

# PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

## OPTIMOS: Optimización para la Movilidad Sostenible.

(MTM2006-14961-C05).

### 1. Quiénes somos

UPC	UV	ULL	UMu	URJC
Elena Fernández	Angel Corberán	Juan-José Salazar	Alfredo Marín	Antonio Alonso Ayuso
María Albareda Sambola. Jaime Barceló Joaquín Bautista Julian Aráoz. (visitante UPC) Juan Antonio Díaz. UDLAP (Mx). Oscar Meza Houtteman. USB (Ve)	Enrique Benavent Enrique Mota Isaac Plana José María Sanchis	Inmaculada Rodríguez Jorge Riera Hipólito Hernández Carmen Elvira Ramos María Teresa Ramos Celina Pestano Gabino	Lázaro Cánovas Mercedes Landete	Cesar Beltrán. Marco Busatto Javier Cano. Emma Galindo. Ana García. Javier Martínez Moguerza Raquel Montes. Alberto Olivares. M <sup>a</sup> Teresa Ortuño. Celeste Pizarro. Clara Simón de Blas Angel Udías.
Diana Cobos. Ivan Contreras. Carles Franquesa. Hanna Grzybowska. Mari Paz Linares	Virginia Sorando. María Santágueda.			

### 2. Dónde estamos (científicamente hablando)

En el Programa Nacional de Matemáticas nuestra actividad se enmarca en la línea temática 12: "Investigación Operativa. En particular, con los descriptores 12.1: "Programación matemática"; 12.2. "Modelos de investigación operativa deterministas y estocásticos"; y con los apartados "tráfico", "gestión de la producción y la distribución" y "localización", mencionados en el descriptor 12.4 "Aplicaciones".

#### Específicamente:

- Problemas de Optimización (modelos de Programación Matemática):
  - Problemas de Programación Lineal Entera (PLE). Problemas de optimización Combinatoria.
    - Aplicación a problemas de Localización de Servicios y de diseño de rutas de vehículos.
  - Problemas de Programación Estocástica (normalmente con variables discretas).

**Dado que son problemas de optimización en dominios discretos, son problemas de optimización no convexos, y no diferenciables.**

- Modelos de Simulación dinámica de tráfico urbano
- Integración de simulación/optimización para aplicaciones de logística urbana (city logistics).

## **2.1 BREVE RESUMEN DE OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA Y SU RELACIÓN CON LA OPTIMIZACIÓN DE PROBLEMAS DE RUTAS DE VEHÍCULOS Y LOCALIZACIÓN DE SERVICIOS**

El estudio matemático de diversos tipos de problemas de rutas ha sido abordado ya desde el siglo XVIII. Tradicionalmente, este tipo de problemas ha sido planteado en términos de problemas en grafos en los que se desea identificar algún tipo de recorrido que satisfaga ciertas condiciones. Estos problemas pueden clasificarse en dos grandes familias según se establezcan las condiciones sobre los arcos o los nodos del grafo considerado. Ejemplos de problemas del primer tipo son todos aquellos en los que los vehículos deben prestar el servicio en los arcos del grafo, como en el caso de la recogida de basura, reparto de correo, limpieza de carreteras, diseño y mantenimiento de una red de tendido eléctrico, telefónico, etc. Ejemplos de problemas del segundo tipo son todos aquellos problemas en los que los vehículos realizan el servicio sobre los nodos del grafo, como ocurre en problemas de distribución/recogida de mercancías que aparecen casi siempre en el sector privado. Diferentes problemas de transporte público pertenecen tanto al primer como al segundo grupo.

El antecedente más remoto del estudio matemático de problemas del primer grupo se encuentra en los trabajos de Euler (1759), quien dio condiciones necesarias y suficientes para la existencia de una ruta circular que recorriese exactamente una vez todas las carreteras de un grafo. Las condiciones fueron luego extendidas a rutas no circulares por Hierholzer en 1873. Otro trabajo de referencia forzosa aparece con Guan, un cartero matemático que afrontó en 1962 el hoy conocido como Problema del Cartero Chino (CPP): “encontrar una circuito de coste mínimo que atraviese cada enlace de un grafo al menos una vez”.

El estudio de los problemas del segundo tipo tiene su antecedente en los trabajos de Kirkman (1856), que estableció condiciones suficientes en un grafo poliédrico para la existencia de un ciclo que recorriese exactamente una vez todos los nodos del grafo, y de Hamilton (1856) quién estudió diversos problemas relacionados con ciclos en grafos. Estos estudios son el precedente del problema combinatorio de mayor relevancia actualmente que es el llamado Problema del Viajante de Comercio (TSP): “encontrar una ruta de mínima longitud que visite cada nodo de un grafo exactamente una vez”. Comparando las versiones básicas del CPP y del TSP, éste resulta un problema intrínsecamente mucho más difícil que el primero, y a él se han dedicado libros enteros, como el ya clásico editado por Lawler, Lenstra, Rinnooy-Kan y Shmoys (1985), o el más reciente editado por Gutin y Punnen (2002).

Los problemas de localización también han sido ampliamente estudiados matemáticamente. Los orígenes de la teoría moderna de Localización pueden establecerse en el trabajo de Weber (1909) quién en un tratado sobre la ubicación de industrias estudió el problema de la mediana: “identificar un punto del plano que minimice la suma de distancias a un conjunto dado de puntos”. Hakimi (1964) diferenció por primera vez el problema de *la mediana* del problema del centro: “se desea identificar un punto del plano que minimice el máximo de las distancias a los puntos de un conjunto dado”. Ambos problemas se han extendido al caso en el que haya que seleccionar  $p$  puntos en el plano. Ahora, dado un punto, la medida que evalúa su distancia a un conjunto de  $p$  puntos seleccionados es el mínimo de las distancias a los  $p$  puntos en el plano. Así, dado un conjunto de puntos, el problema de la  $p$ -mediana consiste en identificar  $p$  puntos del plano tales que minimizan la suma de la distancia mínima de cada punto a los  $p$  puntos seleccionados, mientras que el problema del  $p$ -centro consiste en identificar  $p$  puntos del plano que minimizan el máximo de la distancia mínima de cada punto a los  $p$  puntos seleccionados. Durante los años 60 y principios de los 70 los problemas de  $p$ -centro se utilizaron en aplicaciones del sector privado y los de  $p$ -mediana en aplicaciones del sector público. Esta situación cambió radicalmente a mediados de los 70 cuando primero Goldman y Dearing (1975) y posteriormente Church y Garfinkel (1978) plantearon la optimización de problemas de localización de servicios no deseados, como ocurre en aplicaciones a la ubicación de vertederos de basura, plantas purificadoras de agua, o centrales nucleares.

