

Caro Vela, María Dolor; Paralera Morales, Concepción

## Article

Una propuesta para la localización de áreas de servicio y descanso adaptadas al transporte de mercancías peligrosas mediante un modelo de optimización; aplicación al territorio español

Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa

## Provided in Cooperation with:

Universidad Pablo de Olavide, Sevilla

*Suggested Citation:* Caro Vela, María Dolor; Paralera Morales, Concepción (2011) : Una propuesta para la localización de áreas de servicio y descanso adaptadas al transporte de mercancías peligrosas mediante un modelo de optimización; aplicación al territorio español, Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa, ISSN 1886-516X, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, Vol. 11, pp. 17-32

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/59093>

### Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

### Terms of use:

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*



<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/>



UNIVERSIDAD  
**PABLO DE  
OLAVIDE**  
SEVILLA



REVISTA DE MÉTODOS CUANTITATIVOS PARA  
LA ECONOMÍA Y LA EMPRESA (11). Páginas 17–32.  
Junio de 2011. ISSN: 1886-516X. D.L: SE-2927-06.  
URL: <http://www.upo.es/RevMetCuant/art.php?id=46>

## Una propuesta para la localización de áreas de servicio y descanso adaptadas al transporte de mercancías peligrosas mediante un modelo de optimización; aplicación al territorio español

CARO VELA, MARÍA DOLORES

Departamento de Economía, Métodos Cuantitativos e Historia Económica  
Universidad Pablo de Olavide, de Sevilla (España)  
Correo electrónico: [mdcarvel@upo.es](mailto:mdcarvel@upo.es)

PARALERA MORALES, CONCEPCIÓN

Departamento de Economía, Métodos Cuantitativos e Historia Económica  
Universidad Pablo de Olavide, de Sevilla (España)  
Correo electrónico: [cparmor@upo.es](mailto:cparmor@upo.es)

### RESUMEN

El presente trabajo analiza la importancia de contar con una red de estacionamientos adaptados a los vehículos que transportan mercancías peligrosas. Se estudia en primer lugar la cobertura actual de la demanda que ofrecen los estacionamientos existentes y se plantea en segundo lugar un modelo de localización de máxima cobertura para estudiar la ubicación de áreas que permitan una mayor satisfacción de la demanda de descanso de los conductores cumpliendo con la normativa legal y de seguridad. El modelo se aplica en el territorio español con la ayuda de sistemas de información geográfica (SIG).

**Palabras clave:** modelo de localización de máxima cobertura; transporte de mercancías peligrosas; sistema de información geográfica.

**Clasificación JEL:** C61.

**MSC2010:** 90B80; 90C10; 90C05.

# A Proposal for the Location of Service Areas Adapted to the Transport of Dangerous Goods through an Optimization Model and its Application to the Spanish Territory

## ABSTRACT

This paper analyzes the importance of having a network of stations adapted to vehicles carrying dangerous goods. In the first place, it is studied the current demand which is offered by the existing parking areas, and in the second place, it is explained a maximum coverage location model in order to study the location of areas that meet the drivers' demand of rest to a greater extent complying with legal and safety regulations. The model is applied into Spanish territory with the help of geographic information systems (GIS).

**Keywords:** maximal covering location model; transport of dangerous goods; geographic information system.

**JEL classification:** C61.

**MSC2010:** 90B80; 90C10; 90C05.



## 1. INTRODUCCIÓN

Los niveles de bienestar y desarrollo de la sociedad actual dependen, en gran medida, de una serie de productos que genera y produce la industria; en muchos casos, son sustancias peligrosas que es necesario distribuir y transportar de un lugar a otro y que, sin ninguna duda, añaden un riesgo suplementario al propio tráfico. En concreto, las mercancías peligrosas se pueden definir como materiales o productos que presentan un peligro para las personas o el medio ambiente en contacto con ellos (Gorys, 1990). Con esta definición, aproximadamente el 4,4% de las mercancías transportadas por carretera en 2008 en la Unión Europea son sustancias peligrosas, aunque en países como España esta tasa se eleva a más del 5%.<sup>1</sup> El riesgo que suponen los vehículos que transportan materias peligrosas ha incrementado la toma de conciencia, por parte de las administraciones públicas, para establecer criterios y normas con objeto de prevenir el peligro que pueda producirse en el transporte de dichas mercancías. El desarrollo de la legislación básica europea en esta materia se regula en el “Acuerdo europeo relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera” (ADR), realizado conforme a las recomendaciones de la Organización de las Naciones (UNECE, 2008). Además de la mayoría de los países europeos, también han suscrito este acuerdo países asiáticos y del norte de África. Además del ADR, la legislación de mercancías peligrosas está sometida a diversas normativas nacionales y locales. En España, por ejemplo, rige también el R.D. 551/2006, de 5 de mayo, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español y diversas ordenanzas municipales que prohíben el tránsito de vehículos que transportan mercancías peligrosas en los términos municipales. Estas normativas son aplicables a los vehículos tanto si se encuentran en circulación como si están detenidos. En este segundo caso, el ADR establece medidas adicionales de seguridad, relativas a la vigilancia de los vehículos. Esta normativa prioriza, para el estacionamiento de los vehículos, un aparcamiento vigilado por un encargado que deberá haber sido informado de la naturaleza de la carga y del lugar en que se encuentre el conductor; a falta del mismo, señala el estacionamiento en un aparcamiento público o privado en el que el vehículo no pueda correr riesgo de ser dañado por otros vehículos. En caso de que no existan estos estacionamientos, se necesita un espacio libre apropiado apartado de las carreteras públicas importantes y de lugares habitados, que no sea lugar de paso o de reunión frecuentado por el público (UNECE, 2008).

