

## CÁLCULO DE RUTAS ÓPTIMAS PARA EL TRANSPORTE DE RESIDUOS TÓXICOS Y PELIGROSOS

GÓMEZ DELGADO, M. y BOSQUE SENDRA, J.  
Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá  
C/ Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares (Madrid)  
e-mail: [montserrat.gomez@uah.es](mailto:montserrat.gomez@uah.es)  
[joaquin.bosque@uah.es](mailto:joaquin.bosque@uah.es)

### RESUMEN

En el presente trabajo, se ha utilizado un Sistema de Información Geográfica (PC Arc/Info) para calcular una serie de rutas de transporte de residuos tóxicos y peligrosos, a través de un importante corredor industrial de la región de Madrid: el Corredor del Henares. El objetivo perseguido era calcular rutas de mínimo coste y mínimo riesgo con una doble finalidad. Por una parte pretendíamos comparar los resultados con las rutas declaradas por los transportistas de estos residuos, y por otra comprobar si existían diferencias muy significativas entre los resultados de ambos tipos de rutas. La confirmación de este último hecho nos llevó a plantearnos la posibilidad de intentar obtener rutas intermedias o de compromiso, entre las que minimizan los costes económicos y aquellas que minimizan el riesgo a la población.

Palabras clave: Transporte de residuos tóxicos y peligrosos, cálculo de caminos mínimos, sistemas de información geográfica, análisis de punto ideal

### ABSTRACT

This work uses a PC Arc/Info SIG to compute several transport routes for toxic and dangerous waste through an important industrial region of Madrid: the Henares Corridor. The aim is to compute least cost and least risk routes (a) to compare the results with the routes declared by the waste carriers and (b) to test whether both kinds of routes show significant differences. Corroboration of the latter hypothesis leads us to an attempt to obtain compromise routes that minimize economical cost as well as population risks. In some cases this was not possible due to the spatial characteristics of the highway system.

Keywords: Transportation of hazardous waste, shortest path, geographical information systems, ideal point analysis

## 1. Introducción

En los últimos años ha aumentado el interés de la Administración y de manera especial de los científicos, por el adecuado control y gestión de los residuos, en general, y los residuos tóxicos y peligrosos (RTP) en particular.

La importante presencia de actividad industrial en el Corredor del Henares, nos llevó a estudiar de manera particular la problemática derivada de la producción de este tipo de residuos, teniendo en cuenta que, además, en esta zona existe un número importante de centros gestores, así como dos plantas de tratamiento de RTP (físico-químico y biológico) y un Depósito de Seguridad (destinado al almacenamiento definitivo de los mismos).

De hecho, uno de los problemas que plantea la gestión regional de estos residuos, es el transporte de los mismos desde los centros productores hasta los centros de tratamiento y/o eliminación y, de manera especial, la exposición de la población a posibles accidentes.

El objetivo de este trabajo consiste en determinar una serie de rutas que minimicen el coste de transporte desde los centros de producción a los centros gestores (a través del método del camino más corto). Por otro lado se calculó otra serie de rutas que minimizaban el riesgo a la población.

Las rutas obtenidas fueron comparadas con las rutas "reales" seguidas por los transportistas de este tipo de residuos, forzados por la actual legislación a utilizar las autovías como medio de prevención de riesgo a la población. Estos datos fueron proporcionados por la Agencia de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid (actual Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Regional) bajo ciertas normas de confidencialidad.

Finalmente, se intentó hallar una solución compromiso (ruta óptima) entre la ruta de mínimo coste y la ruta de mínimo riesgo. Como veremos, esta opción resulta un tanto inviable en nuestra área de estudio, debido a la distribución espacial de los centros de producción y las características de riesgo de la red de carreteras.

## 2. El Corredor del Henares

El Corredor del Henares está formado por un conjunto de municipios dispuestos de manera lineal entre las dos capitales de provincia Madrid y Guadalajara, que tienen como ejes vertebradores la carretera N-II y la paralela línea de ferrocarril ([figura 1](#)). Las deseconomías de aglomeración derivadas de este continuo urbano-industrial, provocaron la difusión industrial hacia los municipios marginales (siguiendo los ejes de comunicación transversales y el eje del río Jarama), constituyéndose, hoy día, como uno de los sectores industriales más importantes de la región. Este espacio dinámico y con personalidad propia suele ser dividido, en función de sus características socioeconómicas, en tres sectores: el eje central compuesto por los municipios aledaños a los ejes vertebradores a los que se ha aludido, y los márgenes de influencia norte y sur (COPLACO, 1974, Gómez Mendoza, 1977, Leguina, 1988, Celada, 1991, Díaz Muñoz y Galve Martín, 1993).