Hay numerosas familias de problemas de localización. En el libro editado por Drezner (1995) se recogen diversos trabajos en los que se consideran distintas familias de problemas así como técnicas adecuadas para su resolución. Sin embargo, en este proyecto limitaremos nuestra atención aquellos problemas de localización discreta en los que:

- a) la ubicación de las plantas debe seleccionarse entre un conjunto discreto; o
- b) tanto los clientes como las plantas únicamente puedan estar situados en los nodos y/o arcos de un determinado grafo.

Desde el punto de vista formal, los problemas planteados pueden tratarse desde la perspectiva de la Optimización Combinatoria y matemáticamente pueden formularse como problemas de Programación Lineal Entera. Existen en la literatura numerosas monografías dedicadas a esta disciplina entre las que podemos señalar los clásicos textos de Lawler (1976) y Papadimitriou y Steiglitz (1982), y el más reciente libro de Schrijver (2003). Una excelente recopilación bibliográfica de todo tipo de problemas de Optimización Combinatoria puede encontrarse en el libro editado por Dell'Amico, Maffioli y Martello (1997). Como problemas de optimización, todos los problemas planteados pertenecen a la clase NP-Hard. Esto significa que a no ser que  $P=NP$ , lo cual parece altamente improbable, no existirán algoritmos que garanticen la obtención de soluciones óptimas en tiempos polinómicos en el tamaño de los problemas.

Se han propuesto distintos tipos de métodos para la solución de los problemas de Optimización Combinatoria. Los llamados “métodos de enumeración implícita” son técnicas clásicas de resolución que utilizan explícitamente la finitud del conjunto de soluciones posibles de los problemas para explorarlo por completo aprovechando algunas características combinatorias del problema. Dentro de estos métodos se encuentran los populares métodos de ramificación y acotación (en inglés branch and bound) así como los de programación dinámica. Entre las primeras referencias a métodos de ramificación y acotación podemos mencionar

el trabajo de Little et al. (1963), que posiblemente es el primer algoritmo de este tipo para problemas de rutas, así como el trabajo de Lawler y Wood (1966).

La combinatoria poliédrica estudia poliedros asociados a problemas de optimización combinatoria. En particular, estos poliedros vienen definidos por las envolventes convexas de los conjuntos de soluciones factibles de los problemas. El teorema de Minkowski-Weyl (1896- 1949) establece la equivalencia entre la envolvente convexa de un conjunto finito de puntos y la descripción poliédrica de dicha envolvente convexa mediante un sistema finito de ecuaciones e inecuaciones lineales. Esta equivalencia implica que es posible resolver un problema de optimización en un conjunto no convexo mediante la resolución de un problema de optimización en un conjunto convexo. En consecuencia, cuando los poliedros que caracterizan las envolventes convexas de las soluciones factibles son conocidos, es posible encontrar las soluciones óptimas de los problemas combinatorios con función objetivo lineal mediante la resolución de problemas de programación lineal.

El trabajo seminal en este ámbito es el debido a Edmonds (1965) que caracterizó el poliedro asociado al problema de acoplamiento (Matching), mediante un sistema de inecuaciones lineales. Los métodos de planos de corte (o planos secantes) están orientados a caracterizar algunas de las desigualdades que definen un poliedro. Los primeros trabajos en los que se utiliza la información poliédrica para atacar problemas difíciles de optimización combinatoria son los de Dantzig, Fulkerson y Johnson (1954, 1959). Desde el punto de vista algorítmico ello permite abordar la resolución de los problemas mediante procedimientos iterativos que proporcionan cotas inferiores (para problemas de minimización) sucesivamente mejores. El elemento crucial en los métodos de planos de corte es la resolución del llamado problema de separación que consiste en: dado un punto  $x^*$  y un poliedro  $P$ , identificar, si es que existe, una de las desigualdades que definen  $P$ ,  $\pi x \leq \pi_0$ , que no se satisfaga por  $x^*$ . Desde el punto de vista teórico, la importancia del problema de separación se deriva de un resultado debido a Grötschel, Lovász y Schrijver (1981) que establece la equivalencia de la complejidad entre la optimización de una función objetivo lineal en un conjunto convexo y el problema de separación respecto al conjunto convexo. Desde el punto de vista práctico, la importancia del problema de separación se deriva del hecho de que permite diseñar algoritmos iterativos para la resolución de problemas de optimización en los que la resolución repetida del problema de separación permite identificar únicamente aquellas desigualdades del poliedro en el que se esté optimizando que sean necesarias para caracterizar la solución óptima. Actualmente, los métodos algorítmicos más eficientes son los llamados de ramificación y corte (branch and cut) que combinan las dos metodologías anteriores. Estos métodos híbridos fueron propuestos inicialmente por Padberg y Rinaldi (1987, 1991).

Dentro de los métodos que permiten abordar la resolución eficiente de problemas de gran escala, debemos también mencionar los de generación de columnas. Estos métodos, que fueron originalmente propuestos para la resolución de problemas estructurados de programación lineal (ver Gilmore y Gomory, 1961, 1963), se han sabido adaptar para diversos problemas de programación lineal entera (Desrosiers, Soumis and Desrochers, 84; Desrosiers y Soumis 1989) y se han extendido a los algoritmos enumerativos de branch-and-price que actualmente también gozan de gran popularidad (ver, p.ej. Barnhart, Johnson, Nemhauser, Savelsbergh, y Vance, 1998).

En todas las metodologías resultan importantes tanto el desarrollo de potentes relajaciones (esto es, simplificaciones de modelo que aporten cotas inferiores) como métodos heurísticos (métodos eficientes para generar rápidamente soluciones factibles próximas a ser óptimas, y por tanto que aportan cotas superiores). La posibilidad de construir problemas duales convexificados mediante la aplicación de la relajación lagrangiana (Geoffrion, 1974) a problemas de Programación Lineal Entera tiene un indudable interés tanto teórico como práctico. En los últimos 15 años ha habido una enorme proliferación de diversos métodos heurísticos que han sido aplicados a distintos tipos de problemas de optimización combinatoria (ver, p.ej., el libro editado por Ribeiro y Hansen, 2001).

Debido al interés teórico como problemas de optimización combinatoria que tienen tanto los problemas de localización como los de rutas, a su enorme variedad de aplicaciones, y a la enorme cantidad de dinero que las empresas e instituciones públicas destinan a problemas logísticos relacionados con tareas de distribución/recogida, han sido muchos los trabajos dedicados a su estudio que han aparecido en los últimos 50 años.