Los conductores de vehículos pesados que transportan mercancías peligrosas soportan una gran responsabilidad y, por eso y porque es obligado por ley, necesitan realizar paradas de descanso en ruta durante sus trayectos, por lo que necesitan espacios adecuados. Como hemos comentado anteriormente, las necesidades y características de estos espacios requieren condiciones especiales de vigilancia y seguridad respecto a las condiciones de un área de

---

<sup>1</sup> Datos basados en estadísticas de Eurostat (2010).

servicio genérica. Las características variarán dependiendo de si los descansos son prolongados, porque el conductor pernocta o realiza descansos largos, lo que llamaremos estacionamientos “a término” o si el vehículo estaciona por poco tiempo para realizar la interrupción reglamentaria, llenar el depósito, comer el conductor, etc.; en este caso los denominaremos estacionamientos “a tránsito”. El Gobierno de España (Ministerio de Fomento, 2006) recomienda, para ambos tipos de estacionamientos, áreas de descanso que dispongan de vigilancia las 24 horas del día por personal debidamente formado sobre las mercancías peligrosas, así como otras consideraciones relacionadas con la seguridad, como la separación entre los vehículos que transportan mercancías peligrosas y los demás vehículos y el disponer de otras dotaciones complementarias.

En España, se han encontrado carencias tanto en cantidad como en la valoración sobre seguridad que ofrecen estas áreas (RACC, 2010; Ministerio de Fomento, 2006). Son especialmente deficitarios los estacionamientos “a tránsito”, puesto que los “a término”, si bien son escasos,<sup>2</sup> se están proyectando algunos en las principales zonas de carga y descarga de las mercancías,<sup>3</sup> donde el conductor prefiere realizar el periodo largo de descanso antes de la carga y descarga del vehículo. En este trabajo nos vamos a centrar, consiguientemente, en las estaciones “en tránsito”, donde existe la necesidad de crear una red de áreas con objeto de satisfacer la demanda de descanso de los conductores cumpliendo con la normativa legal y prevenir el peligro social y medioambiental.

Existe la necesidad de una herramienta que le permita a las instituciones encargadas del planeamiento y la administración de estas zonas seleccionar una red de áreas de servicio que puedan adaptarse a las necesidades de descanso “en tránsito” de los conductores que transportan mercancías peligrosas bajo unos criterios objetivos, de manera que las inversiones realizadas tengan mayor impacto en la comunidad. En el proceso de ubicación de dichas áreas, vamos a tener en cuenta como criterio fundamental la máxima cobertura de las mismas, es decir, que se pueda dar servicio al mayor número de vehículos que transporten mercancías peligrosas. Por tanto, el problema al que nos estaríamos enfrentando sería un problema de localización de cobertura máxima, un *Maximal Coverage Location Problem* (MCLP).

El trabajo lo estructuraremos como sigue. En la segunda sección presentamos las características que deben tener las áreas que proponemos, así como los criterios para la selección de las mismas. En la tercera exponemos los antecedentes del problema que vamos a tratar. En la cuarta incluimos la situación actual de la red de estacionamiento y en la quinta se plantea la formulación del modelo y se aplica a la red de carreteras de España, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y mostrando los principales resultados obtenidos. Finalmente, cerramos el trabajo con las conclusiones.

---

<sup>2</sup> Según IRU (2009), en España solo existen cuatro centros con estas características.

<sup>3</sup> Ejemplos son los de la Ciudad del Transporte de Pamplona o los del Área de Majarabique de Sevilla.

## **2. LA RED DE ÁREAS DE SERVICIO ESPECIALMENTE ADAPTADAS PARA VEHÍCULOS QUE TRANSPORTAN MERCANCÍAS PELIGROSAS. CARACTERÍSTICAS Y CRITERIOS DE SELECCIÓN**

La red de áreas de descanso existente debería ser suficiente para que el mayor número de conductores de vehículos que transporten mercancías peligrosas pueda realizar el estacionamiento regulado en las normativas de conducción y descanso en una de las áreas que integren esta red. Para identificar tanto las características de estas áreas como los criterios a considerar para la formulación del problema de máxima cobertura, se realizaron sesiones de trabajo con personal experto de la Confederación de Transportes de Mercancías (CETM) y consejeros de seguridad para el transporte por carretera de mercancías peligrosas. Asimismo, se realizaron consultas a la Comisión para la Coordinación del Transporte de Mercancías Peligrosas, órgano consultivo dependiente del Ministerio de Fomento. También se examinaron la Red de Itinerarios de Mercancías Peligrosas (RIMP) y artículos y trabajos relacionados.

### **2.1. Características de las áreas**

Respecto a las características de las áreas, se concluyó que deberían ser las de un área de servicio y descanso con ciertos aspectos o requisitos para que estuvieran adaptadas al estacionamiento de mercancías peligrosas. En este sentido, “Son áreas de servicio las zonas colindantes con las carreteras, diseñadas expresamente para albergar instalaciones y servicios destinados a la cobertura de las necesidades de la circulación, pudiendo incluir estaciones de suministro de carburantes, hoteles, restaurantes, talleres de reparación y otros servicios análogos destinados a facilitar la seguridad y comodidad de los usuarios de la carretera.” (R.D. 1812/1994 de 2 de septiembre). En el caso que nos ocupa, de especificidad para mercancías peligrosas, el Ministerio de Fomento recomienda disponer de las siguientes características o servicios:

- **Vigilancia.** La zona de aparcamiento de vehículos de mercancías peligrosas se vigilará 24 horas al día por personal debidamente formado. Esta vigilancia puede realizarse mediante cámaras que se visualicen en el área de servicio, cafetería, etc.
- **Iluminación.** Esta zona de estacionamiento estará bien iluminada y, siempre que esto sea posible, dispondrá de un sistema de recogida de eventuales fugas o derrames, independiente del alcantarillado general, así como de un sistema de protección contra incendios.
- **Localización y señalización.** La zona de aparcamiento de vehículos de mercancías peligrosas se encontrará separada de la del resto de vehículos y debidamente señalizada, en la zona más alejada de las dotaciones de servicios de uso público, estableciéndose una distancia mínima a estas zonas más transitadas de 100 metros.

