicas a utilizar	185,40
03.02	P03.02	Ud. Programación de algoritmos	3300,00
03.03	P03.03	Ud. Simulación de experimentos	660,00
03.04	P03.04	Ud. Redacción de informes sobre el funcionamiento de los algoritmos y análisis de las simulaciones	606,00

04		Evaluación de resultados		
04.01	P04.01	Ud.	Redacción de informe sobre el funcionamiento global de la herramienta y propuesta de soluciones	909,00
04.02	P04.02	Ud.	Reunión para determinar la utilidad de los algoritmos diseñado y corrección de errores	278,10
04.03	P04.03	Ud.	Redacción de informes final y presentación de la solución propuesta	151,50
05		Material informático		
05.01	P05.01	Ud.	Software para la realización del proyecto	1518,00
05.02	P05.02	Ud.	Hardware para la realización del proyecto	253,00
			<b>Presupuesto Ejecución</b>	<b>9'755,20 €</b>
			Beneficio industrial 6%	585,31 €
			<b>Presupuesto General</b>	<b>10'340,51 €</b>
			IVA 21%	2'171,51 €
			<b>Presupuesto Total</b>	<b>12'512,02 €</b>