## **2.2 TRATAMIENTO DE LA INCERTIDUMBRE EN LA DEMANDA Y CAPACIDAD EN PROBLEMAS DE RUTAS DE VEHÍCULOS Y LOCALIZACIÓN DE SERVICIOS. PROGRAMACIÓN ESTOCÁSTICA.**

El problema de la incertidumbre se ha venido tratando regularmente en la literatura sobre programación matemática desde 1955, año en el que se publicaron los trabajos seminales sobre la materia debidos a Beale (1955) y Dantzig (1955), independientemente. No obstante, dado el alto grado de sofisticación que la resolución del problema requiere, un tratamiento para resolver problemas prácticos de programación matemática con incertidumbre no se ha podido abordar hasta la eclosión del maridaje de Ciencias Matemáticas y Ciencias de la Computación en los años 80. En los avances teóricos en Programación Estocástica se trata la incertidumbre a base de utilizar el riesgo con esquemas en los mismos modelos de programación matemática y, por tanto, en su correspondiente algoritmia. Es muy frecuente, por otra parte, observar la reducción de toda la información estocástica que se tiene sobre el problema a meros promedios de los valores de los parámetros inciertos. De esta forma, lastimosamente, en lugar de proporcionar soluciones para un problema estocástico, se proporcionan soluciones para un problema determinista, que puede que no exista, con el riesgo inherente que conlleve la solución a proporcionar, que incluso puede que ni siquiera sea factible para muchos escenarios.

Por el contrario, los tratamientos estocásticos al problema de optimización lo abordan desde perspectivas distintas. Un resumen de los principales enfoques y metodología, así como de los importantes requerimientos computacionales está descrito en la presentación de Laureano Escudero.

### **2.3 OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN EN LA LA GESTIÓN DINÁMICA DE FLOTAS DE VEHÍCULOS**

Todos los enfoques conducen a la conclusión de que los modelos de rutas de vehículos y programación y secuenciación de flotas son los que proporcionan las técnicas fundamentales para modelar las aplicaciones de logística urbana. La presencia de las nuevas tecnologías da particular relevancia a los casos en que:

- Las características del servicio a los clientes obligan a establecer ventanas temporales (intervalos de tiempo en que se puede proceder a dotar de servicio al cliente).
- Cuando la programación y secuenciación de los vehículos y la definición de sus rutas ha de ser dinámica, basada en información en tiempo real, porque la información cambia mientras los vehículos están procediendo a prestar servicio y las rutas han de actualizarse a partir de la información recibida, que puede ser de diferentes tipos:
  - Información sobre niveles de servicio en la red viaria, tiempos de desplazamiento, incidentes, averías de los vehículos de servicio, congestiones de tráfico, etc.; tiempos de prestación del servicio, tiempos de espera para prestar el servicio, etc.
  - Sobre las demandas de los clientes: ubicación del cliente, ventanas temporales, cantidad de demanda, prioridades, etc.
  - Sobre los vehículos de la flota: localización, estado de la carga, capacidad disponible, etc.

En consecuencia, los modelos que tengan en cuenta estas nuevas dimensiones han de ser modelos capaces de incluir también los aspectos dinámicos necesarios. Propuestas metodológicas de este tipo han sido realizadas por Taniguchi et al. (2000 y 2001), y por Kohler (1997). Los modelos de simulación dinámica del tráfico emulan las condiciones reales del tráfico urbano, proporcionando en cada intervalo de tiempo las estimaciones de los tiempos de viaje en curso, las longitudes de las colas en cada sección de la red viaria, etc., con el objetivo de determinar la programación y la ruta óptima de vehículo.

Una situación adicional más compleja es el caso de los sistemas dinámicos de gestión de flotas en los que los operadores de las flotas de distribución han de ser capaces de responder a cambios en la demanda y la disponibilidad del vehículo o de la carga, teniendo también en cuenta las variaciones temporales de las condiciones de tráfico en la red viaria. Este tipo de sistemas es esencial para aprovechar la ventaja que supone la información en tiempo real que proporcionan los avances tecnológicos en localización dinámica (GPS), comunicaciones móviles (GSM, GPRS, UMTS) y Sistemas de Información Geográfica. Para modelar adecuadamente este tipo de sistemas son necesarios los modelos de simulación dinámica del tráfico (Regan et al.; 1997, 1998). En ellos se supone un conocimiento parcial de la demanda inicial, de manera que el servicio se inicia al principio del periodo de tiempo considerado proponiendo un programa de trabajo inicial para que la flota empiece a satisfacer la demanda conocida. Este plan operacional inicial posteriormente será modificado, a medida que avanza la operación y se dispone de nueva información en tiempo real que puede corresponder a la aparición de nueva demanda, condiciones de demanda insatisfecha, cambios en las rutas asignadas a los vehículos debido a cambios en las condiciones del tráfico, cambios en la disponibilidad de la y otros. La nueva información alimenta un programador y calculador de rutas dinámico que calcula un nuevo plan operacional dinámico.

### **Referencias:**

- C. Barnhart, E.L. Johnson, G.L. Nemhauser, M.W.P. Savelsbergh, P.H. Vance, 1998, Branch-and-Price: Column Generation for Huge Integer Programs. *Operations Research* 46, 316-329.
- Beale, E.M.L., On Minimizing a Convex Function Subject to Linear Inequalities, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 17, 173-184, 1955.
- Church, R. L. and R.S. Garfinkel, 1978, Locating an Obnoxious Facility on a Network, *Transportation Science*, 12, 107-118.
- Dantzig, G.B., D.R. Fulkerson y S.M. Johnson, 1954, Solution of a large-scale traveling salesman problem, *Operations Research* 2, 393-410.
- Dantzig, G.B., *Linear Programming under Uncertainty*, *Management Science* 1, 197-206, 1955.
- Dantzig, G.B., D.R. Fulkerson y S.M. Johnson, 1959, On a linear programming combinatorial approach to the traveling salesman problem, *Operations Research* 7, 58-66.
- Dell'Amico, M., F. Maffioli, S. Martello (eds), 1997, "Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization", John Wiley & Sons, ISBN 0-471-9657-X).
- Desrosiers, J. y F. Soumis, 1989, A Column Generation Approach to the Urban Transit Crew Scheduling Problem, *Transportation Science* 23, 1-13.
- Desrosiers, J., F. Soumis y M. Desrochers, 1984, Routing with Time Windows by Column Generation, *Networks* 14, 545-565.
- Drezner, Z. (editor), 1995, "Facility Location", Springer-Verlag.
- Edmonds, J., 1965, Maximum Matching and a Polyhedron with 0-1 vertices, *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 69B, 125-130.
- Euler, L., 1736, "Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis", *Comment. Academiae Sci. I. Petropolitanae* 8, 128-140.