- **Plan de autoprotección.** Se dispondrá de un plan de autoprotección, entendiendo por tal un sistema de control y gestión de la seguridad.

La superficie mínima de la zona de aparcamiento conjunto para poder disponer de plazas para vehículos de mercancías peligrosas se estima en 2000 m<sup>2</sup>, entendiendo como superficie necesaria por cada plaza de estacionamiento de vehículo pesado (incluidos espacios de maniobras) entre 150 y 250 m<sup>2</sup>, según los servicios que se quieran prestar e instalaciones que se deba disponer. Se establece también una distancia mínima de seguridad de 30 m a la carretera (Ministerio de Fomento, 2006).

## 2.2 Criterios para la formulación del problema

Los criterios para determinar la cobertura de la demanda de estacionamientos se definieron respecto a la cobertura de la red viaria, cobertura de la demanda de transportistas y accesibilidad. Por un lado, es necesario considerar que en España los vehículos que transportan mercancías peligrosas deben transitar por la RIMP. Dicha red está constituida por una serie de tramos de vía de la Red General de Carreteras del Estado Español y de la red de carreteras autonómicas que publica anualmente el Ministerio del Interior a través de la correspondiente Resolución de la Dirección General de Tráfico (Resolución de 25 de enero de 2010, de la DGT). En la Figura 1 se detallan los tramos de la última RIMP publicada. De forma adicional, las Comunidades Autónomas del País Vasco y Cataluña publican su propia RIMP.



Figura 1. RIMP de 2010.

Por otro lado, los conductores dedicados al transporte por carretera de mercancías y viajeros están obligados a respetar unos tiempos de pausa y descanso mínimos durante el ejercicio de conducción. Estos tiempos están reglamentados, estableciéndose que: “Tras un período de conducción de cuatro horas y media, el conductor hará una pausa ininterrumpida de al menos 45 minutos, a menos que tome un período de descanso. Puede sustituirse dicha pausa, por una pausa de al menos 15 minutos seguida de una pausa de al menos 30 minutos, intercaladas en el período de conducción, de forma que se respeten las disposiciones anteriores” (Reglamento CE nº 561/2006).

Teniendo en cuenta que la velocidad máxima permitida para los vehículos que transportan mercancías peligrosas es de 80 km/h en autopistas y autovías, 70 km/h en vías rápidas y carreteras convencionales y 60 km/hora para el resto de vías, estimamos la ubicación de un área de descanso cada 150 km de la RIMP para que los conductores realicen las pausas reglamentarias durante el ejercicio de su actividad. La demanda potencial de estos servicios será el número de vehículos/día de mercancías peligrosas que necesiten realizar una parada o descanso durante la realización del servicio.

Con respecto a la accesibilidad las áreas de servicio, por la propia definición de las mismas que ofrece el Reglamento General de Carreteras, deben situarse contiguas a la carretera, en nuestro caso a la RIMP. Atendiendo a las recomendaciones del Gabinete para la Ordenación y Coordinación del Transporte de Mercancías Peligrosas, del Ministerio de Fomento, se adoptarán unas distancias mínimas de seguridad de 30 m a la carretera, y una distancia mínima de 100 m a las zonas más transitadas (estación de servicio, cafetería, etc.).

### **3. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA**

La problemática a la que nos enfrentamos la podemos encuadrar dentro de los problemas de localización. La Teoría de Localización estudia la mejor ubicación de unos centros de servicio para alcanzar unos determinados objetivos. Existe una gran diversidad de problemas en los que se abordan los problemas de localización de distintas formas. Estos variarán dependiendo del espacio en el que se ubican los centros, si son discretos o continuos, de los objetivos que se pretendan conseguir (maximizar o minimizar los beneficios, costes, demanda, rechazo social generado por la población afectada, etc.), la forma de proporcionar servicio y otros factores. Debido a la amplia variedad de estos problemas, son muy diversas las metodologías empleadas para resolverlos. Así, dependiendo si el problema es discreto o continuo, se aplicarán distintas técnicas del campo de la Investigación Operativa. Una amplia revisión de los modelos de localización se hacen en los trabajos de ReVelle *et al.* (2007), ReVelle y Eliselt (2004) y Owen y Daskin (1998) donde se efectúa un extenso estudio de modelos de localización discretos y continuos.



Los problemas de localización discretos se plantean cuando existe un conjunto finito de clientes que requieren un servicio, de los que se conoce su ubicación y demanda, y se desea localizar un conjunto finito de centros que deben proporcionarle servicio. La característica fundamental de los problemas discretos de localización es que el conjunto de ubicaciones potenciales para dichos centros se conoce *a priori* y es discreto. En Mirchandani y Francis (1990) se hace una recopilación de problemas discretos. Los problemas de localización de instalaciones se aplican en una amplia variedad de situaciones y, por ello, son estudiados ampliamente en el campo de la Investigación Operativa. Ejemplos de este tipo de problemas los encontramos en la localización de servicios públicos como, por ejemplo, hospitales, escuelas, ambulancias, estaciones de bomberos, gaseoductos, almacenes, etc. En la literatura existen muchos trabajos relacionados con la localización de plantas y entre ellos se encuentran aquellos en los que se trata el problema de la p-mediana, del p-centro y de máxima cobertura (Murray *et al.*, 2010). El MCLP restringe el número de plantas a instalar a un número finito de localizaciones maximizando la cantidad de demanda cubierta. Entre las primeras investigaciones que se hicieron en el campo de la localización de cobertura máxima, el trabajo de Church y ReVelle (1974) muestra la formulación del problema y, posteriormente, se han realizado muchas aplicaciones del mismo en distintos campos, como por ejemplo, en la localización de centros de emergencia (Current y O'Kelly, 1992).