- Gilmore, P.C. y R.E. Gomory, 1961, A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem, *Operations Research* 9, 849-859.
- Gilmore, P.C. y R.E. Gomory, 1963, A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem: Part II, *Operations Research* 11, 863-888.
- M.Guan, 1962, "Graphic Programming Using Odd and Even Points", *Chinese Math* 1, 273-277.
- Grötschel, M., L. Lovász and A. Schrijver, 1981, The ellipsoid method and its consequences in combinatorial optimization, *Combinatorica* 1 169-197.
- Gutin, G. y A. Punnen, 2002 *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*, Kluwer Academic Publishers.
- Hakimi, S.L., 1964, Optimal Location of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph, *Operations Research* 12, 450-459.
- Hamilton, W.R. , 1858, Memorandum respecting a new system of roots of unity (the Icosian calculus), *Philosophical Magazine* 12 (1856) 446 *Proceedings of the Royal Irish Academy* 6 415--416 [reprinted in: *The Mathematical Papers of Sir William Rowan Hamilton - Vol. III Algebra* (H. Halberstam, R.E. Ingram, eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 1967, p. 610].
- Hamilton, W.R. , 1858, On a new system of roots of unity, *Proceedings of the Royal Irish Academy* 6 415--416 [reprinted in: *The Mathematical Papers of Sir William Rowan Hamilton - Vol. III Algebra* (H. Halberstam, R.E. Ingram, eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 1967, p. 609].
- Hierholzer, C., 1873, "Über die Möglichkeit, einen Linienzug ohne Wiederholung und ohne Unterbrechnung zu umfahren", *Mathematische Annalen* 6, 30-32.
- Kirkman, T.P., 1856, On the representation of polyhedra, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 146 413--418.
- Kohler, U., 1997, An innovating concept for City Logistics, *Proceedings of the 4th World Congress on ITS*, Berlin
- Lawler, E.L., 1976, *Combinatorial Optimization: Networks and Matroids*, Holt, Rinehart and Winston, New York.
- Lawler, E.L., J.K. Lenstra, A.H.G. Rinnooy Khan y D.B. Shmoys (eds.), 1985, *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*, John Wiley.
- Lawler, E.L. y W.E. Wood, 1966, Branch and bound methods: A survey, *Operations Research* 14, 699-719,.
- Little, J.D.C., K.G. Murty, D.W. Sweeny y C. Karel, 1972, An Algorithm for the Traveling Salesman Problem, *Operations Research* 11, 972-989.
- Minkowski H., 1896, *Geometrie der Zahlen* (Erste Lieferung), Teubner, Leipzig.
- Padberg, M. y G. Rinaldi, 1987, Optimization of a 532-city symmetric traveling salesman problem by branch-and-cut, *Operations Research Letters* 6, 1-7.
- Padberg, M. y G. Rinaldi, 1991, A branch-and-cut algorithm for the resolution of large-scale symmetric traveling salesman problems, *SIAM Review* 33, 60-100.
- Papdimitriou, C.H., K. Steiglitz, 1982, *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Ribeiro, C.C., P. Hansen (eds.), 2001, *Essays and Surveys in Metaheuristics*, Springer.
- Schrijver, A., 2003, *Combinatorial Optimization: Polyhedra and Efficiency*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- A. C. Regan, H.S. Mahmassani and P. Jaillet, 1997, Dynamic decision making for commercial fleet operations using real-time information, *Transportation research record*, 1537.
- A. C. Regan, H.S. Mahmassani and P. Jaillet, 1998, Evaluation of dynamic fleet management systems: Simulation Framework, *Transportation research record*, 1645
- E. Taniguchi and R.E.C.M van der Heijden, 2000, An Evaluation Methodology for City Logistics, *Transport Reviews*, Vol. 20, No. 1, pp. 65-90.
- Taniguchi, E., R.G. Thompson, T. Yamada and R. Van Duin, *City Logistics: Network Modelling and Intelligent Transport Systems*, Pergamon 2001.
- Weber, A., 1909, *Über den Standort der Industrien*, 1. Teil: Reine Theorie des Standortes, Tübingen, Germany.
- Weyl, H. , 1935, *Elementare Theorie der konvexen Polyeder*, *Commentarii Mathematici Helvetici* 7 290-306 (English translation: *The elementary theory of convex polyhedra*, in: *Contributions to the Theory of Games I*, H.W. Kuhn, A.W. Tucker eds., Princeton University Press, Princeton, 1950).

### **3. Qué metodología utilizamos**

Para los problemas abordados seguimos un esquema metodológico común, que abarca las siguientes fases:

1. Construcción de modelos de Programación Matemática. Análisis de las posibles alternativas de modelación e identificación formal de aquellas que resulten en estructuras concretas que, en fases posteriores, permitan una resolución más eficiente de los problemas. En ocasiones, la complejidad de los problemas conlleva que los modelos tengan en cuenta la naturaleza estocástica de los elementos que intervengan.  
Cuando el problema sea determinista, típicamente el modelo propuesto será uno de Programación Lineal Entera. Cuando la naturaleza del problema sea estocástica en ocasiones utilizamos modelos adaptativos en varias etapas con acción de recurso.
2. Análisis de las propiedades del modelo propuesto. En ese este punto abordamos el estudio poliédrico del conjunto de soluciones y, en concreto, el estudio de desigualdades para fortalecer la formulación del problema. Esto nos lleva a estudiar el problema de separación para los tipos de desigualdades identificados y a proponer métodos de resolución para dicho problema. Alternativamente, estudiamos la estructura del problema propuesto y las propiedades de sus posibles métodos de descomposición como relajaciones lagrangianas o descomposiciones de Benders. En ocasiones, para los problemas con un gran número de variables analizamos la posibilidad de caracterizar la estructura de las "columnas" de coeficientes de las variables para utilizar un método de generación de columnas. Ello conlleva el estudio del llamado problema de "pricing" para identificar las columnas candidatas a formar parte de la solución.
3. Diseño e implementación de métodos de optimización que permitan la resolución eficiente de los modelos construidos. El método elegido depende del estudio realizado en el punto anterior y en ocasiones proponemos algoritmos híbridos que integren varios métodos. En el caso de algoritmos exactos diseñamos árboles de enumeración que integran desigualdades válidas (branch-and-cut) o métodos de generación de columnas (branch-and-price). Para los problemas estocásticos serán árboles de escenarios tipo branch-and-fix coordinados.  
Prestamos especial atención a la implementación de relajaciones para obtener cotas inferiores (para problemas de minimización). En el caso de algoritmos basados en la resolución de la relajación lineal, se incorporan de forma iterativa las desigualdades válidas obtenidas mediante la resolución del problema de separación. En el caso de relajaciones lagrangianas utilizaremos métodos de optimización subgradiente para resolver el dual lagrangiano. En su caso, las cotas obtenidas podrán utilizarse en el árbol de enumeración para una exploración más eficiente del mismo que permita eliminar la mayor cantidad de nodos.  
En todos los casos diseñaremos también métodos heurísticos que proporcionen soluciones factibles para el problema en tiempos reducidos. Dependiendo del problema se utilizarán metodologías heurísticas diferentes, aunque actualmente los métodos de búsqueda tabú (tabu search), búsqueda dispersa (scatter search) y los métodos de búsqueda en entornos de profundidad variable (variable neighborhood search) están proporcionando grandes resultados para difíciles problemas de localización y de rutas.  
Las cotas superiores (para problemas de minimización) asociadas a las soluciones obtenidas se contrastarán con las cotas inferiores proporcionadas por las relajaciones, lo cual permitirá obtener estimaciones de la calidad de las soluciones obtenidas y del "salto" (gap) de optimalidad. De nuevo, esta información podrá utilizarse en los árboles de enumeración para una exploración más eficiente y una eventual eliminación de algunos nodos.
4. Diseño y realización de una experiencia computacional para la obtención de resultados empíricos. Esta fase requiere la búsqueda de repositorios de instancias representativas para su utilización como banco de pruebas. En su defecto generaremos una batería de problemas test que permitan evaluar la influencia de los diferentes datos numéricos en los métodos propuestos. Una vez realizada la experiencia computacional, realizamos un análisis de los resultados obtenidos y extraeremos las conclusiones pertinentes sobre los mismos.

## **4. Nuestros requerimientos computacionales.**

Uno de los objetivos de nuestra investigación es el diseñar métodos de resolución para los problemas estudiados que utilicen explícitamente la estructura del problema y que computacionalmente sean superiores a los métodos de propósito general y a los métodos específicos que hayan sido propuestos anteriormente (cuando estos existan). Por tanto, un elemento importante en nuestra investigación es la implementación de nuestros propios métodos.

Las instancias que resolvemos frecuentemente tienen miles de variables y cientos/miles de restricciones. Por tanto, al tratarse de problemas de grandes dimensiones, cuando éstos tienen una estructura específica, recurrimos a métodos de descomposición que permitan resolver el problema original mediante la resolución iterativa de una serie de subproblemas de dimensiones menores.

Las técnicas que frecuentemente implementamos están basadas en la optimización/reoptimización de problemas de programación lineal y en métodos de descomposición entre los que los más frecuentes están basados en la Generación de Columnas o la Descomposición de Benders. Estos métodos típicamente requieren la manipulación algebraica de sistemas de ecuaciones/inecuaciones lineales, así como distintos tipos de actualizaciones.

También es frecuente que recurramos a técnicas de resolución de problemas duales. Los más frecuentes son los llamados duales lagrangianos, cuya resolución requiere de métodos numéricos de optimización de funciones no diferenciables (p. ej. optimización subgradiente).

Dadas las dimensiones de los problemas que abordamos y la dificultad de los métodos que implementamos, en todos los casos es necesario recurrir a sofisticadas estructuras de datos que permitan almacenar y manipular de forma eficiente los datos tratados. Cuando las dimensiones de los problemas rebasan ciertos umbrales, la única manera de poder obtener resultados numéricos es recurriendo a la computación distribuida o a la computación en paralelo.

## **5. Relación con otros grupos nacionales e internacionales.**

Existen en España otros grupos de Investigación que trabajan en un ámbito metodológico similar al nuestro para abordar distintos tipos de problemas de Programación Matemática, con los que mantenemos relaciones fluidas. Estas relaciones se articulan a través de las redes temáticas en las que participamos, ya sea como coordinadores o como participantes. Estas son las siguientes :

Coordinación:

- Red temática: Análisis y Aplicaciones de Decisiones sobre Localización de Servicios y Problemas Relacionados. (MTM2005-24550-E).

Participación:

- Red Temática en Optimización bajo incertidumbre (MTM2004-21648-E)
- Red Temática de Metaheurísticas (TIN2004-20061-E).
- Red Temática Española en Logística Inversa (SEJ-2004-20495-E)

A nivel internacional existen distintos grupos con los que nuestra relación de investigación ha dado lugar a publicaciones conjuntas en revistas de JCR, que mencionamos a continuación. Podemos mencionar grupos altamente especializados en temas de Optimización Combinatoria Poliédrica para problemas de rutas de vehículos como el del Institut für Informatik de la Universidad de Heildeberg (Alemania), liderado por Gerhard Reinelt; el de la Universidad de Bolonia (Italia), con nombres tan relevantes como Paolo Toth o Daniele Vigo; o el grupo de Adam Letchford de la Universidad de Lancaster (Reino Unido). En la Université Libre de Bruxelles (Bélgica), colaboramos con Martine Labbé, que dirige el Service de Mathematique de la Gestion, con gran reconocimiento en la aplicación de Optimización Combinatoria a problemas de localización y rutas. Asimismo, en localización y otros problemas de optimización relacionados con la logística podemos mencionar el grupo de Stefan Nickel de Universität des Saarlandes en Saarbrücken (Alemania) y del Franunhofer Institut Techno-und-Wirtschaftsmathematik (ITWM) en Kaiserslautern. En temas de Programación Estocástica mantenemos colaboración con los grupos de Maarten van der Vlerk del Departament of Econometrics and OR en la universidad de Groningen (Holanda); el grupo liderado por Rüdiger Schultz en la universidad de Duisburg-Essen y el Department of Math Sciences de la Universidad de Brunel (Reino Unido), bajo la supervisión de Gautam Mitra. Otro grupo de reconocido prestigio está liderado por el Prof. Francois Louveau (Bélgica), quien ha investigado con éxito nuevos algoritmos para problemas de rutas de vehículos con demandas estocástica.

Finalmente, también debemos resaltar la relación fluida que mantenemos hace tiempo con diversos profesores del "Centre de recherche sur les transports, CRT", como Jean Francois Cordeau, Mike Florian y Gilbert Laporte.