Actualmente, con los SIG y el desarrollo de computadores más potentes, se puede trabajar los problemas de localización con mayor cantidad de datos y modelos de análisis espacial. Algunos estudios han integrado SIG para estudiar distintos problemas de localización como cobertura máxima, cobertura máxima con restricciones de capacidad, p-mediana, etc. Al respecto, véanse los trabajos de Murray y Tong (2007), Liu *et al.* (2006), Li y Yeh (2005), Aertz y Heuvelink (2002) y Yeh y Cow (1996). Concretamente, los trabajos de Murray (2005) y Alexadris y Giannikos (2010) presentan modelos de máxima cobertura usando las distintas funciones de los SIG.

#### **4. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL**

Nuestro objetivo va a ser medir la cobertura máxima de la demanda potencial de los transportistas que ofrece el conjunto de áreas existentes y proponer en su caso la ubicación de nuevas áreas. Para estudiar la cobertura actual de la demanda que ofrecen las áreas existentes, se han utilizado dos fuentes documentales para seleccionar las áreas existentes. Por una parte, se han recogido aquellas áreas seleccionadas por el Ministerio de Fomento, que cumplen las características mencionadas en el apartado anterior para ser consideradas adecuadas para el estacionamiento de mercancías peligrosas (Ministerio de Fomento, 2006). Por otra parte, se han seleccionado las áreas españolas que permiten el estacionamiento de mercancías peligrosas

recogidas por la International Road Union (IRU, 2009) y que cumplen también con las características mencionadas anteriormente. En total son 10 áreas de estacionamiento cuyas ubicaciones aparecen en el mapa que se muestra en la Figura 2.

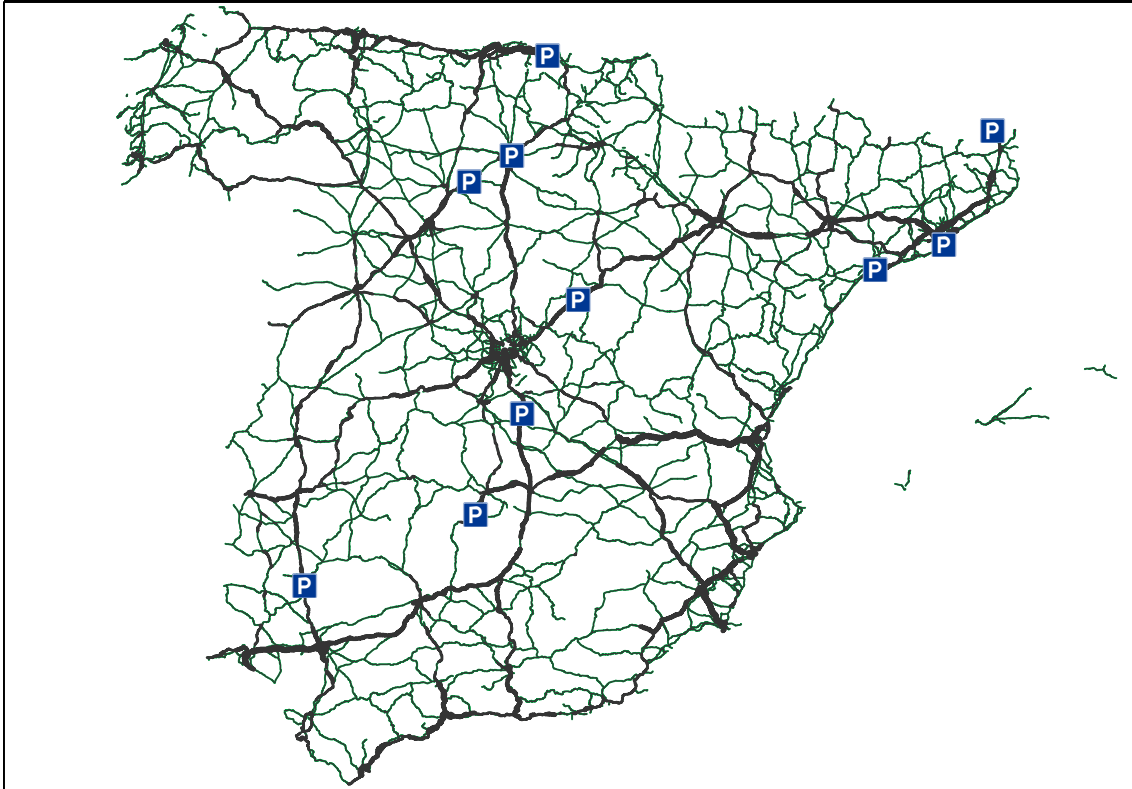


Figura 2. Ubicación de las 10 áreas existentes.

El radio de cobertura lo fijamos en 150 (es decir, en un entorno de 150 km como máximo). Esta es la distancia máxima estimada a la que deben estar localizadas las áreas de estacionamiento de los puntos de demanda, para que los conductores cumplan con las normativas de conducción y descanso. No ha sido posible contar con la matriz de origen-destino de las operaciones de transporte de mercancías peligrosas. Es por ello por lo que, para determinar el conjunto de todos los puntos de demanda, hemos utilizado la intensidad media diaria de los vehículos de mercancías peligrosas (IMDMP), que transitan por los tramos de carretera de la red viaria española recogida en el Mapa de Tráfico (Ministerio de Fomento, 2009). La utilización de los flujos de vehículos como medida de demanda es usada por Goodchild y Noronha (1987) para estudiar la localización de gasolineras, debido a que es difícil encontrar las matrices de origen-destino de los vehículos de transporte en la práctica (Lin *et al.*, 2008; Averbakh y Berman, 1996).

Hay un total de 3.638 tramos de carretera con datos de IMDMP. Los tramos de carretera en que se realizan los aforos de los vehículos tienen una longitud variable. La Tabla 1 recoge las principales estadísticas descriptivas tanto de la longitud de los tramos, como de la IMDMP.

	Longitud de los tramos (km)	IMDMP (nº de vehículos)
Mínimo	0,08	1
Máximo	47,02	1497
Media	6,34	67,34
Desviación típica	5,66	101,08

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de longitud e IMDMP.

Para la selección y asignación de los nodos de demanda a las localizaciones, hemos utilizado las funcionalidades del programa ArcGIS. Para utilizar los datos en el programa ARCGIS 9.3 (ESRI, 2008), se necesitaron las bases de datos georreferenciadas de las áreas de servicio existentes, la intensidad media diaria de los vehículos que transportan mercancías peligrosas y la RIMP. Los datos se obtuvieron previa solicitud al Ministerio de Fomento y por la descarga de bases de datos publicadas por ese mismo organismo. Se distinguieron, sobre la capa de información de puntos kilométricos de las carreteras de España, las 10 áreas de servicio existentes para vehículos que transportan mercancías peligrosas. A continuación se seleccionaron aquellos tramos de carretera que se situaban a una distancia inferior a 150 km (el radio de cobertura) de estas 10 áreas de servicio. Estos tramos constituyen la demanda potencial cubierta por estas áreas y en ellos se midió la IMDMP. La máxima demanda cubierta por las mismas es del 60,89%. En el siguiente mapa se representa la distribución geográfica de la demanda que queda cubierta por dichas áreas.

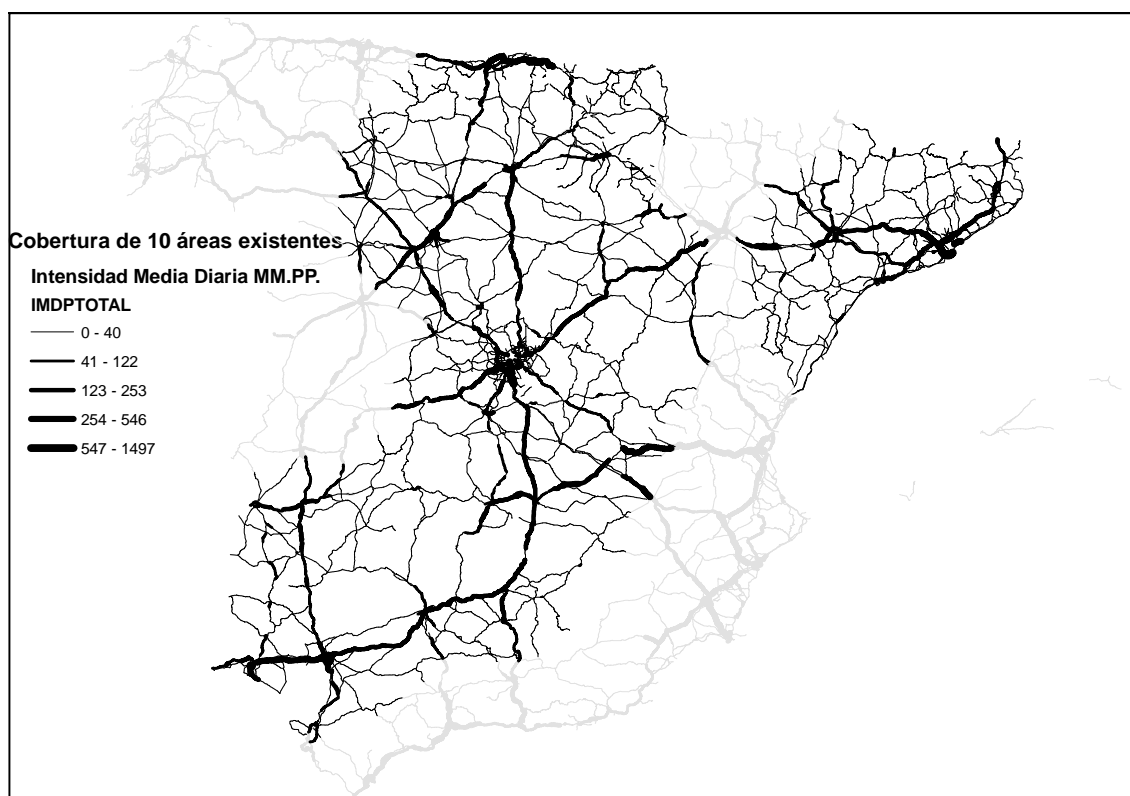


Figura 3. Demanda cubierta por las 10 áreas existentes.

Queda una amplia zona de demanda sin cubrir, que representa el 39,10%; fundamentalmente, Galicia-Asturias, parte de Salamanca, Cáceres y Huesca y gran parte del Arco Mediterráneo, exceptuando Cataluña. Con el fin de mejorar la cobertura actual que ofrecen las áreas de estacionamiento, proponemos el planteamiento de un modelo de máxima cobertura. En total son 1.502 tramos de carretera por los que transitan vehículos de mercancías peligrosas y que no tienen un área a menos de 150 km.

## 5. PLANEAMIENTO Y APLICACIÓN DEL MODELO

El MCLP guarda relación con otros problemas de localización. En muchas situaciones, para poder cubrir la demanda de todos los usuarios, es necesario considerar un elevado número de instalaciones, lo que conlleva un elevado coste económico. En estos casos se opta por utilizar el modelo de máxima cobertura, donde el objetivo es cubrir la mayor demanda posible con un número prefijado de instalaciones. Se considera un número finito de puntos de demanda, que en nuestro caso vienen determinados por la IMDMP. También se considera un número finito de instalaciones, representadas para nosotros como áreas de descanso/estacionamiento para vehículos que transporten mercancías peligrosas. El objetivo es determinar, para un número concreto de áreas de descanso, la máxima demanda que se puede cubrir con ellas. El modelo puede ser formulado de la siguiente manera:

❖ Notación:

- Índice:

$i$  es el índice para las ubicaciones candidatas;

$j$  es el índice para los puntos de demanda.