## **5. RESUMEN DE NUESTRO HISTORIAL DESDE 2000**

### **5.1. Publicaciones**

#### **5.1.a. Publicaciones en revistas indexadas en el JCR**

- M. Albareda-Sambola, E. Fernández, G. Laporte (2005), "Upper and Lower bounds for a Stochastic Location Routing Problem, European Journal of Operational Research (aceptado).
- M. Albareda-Sambola, J.A. Díaz, E. Fernández (2005), A compact model and tight bounds for a combined Location-Routing Problem, Computers and Operations Research 32 407-428.
- M. Albareda-Sambola, M.H. van der Vlerk, E. Fernández (2005), Exact Solutions to a Class of Stochastic Generalized Assignment Problems, European Journal of Operational Research 173(2) 465-487.
- A. Alonso-Ayuso, L.F. Escudero, M.T. Ortuño y C. Pizarro (2005), On a Stochastic Sequencing and Scheduling problem, Computers and Operations Research (aceptado).
- A. Alonso-Ayuso, L.F. Escudero, A. Garín, M.T. Ortuño y G. Pérez (2005), On the Product Selection and Plant Dimensioning Problem under uncertainty, OMEGA. 33, 307-318.
- A. Alonso-Ayuso, L.F. Escudero and M.T. Ortuño (2003), BFC, A Branch-and-Fix Coordination Algorithmic Framework for



- Solving some types of Stochastic Pure and Mixed 0-1 Programs, *European Journal of Operational Research*, 151, 503-519.
- A. Alonso-Ayuso, L.F. Escudero, A. Garín, M.T. Ortuño y G. Pérez (2003), An approach for Strategic Supply Chain Planning under Uncertainty based on Stochastic 0-1 Programming, *Journal of Global Optimization* 24, 97-124.
  - A. Alonso-Ayuso, P. Detti, L.F. Escudero and M.T. Ortuño (2003), On Dual Based Lower Bounds for the Sequential Ordering Problem with Precedences and Due Dates. *Annals of Operations Research*, 124, 111-131.
  - A. Alonso-Ayuso, L.F. Escudero, M.T. Ortuño (2000), A stochastic 0-1 program based approach for the Air Traffic Flow Management Problem, *European Journal of Operational Research*, 120-1, 47-62.
  - J. Aráoz, E. Fernández, C. Zoltan (2004), The Privatized Rural Postman Problem, *Computers and Operations Research* 33, 3432-3449.
  - F. Baboneau, C. Beltrán, C. Tadonki, J.-P. Vial (2005), Proximal-ACCPM: a versatile oracle based optimization method. *Computational Management Science*, (aceptado).
  - J. Barceló, E. Codina, J. Casas, J.L. Ferrer and D. García (2004), "Microscopic Traffic Simulation: a tool for the design, analysis and evaluation of Intelligent Transport Systems", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 41, 173-203.
  - J.M. Belenguer, E. Benavent, y M.C. Martínez (2005), "RutaRep: A Computer Package to Design Dispatching Routes in the Meat Industry", *Journal of Food Engineering* 70, pp: 435-445.
  - J.M. Belenguer, E. Benavent, P. Lacomme, y C. Prins, "Lower and Upper Bounds for the Mixed Capacitated Arc Routing Problem", *Computers and Operations Research*. (aceptado).
  - C. Beltran, N. Edwards, A. B. Haurie, J.-Ph. Vial and D. S. Zachary (2005), Oracle-based optimization applied to climate model calibration. *Environmental Modelling and Assessment*, (aceptado).
  - C. Beltrán, C. Tadonki and J.-P. Vial (2005), Solving the p-median problem with a semi-Lagrangian relaxation. *Computational Optimization and Applications* (aceptado).
  - C. Beltrán, F.J. Heredia (2005), An effective line search for the subgradient method. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 125.
  - C. Beltrán, F.J. Heredia (2002), Unit commitment by augmented Lagrangian relaxation: testing two decomposition approaches. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 112, 295-314.
  - E. Benavent, A. Corberán, E. Piñana, I. Plana, J.M. Sanchis (2005), "New Heuristics for the Windy Rural Postman Problem", *Computers and Operations Research* 32 3111-3128.
  - E. Benavent, A. Carrota, A. Corberán, J.M. Sanchis, D. Vigo (2005), "Lower Bounds and Heuristics for the Windy Rural Postman Problem". *European Journal of Operational Research* (aceptado).
  - L. Cánovas, S. García, A. Marín, "Solving the uncapacitated multiple allocation hub location problem by branch-and-bound", *European Journal of Operational Research* (aceptado).
  - L. Cánovas, M. Landete, A. Marín (2003) "On the facets of the simple plant location packing polytope", *Discrete Applied Mathematics* 125-1, 27-53.
  - L. Cánovas, M. Landete, A. Marín, New formulations for the uncapacitated multiple allocation hub location problem, *European Journal of Operational Research* (aceptado).
  - E.Codina and J. Barceló (2004), "Adjustment of O-D matrices from observed volumes: an algorithmic approach based on conjugate gradients", *European Journal of Operations Research* 155, 535-557.
  - A. Corberán, E. Fernández, M., Laguna, R., Martí (2002), "Heuristic Solutions to the Problem of Routing School Buses with Multiple Objectives", *Journal of the Operational Research Society*, vol. 53, 427-435.
  - A. Corberán, A. Letchford, J.M. Sanchis (2001), "A Cutting-Plane Algorithm for the General Routing Problem". *Mathematical Programming*, vol. 90, pp. 291-316.
  - A. Corberán, R. Martí, E. Martínez, D. Soler (2002), "The Rural Postman Problem on Mixed graphs with Turn Penalties", *Computers & Operations Research* 29, 887-90
  - A. Corberán, R. Martí, J.M. Sanchis (2002), "A GRASP for the Mixed Postman Problem", *European Journal of Operations Research* 142, 70-80.
  - A. Corberán, A., G. Mejía, J.M. Sanchis, (2005) "New Results on the Mixed General Routing Problem", *Operations Research* 53, 363-376.
  - A. Corberán, E. Mota, J.M. Sanchis, "A Comparison of Two Different Formulations for Arc Routing Problems on Mixed Graphs", *Computers and Operations Research* (aceptado).
  - A. Corberán, E. Mota, J.J. Salazar González (2003), "Some recent contributions to routing and location problems" *Networks* 42 109-113.
  - A. Corberán, I. Plana, and J.M. Sanchis, "Zigzag inequalities: A new class of facet-inducing inequalities for Arc Routing Problems". *Mathematical Programming*. (aceptado).
  - A. Corberán, A. Romero, J.M., Sanchis (2003), "The Mixed General Routing Polyhedron", *Mathematical Programming*, vol. 96, pp. 103-137.
  - J.A. Díaz, E. Fernández (2001), A Tabu Search Heuristic for the Generalized Assignment Problem, *European Journal of Operational Research* 132(1) 22- 38.
  - J.A. Díaz, E. Fernández (2002), A Branch and Price Algorithm for the Single Source Capacitated Plant Location Problem, *Journal of Operational Research Society* 53(7) 728-748.