- Conjuntos:

$I$  es el conjunto de ubicaciones potenciales para las áreas de estacionamiento;

$J$  es el conjunto de todos los puntos de demanda.

- Parámetros:

$h_j$  es la demanda del punto  $j$ ;

$p$  es el número de instalaciones a localizar;

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el punto de demanda } j \text{ está dentro del radio de cobertura de la ubicación } i; \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Es decir, en el caso en que el nodo de demanda esté a menos de 150 km de la ubicación del área de servicio se considerará que  $c_{ij} = 1$ ; en caso contrario valdrá 0.

- Variables de decisión:

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{si la demanda en el punto } j \text{ está cubierta;} \\ 0 & \text{en otro caso;} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si el \u00e1rea de servicio es localizada en la ubicaci\u00f3n } i; \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

- ❖ El modelo. Usando la notaci\u00f3n del ep\u00edgrafe anterior, la funci\u00f3n objetivo y las restricciones quedan como sigue:

$$\text{Max } \sum_{j \in J} h_j \cdot x_j$$

$$\text{s.a. } \sum_{i \in I} c_{ij} \cdot y_i \geq x_j \quad \forall j \in J \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (2)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad (4)$$

La restricci\u00f3n (1) nos indica que si la demanda de un determinado tramo queda cubierta por una de las \u00e1reas de servicio, es debido a que se encuentra en el radio de cobertura de la misma. Es decir, a una distancia menor de 150 km del \u00e1rea de servicio la demanda de ese tramo queda cubierta por dicha \u00e1rea. La restricci\u00f3n (2) nos indica el n\u00famero de \u00e1reas de estacionamiento que se van a abrir. A la hora de resolver el modelo,  $p$  es un valor prefijado de antemano. Por \u00faltimo, las restricciones (3) y (4) representan el car\u00e1cter binario de las variables.

A la hora de aplicar el modelo, contamos con un conjunto de puntos de demanda ( $J$ ), formado por 1502 tramos de la RIMP en los que no est\u00e1 cubierta la demanda. Adem\u00e1s, consideramos un conjunto de ubicaciones potenciales ( $I$ ) que asciende a 89. Son las \u00e1reas<sup>4</sup> de servicio existentes que cumplen las condiciones mencionadas en el R.D. 1812/1994, de 2 de septiembre. La adecuaci\u00f3n de estas \u00e1reas para el estacionamiento de veh\u00edculos de mercanc\u00edas peligrosas, solo requerir\u00eda cumplir con las condiciones de vigilancia, iluminaci\u00f3n, se\u00f1alizaci\u00f3n y plan de autoprotecci\u00f3n, siendo su adaptaci\u00f3n menos costosa que en otras \u00e1reas. En la Figura 4 mostramos los tramos de carreteras cuya demanda no queda cubierta por las 10 \u00e1reas existentes y las 89 \u00e1reas de servicio que se han especificado anteriormente.

Para la resoluci\u00f3n del MCLP, se ha utilizado el software LINGO 9.0, que nos permite resolver este problema lineal con un gran n\u00famero de variables y restricciones. Despu\u00e9s de aplicar el modelo con distintas opciones en el n\u00famero de localizaciones a considerar ( $p$ ), obtenemos los resultados que mostramos en la Tabla 2. En concreto, se muestran el porcentaje sobre el total de la demanda no cubierta y las localizaciones que maximizan dicha cobertura para distintos valores de  $p$ .

---

<sup>4</sup> Los datos correspondientes a las ubicaciones de las 89 \u00e1reas situadas en la RIMP han sido proporcionadas por el Ministerio de Fomento.

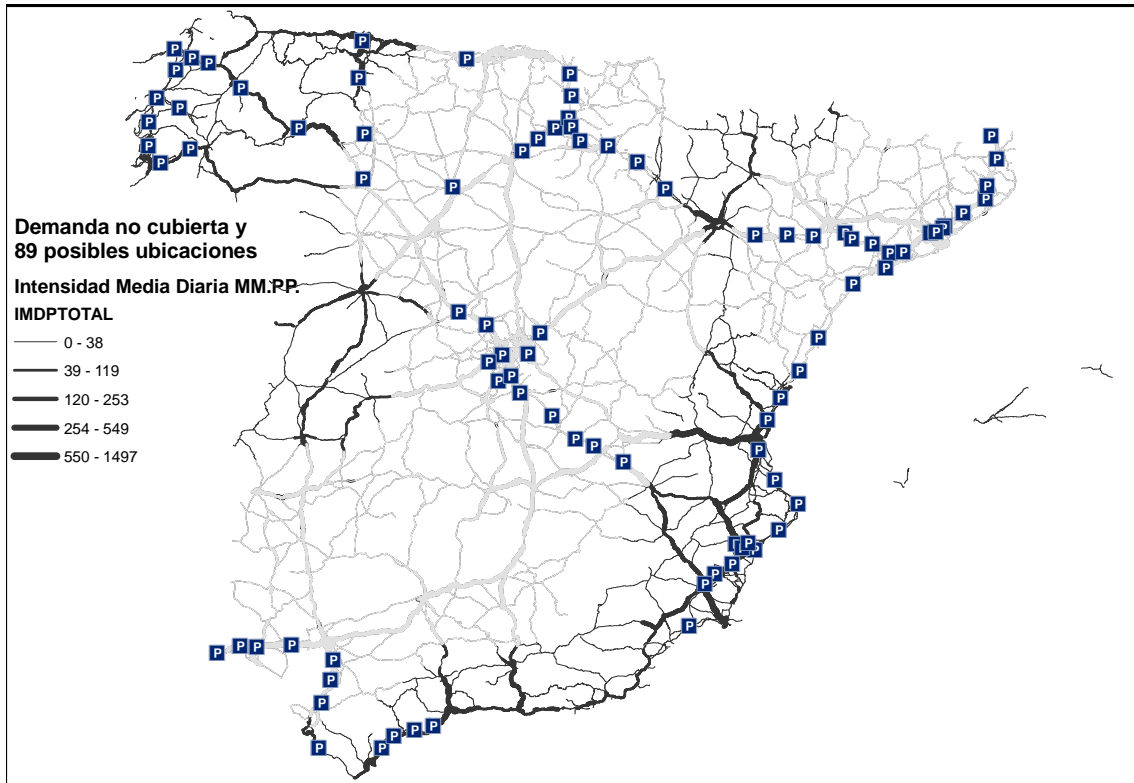


Figura 4. Demanda no cubierta y 89 posibles ubicaciones para cubrirla.

Nº de áreas	Porcentaje	Áreas abiertas
1	38,96%	81
2	58,05%	81-82
3	75,94%	41-81-82
4	83,75%	4-41-81-82
5	88,99%	5-36-41-82-89
6	93,81%	5-21-36-41-82-89
7	95,76%	5-21-36-41-59-80-89
8	95,87%	4-8-21-36-41-59-82-89
9	95,90%	8-11-21-29-36-41-53-59-80
10	95,90%	8-11-21-29-36-41-52-59-61-79

Tabla 2: Resultados del MCLP.

A la vista de los resultados, podemos determinar que con nueve áreas de servicio se cubre una demanda del 95,90%, ya que en el caso de que se decidiera localizar 10, el porcentaje no aumentaría. En la situación actual, con las 10 áreas existentes cubríamos un total del 60,89% de la demanda y con las 9 que proponemos llegamos a conseguir un 98,39% de la demanda total. La Figura 5 representa la distribución geográfica de la demanda cubierta con las 19 áreas.

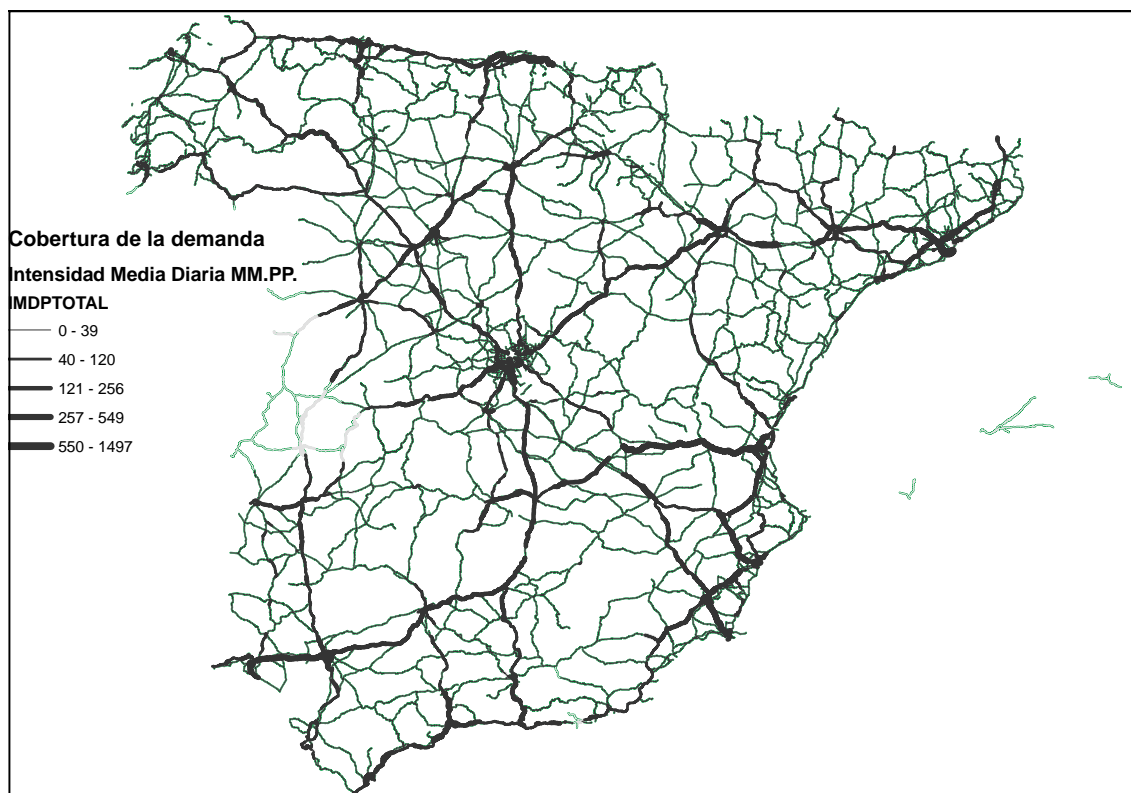


Figura 5. Cobertura total de la demanda con las 10 áreas existentes y la adaptación de 9 más.

En cualquier caso, hay un pequeño porcentaje de la demanda que no se llegaría a cubrir con las áreas existentes. En la zona correspondiente al norte de Cáceres y Salamanca (parte de la Ruta de la Plata), no existe ningún área de servicio que esté en la RIMP, por lo que nos lleva a pensar que podría ser interesante contemplar la posibilidad de proponer la apertura de una nueva área que diera cobertura a esa demanda. Una vez se considerara dicha posibilidad, habría que resolver de nuevo el problema para ver si la cobertura total mejora con la incorporación de dicha área.

## 6. CONCLUSIONES

El objetivo del estudio es analizar la necesidad de una red de áreas especialmente adaptadas al estacionamiento de mercancías peligrosas para cumplir con la legislación vigente por motivos de seguridad. La normativa europea sobre transportes obliga a los conductores a la realización de descansos en ruta, priorizando un aparcamiento con características especiales de vigilancia para el estacionamientos de vehículos de mercancías peligrosas. Es importante, por eso, contar con una red de estacionamientos de mercancías peligrosas que permita la máxima cobertura del territorio para satisfacer la demanda de descanso de los conductores cumpliendo con la normativa legal y así prevenir el peligro social y medioambiental que pudiera derivarse de un accidente de estos vehículos.