- J.A. Díaz, E. Fernández (2006) Hybrid Scatter Search and Path Relinking for the Capacitated p-Median Problem, *European Journal of Operational Research* 169(2) 570-585.
- E. Fernández, Y. Hinojosa, J. Puerto (2005), Anticipated policies in loss queuing-location problems, *Annals of Operations Research* 136, 259-283.
- E. Fernández, O. Meza, R. Garfinkel, M. Ortega (2003), On the Undirected Rural Postman Problem: Tight bounds based on a new formulation, *Operations Research*, 51 (2) 281-291.
- E. Fernández, O. Meza (2004), Even cycles and perfect matching problems with side constraints, *Journal of Combinatorial Optimization* 8 381-396.
- E. Fernández, J. Puerto (2003), The multiobjective solution of the uncapacitated plant location problem, *European Journal of Operational Research* 145(3) 509- 529.
- P. Fernández, A. Marín (2003) "A heuristic procedure for path location with multisource demand", *INFOR* 41-2, 165-177.
- M. Fischetti, G. Romanin Jacur, J.J. Salazar (2003), "Optimisation of the interconnection network of a UMTS radio mobile telephone system" *European Journal of Operational Research* 144, 56-67.
- R. Garfinkel, E. Fernández, O. R. Gopal (2003), Design of an Interactive Spell Checker: Optimizing the List of Offered Words, *Decision Support Systems* 35 (3) 385-297-
- H. Hernández Pérez, J.J. Salazar González (2002), "The one-commodity Pickup-and-Delivery Traveling Salesman Problem" In "Eureka! You shrink" (edited by M. Jünger, G. Reinelt, G. Rinaldi) Springer Lecture Notes in Computer Science 2570, 89-104.
- H. Hernández Pérez, J.J. Salazar González (2004), "A Branch and Cut Algorithm for the Traveling Salesman Problem with Pickups and Deliveries" *Discrete Applied Mathematics* 145, 126-139.
- M. Labbé, G. Laporte, I. Rodríguez Martín, J.J. Salazar González (2004), "The Ring Star Problem: Polyhedral Analysis and Exact Algorithm", *Networks* 43, 177-189.
- H. Hernández Pérez, J.J. Salazar González (2004), "Heuristics for the one-commodity Pickup-and-Delivery Traveling Salesman Problem" *Transportation Science* 38, 245-255.
- M. Labbé, I. Rodríguez Martín, J.J. Salazar González (2004), "A Branch-and-Cut Algorithm for the Plant-Cycle Location Problem" *Journal of the Operational Research Society* 55/5, 513-520.
- M. Labbé, G. Laporte, I. Rodríguez Martín, J.J. Salazar González (2004), "The Ring Star Problem: Polyhedral Analysis and Exact Algorithm", *Networks* 43, 177-189.
- M. Labbé, G. Laporte, I. Rodríguez Martín, J.J. Salazar González (2005), "Locating Median Cycles in Networks" *European Journal of Operational Research* 160/2 457-470.
- A. Letchford, J.J. Salazar González (2005), "Projection of Flow Variables for Vehicle Routing" *Mathematical Programming* 105, 251-274.
- G. Laporte, J. Riera Ledesma, J.J. Salazar González (2003), "A Branch-and-Cut Algorithm for the Undirected Traveling Purchaser Problem" *Operations Research* 51/66, 940-951.
- G. Laporte, J.J. Salazar González, F. Semet, (2003), Exact Algorithms for the Job Sequencing and Tool Switching Problem" *IIE Transactions* 35, 1-9.
- A. Marín (2005), "Formulating and solving splittable capacitated multiple allocation hub location problems", *Computers and Operations Research* 32(12), 3093-3109
- A. Marín (2005), "Uncapacitated Euclidean hub location. Strengthened formulation, new facets and a relax-and-cut algorithm", *Journal of Global Optimization* 33, 393-422.
- A. Marín, "Lower bounds for the two-stage uncapacitated facility location problem", *European Journal of Operational Research* (aceptado).
- J. M. Moguerza y Francisco J. Prieto (2003), An Augmented Lagrangian Interior-point method using directions of negative curvature. *Mathematical Programming Ser. A*, 95, páginas 573-616.
- J. M. Moguerza y Francisco J. Prieto (2003), Combining search directions using gradient flows. *Mathematical Programming Ser. A*, 96, 529-559.
- E. Piñana, I. Plana, V. Campos y R. Martí (2004), "GRASP and Path relinking for the matrix bandwidth minimization", *European Journal of Operational Research* 153, 200-210.
- J. Riera Ledesma, J.J. Salazar González (2004), "The Biobjective Travelling Purchaser Problem" *European Journal of Operational Research* 160/3, 599-613
- I. Rodríguez Martín, J.J. Salazar González (2004), "Decomposition Approaches for a Capacitated Hub Problem" In "IBERAMIA 2004" (edited by C. Lemaître, C.A. Reyes and J.A. González) Springer Lecture Notes in Artificial Intelligence 3315 154-163.
- J. Riera Ledesma, J.J. Salazar González (2005) "A Heuristic Approach for the Traveling Purchaser Problem" *European Journal of Operational Research* 162 142-152.
- J. Riera Ledesma, J.J. Salazar González (2006) "Solving the Asymmetric Traveling Purchaser Problem" *Annals of Operations Research* (en prensa).
- J.J. Salazar (2000), "A note on the generalized steiner tree polytope" *Discrete Applied Mathematics* 100, 137-144.
- J.J. Salazar González (2003), "The Steiner cycle polytope" *European Journal of Operational Research* 147, 671-679.
- B. Vitoriano, M.T. Ortuño, B. Recio, F. Rubio y A. Alonso-Ayuso. Two alternative models for farm management: discrete versus continuous time horizon. *European Journal of Operational Research*, 144, 613-628, 2003.