En este sentido, se analiza la cobertura que proporcionan las áreas de servicio existentes y, además, se formula y aplica un modelo de localización de máxima cobertura implementado en el territorio español con ayuda de un SIG. En particular, el problema se resolvió con LINGO 9.0, utilizando ArcGis para la selección y asignación de los nodos de demanda a las localizaciones y para la visualización de los resultados. Analizando los datos obtenidos, observamos que en el caso de contar con las diez áreas ya existentes, se cubre un 60,89% de la demanda de los transportistas. Sin embargo, si además intentamos dar solución a la demanda restante considerando nuevas áreas, conseguimos cubrir un 95,90% de ella: con un total de 19 áreas de servicio podemos cubrir hasta un 98,39% de toda la demanda en el territorio español. Tan solo queda un pequeño porcentaje de demanda que no se cubre por ninguna de las áreas existentes, lo que nos lleva a plantear la posibilidad de la apertura de una nueva instalación en la zona de Cáceres-Zamora.

## REFERENCIAS

- Aertz, J.C.J.H. y Heuvelink, G.B.M. (2002). Using simulated annealing for resource allocation. *International Journal of Geographical Information Science* 16 (6), pp.571–587.
- Alexandris, G y Giannikos, I. (2010). A new model for maximal coverage exploiting GIS capabilities. *European Journal of Operational Research* 202, pp.328–338.
- Averbakh, I. y Berman, O. (1996). Locating flow-capturing units on a network with multi-counting and diminishing returns to scale. *European Journal of Operational Research* 91, 3, pp.495–506.
- Church, R. y ReVelle, C. (1974). The Maximal Covering Location Problem. *Papers of the Regional Science Association* 32, pp.101–118.
- Current, J., Min, H. y Schilling, D. (1990). Multiobjective Analysis of Facility Location Decisions. *European Journal of Operational Research* 49, 3, pp.295–307.
- Current, I. y O’Kelly, M. (1992). Locating emergency warning sirens. *Decisions Sciences* 23, pp.221–234.
- ESRI (2008). What’s New in ArcGIS 9.3. ESRI, New York, USA, 2008.
- EUROSTAT (2010). Data Base: <http://www.eurostat.org>. Consultado el 21 de octubre de 2010.
- Goodchild, M.F. y Noronha, V.T. (1987). Location–Allocation and Impulsive Shopping the Case of Gasoline Retailing. Spatial Analysis and Location–Allocation Models. *Van Nostrand Reinhold*, New York, pp.121–136.
- Gorys, J. (1990). Transportation of Dangerous Goods in the Province of Ontario. Transportation Research Record 1264. Transportation Research Board, *National Research Council*, Washington.
- IRU (2009). Truck Parking Areas. *International Road Union*. Recurso web disponible en: <http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/09parking.pdf>
- Li, X. y Yeh, A.G. (2005). Integration of genetic algorithms and GIS for optimal location search. *International Journal of Geographical Information Science* 19, 5, pp.581–601.



- Lin, Z., Ogden, J., Fan, Y. y Chen, C.W. (2008). The fuel-travel-back approach to Hydrogen station siting. *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 12, pp.3096–3101.
- Liu, N., Huang, B. y Chandramouli, M. (2006). Optimal siting of fire stations using GIS and ant algorithm. *Journal of Computing in Civil Engineering* 20, 5, pp.361–369.
- Ministerio de Fomento (2006). Coordinación del Transporte de Mercancías Peligrosas. Estacionamientos para vehículos de mercancías peligrosas: [http://www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/ORGANOS\\_COLEGIADOS/CCTMP/ListadoEstudio.htm](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/ORGANOS_COLEGIADOS/CCTMP/ListadoEstudio.htm). Consultado el 21 de octubre de 2010.
- Ministerio de Fomento. D.G. Carreteras (2009). Mapa de Tráfico 2008.
- Mirchandani, P.B. y Francis, R.L. Eds. (1990). *Discrete Location Theory*. Wiley, Chichester.
- Murray, A. (2005). Geography in coverage modeling: Exploiting spatial structure to address complementary partial service areas. *Annals of the Association of American Geographers* 95/4, pp.761–772.
- Murray, A.T. y Tong, D. (2007). Coverage optimization in continuous space facility siting. *International Journal of Geographical Information Science* 21, 7, pp.757–776.
- Murray, A.T., Tong, D. y Kim, K. (2010). Enhancing Classic Coverage Location Models. *International Regional Science Review* 33, 2, pp.115–133.
- Owen, S.H. y Daskin, M.S. (1998). Strategic Facility Location: A Review. *European Journal of Operational Research* 111, pp.423–447.
- RACC (2010). Proyecto LABEL: European Truck Parking Areas. <http://w3.racc.es/index.php?mod=fundacion&mem=EPTodos&relmenu=31>. Consultado el 21 de septiembre de 2010.
- Reglamento (CE) nº 561/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de marzo de 2006 relativo a la armonización de determinadas disposiciones en materia social en el sector de los transportes por carretera.
- Resolución de 25 de enero de 2010, de la Dirección General de Tráfico, por la que se establecen medidas especiales de regulación del tráfico durante el año 2010. BOE número 40 de 15/02/2010, p.13.538.
- ReVelle, C.S. y Eiselt, H.A. (2004). Location Analysis: A Synthesis and Survey. *European Journal of Operational Research* 165, pp.1–19.
- ReVelle, C.S., Eiselt, H.A. y Daskin, M.S. (2007). A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research* 184, pp.817–848.
- UNECE (2008). European agreement concerning the international carriage of dangerous goods by road (ADR). United Nations Economics Commission for Europe (aplicable desde el 1 de enero de 2009).
- Yeh, A.G. y Cow, M.H. (1996). An integrated GIS and location-allocation approach to public facilities planning. An example of open space planning. *Computers, Environment and Urban Systems* 20 (4/5), pp.339–350.