### 5. 1.b. Capítulos de libros

- Albareda-Sambola, M., Juan A. Díaz, E. Fernández, C. Martínez-Ojea, Problemas combinados de localización de plantas y rutas de vehículos: modelos y algoritmos, en *Avances en Localización de Servicios y sus Aplicaciones*, B. Pelegrín (ed.), Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia, ISBN: 84-8371-507-4, 2004.
- Albareda-Sambola, M., E. Fernández, Algunos problemas estocásticos de localización discreta: un enfoque unificador, en *Optimización en incertidumbre*, Editado por ASEPUMA, ISBN: 84-8456-100-3, 2004.
- A. Alonso-Ayuso, M.F. Clement, L.F. Escudero, M.L. Gil y M.T. Ortuño. Branch-and-fix coordinado, un esquema de resolución de problemas estocásticos multietápicos 0-1 mixtos. *Optimización bajo Incertidumbre* (ISBN: 8484561003), editado por A. Alonso-Ayuso, E. Cerdá, L.F. Escudero y R. Sala-Garrido . ASEPUMA, 2004.
- A. Alonso-Ayuso, E. Cerdá, L.F. Escudero y R. Sala-Garrido (editores). *Optimización bajo Incertidumbre* (ISBN: 8484561003). ASEPUMA., 418 págs, 2004.
- A. Alonso-Ayuso, L.F. Escudero y M.T. Ortuño. Modeling Production Planning and Scheduling under Uncertainty. *Stochastic Programming Applications* (ISBN 0-89871-555-5), editado por S. Wallace y W. Ziemba. MPS-SIAM-Series in Optimization 5.. Capítulo 13, 217-252, 2005.
- J. Barceló and J. Casas, 2005, Dynamic Network Simulation with AIMSUN, in: SIMULATION APPROACHES IN TRANSPORTATION: Recent Advances and Challenges, Edited by Ryuichi Kitamura and Masao Kuwahara, ISBN 0-387-24108-6, Springer
- L. Cánovas, S. García y A. Marín (2004) Localización de concentradores. En "Avances en Localización de Centros de Servicios y sus Aplicaciones". Servicio de Publicaciones UMU, pp. 35-58.
- E. Benavent, A. Corberán, J.M. Sánchis Linear Programming Based Methods for Solving Arc-Routing Problems, in *Arc Routing: Theory, Solutions and Applications*, Moshe Dror (ed.) Kluwer Academic Publishers, 2000.
- M. Fischetti, J.J. Salazar González, P. Toth. "The Generalized Traveling Salesman Problem" In "The Traveling Salesman Problem and Its Variations" Ed. Kluwer Academic Publishers ISBN: 1-4020-0664-0 CO 12 (2002) 609-662

## 5.2. Participación en proyectos europeos, organización de actividades científicas y actividades de Investigación

### 5.2.1. Participación en programas internacionales en colaboraciones con grupos internacionales en temas relacionados con el proyecto

- SESTANTE: Strumenti Telematici per la Sicurezza e l'Eficienza Documentale della Catena Logistica di Porti e Interporti. I.C. INTERREG IIIB-MéditerranéeOccidentale, Axe 3, Measure 4 Code: 2002-02-3.4-1-032. 2003-2004. Investigador responsable grupo UPC: Jaime Barceló
- MEROPE: Strumenti Telematici per Servizi Innovativi di Mobilità e Logistica per le Aree Urbane e Metropolitane, I.C. INTERREG IIIB-MéditerranéeOccidentale Medoc, Axe 3, Measure 4, Code 2002-02-3.4-1-091. 2003-2004 Investigador responsable grupo UPC: Jaime Barceló
- MATAARI. INTERREG IIIB-MéditerranéeOccidentale, Axe 3, Measure 1 Code 3. Investigador responsable grupo UPC: Jaime Barceló
- VI Programa Marco de la Unión Europea participamos en 3 propuestas (EMOTION, FRUITS i LAERTIS) que actualmente están en proceso de evaluación.
- Programa SCIENCE: "Algorithmic approaches to large and complex combinatorial optimization problems" (PI659 SC1\* - CT91 - 0620, DTEE). 1991-1994. Investigador responsable grupo UV: Enrique Benavent.

### 5.2.1. Proyectos anteriores financiados por el Plan Nacional.

- SADERYL: Un sistema de ayuda a la toma de decisiones en problemas de rutas de vehículos y localización de servicios (TIC2000-17500). Coordinador: Angel Corberán (UV). 6 Subproyectos (UV, ULL, UPC, URJC, UMU, UMH).
- SADERYL2: Un sistema de ayuda a la toma de decisiones en problemas de rutas de vehículos y localización de servicios (TIC2003-05982). Coordinador: Angel Corberán (UV). 5 Subproyectos (UV, ULL, UPC, URJC, UMU)

### 5. 3. Tesis dirigidas y leídas.

- M. Albareda Sambola. Models and Algorithms for Location-Routing and Related Problems. Universitat Politècnica de Catalunya. Directores: Elena Fernández y Gilbert Laporte. Junio 2003.
- J. Casas. Estimation of the transport demand for real-time applications. Universitat Politècnica de Catalunya Director: Jaume Barceló. Marzo 2005.
- J. A. Díaz. Algorithmic Approaches for the Single Source Capacitated Plant Location Problem. Universitat Politècnica de Catalunya. Directora: Elena Fernández. Julio 2001.
- S. García. Advances in Discrete Location. Universidad de Murcia. Directores: Lázaro Cánovas y Alfredo Marín. Junio de 2006.
- M. Landete. Obtención de facetas de poliedros asociados a problemas de empaquetamiento. Universidad de Murcia. Directores : Lázaro Cánovas y Alfredo Marín. 1998
- H. Hernández Pérez, Traveling Salesman Problems with Pickups and Deliveries. Universidad de La Laguna. Director : Juan José Salazar. Diciembre de 2004.
- G. Antonio Mejía Quirós. Nuevas facetas para el problema general de rutas en un grafo mixto. Universidad de Valencia. Directores: Angel Corberán y José María Sanchis. Julio 2001.
- J. M. Moguerza. *Métodos de Punto Interior para Optimización no Convexa*. Universidad Carlos III de Madrid (2000). Director: Francisco Javier Prieto.
- A. Olivares González. *Optimización no convexa y direcciones de curvatura negativa: un enfoque eficiente*, Universidad Rey Juan Carlos, noviembre 2005. Director: Javier Martínez Moguerza.
- J. Pereira. Modelización y resolución de problemas de diseño de sistemas de recogida de residuos urbanos. 2004. Director : Joaquín Bautista Valhondo.
- C. Pizarro Romero. *New algorithms approaches in Stochastic Integer Programming*. Universidad Rey Juan Carlos. Junio 2006. Director: Antonio Alonso Ayuso.
- I. Plana Andani. El Problema general de rutas con viento. Universidad de Valencia. Directores : Angel Corberán y José María Sanchis. Julio de 2005.
- J. Riera Ledesma. "The Traveling Purchaser Problem". Univesidad de La Laguna. Director : Juan José Salazar. Diciembre 2002. (premio de la Sociedad Europea de Investigación Operativa, EURO, a la mejor tesis doctoral leída en el año 2002-2003).
- C. Simón de Blas. *Problema de embotellamiento y aplicaciones*. Universidad Complutense de Madrid, septiembre 2004. Director: Francisco Javier Cano Sevilla.
- H. Velasquez Cevallos. Una nueva formulación para el Problema del Cartero Rural sobre un Grafo Mixto. Universidad de Politècnica de Valencia. Junio 2001. Directores: Angel Corberán y José María Sanchis.