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

---

El espacio comprendido por este importante corredor (31 municipios que ocupan un área de 1.179,06 Km<sup>2</sup>), se encuentra poblado por un total de 509.705 habitantes según los datos del último padrón de 1996; el 82,46 % de los mismos (420.336 hab.) pertenece a la Comunidad de Madrid y sólo un 17,53% (89.359 hab.) forma parte de la vecina provincia de Guadalajara.

De las 164.553 personas ocupadas, el 43% se encuentra empleado en el sector de la industria y la construcción, siendo sin embargo el sector servicios el que aglutina un mayor porcentaje de empleos (53%).

Según los datos procedentes del Registro de Establecimientos Industriales del Ministerio de Industria y Energía<sup>1</sup>, en la zona se registra un total de 6.175 empresas que dan empleo a un total de 73.742 personas. En cuanto a la especialización industrial de las empresas instaladas en este corredor, podemos decir que son sectores como la construcción; metalurgia y fabricación de productos metálicos; fabricación de material y equipo eléctrico, electrónico y óptico o la construcción de maquinaria y equipo mecánico los más representativos de la zona ([Tabla 1](#)).

Hoy día y a grandes rasgos, podemos decir que nos encontramos ante un corredor industrial en el que se constata la presencia de grandes empresas especializadas en sectores competitivos, localizados principalmente en el eje central, mientras que en los márgenes se registran pequeñas y medianas empresas dedicadas a sectores maduros o fases intermedias en el proceso de producción. No obstante, entre el eje y los márgenes existen relaciones estrechas a través de flujos de mercancías, trabajadores, información y capital. Asimismo, podemos decir que se trata de un área en constante evolución en la que se vienen registrando importantes procesos de terciarización.

### **3. Producción y gestión de RTP en el Corredor del Henares**

#### **3.1. La producción de residuos tóxicos y peligrosos**

El importante entramado industrial localizado en este eje, así como la tradicional especialización en determinados sectores industriales catalogados como generadores de Residuos Tóxicos y Peligrosos, se traduce en una importante producción de este tipo de residuos.

El Real Decreto 833/1988 por el que se aprobaba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986 Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, desarrollaba la normativa reguladora de las actividades de producción y gestión de estos residuos, del control y seguimiento de los mismos y de las responsabilidades, infracciones y sanciones que puedan derivarse del inadecuado ejercicio de las citadas actividades. Aunque esta ley ha sido derogada por la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos (todavía sin Reglamento aprobado para su ejecución), se mantiene básicamente lo

---

<sup>1</sup> Los datos de Guadalajara están referidos a 1996, mientras que los datos correspondientes a Madrid pertenecen a 1994.

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

---

recogido en el Real Decreto citado, salvo algunas pequeñas modificaciones aprobadas mediante el Real Decreto 952/1997, del 20 de junio<sup>2</sup>.

A través de determinados documentos oficiales derivados de aquella normativa como las *Declaraciones Anuales de Productores de Residuos Tóxicos y Peligrosos*, *Memorias Anuales de Gestores de Residuos Peligrosos* y *Notificaciones previas al traslado de Residuos Peligrosos*, pudimos conocer la producción de estos residuos en este destacado Corredor Industrial, los gestores y centros de tratamiento más importantes ubicados en este espacio geográfico, así como el volumen de movimientos que la gestión de los mismos provoca, anualmente, a través de sus carreteras.

De la explotación de la información derivada de las declaraciones de productores y las memorias de los gestores presentadas en la Comunidad de Madrid y la Comunidad de Castilla-La Mancha (no olvidemos que este corredor se encuentra en el territorio de dos provincias y dos comunidades autónomas diferentes), 16 municipios fueron catalogados como productores de RTP, cuya producción total, en el año 1993, ascendió a 9.690 Tm, de las cuales el 87% se concentraba en los municipios que han conformado tradicionalmente el eje central de este corredor, a saber, Coslada, San Fernando de Henares, Torrejón de Ardoz, Alcalá de Henares, Azuqueca de Henares, Cabanillas del Campo y Guadalajara ([figura 2](#)).

La normativa también hace distinción entre aquellos productores que generan menos de 10 toneladas anuales de RTP, denominados *Pequeños Productores*, frente a los que superan esta cifra y son considerados *Grandes Productores*. En este sentido, podemos decir que el número de empresas declarantes de un tipo y otro son similares (39 y 33 respectivamente), mientras que, como era de esperar, el volumen declarado por los grandes productores (9.592 Tm), supera con creces lo generado por los pequeños productores (97 Tm, es decir un 1% del total).

Si atendemos al origen de los mismos, podemos comprobar que casi el 50% es generado por empresas dedicadas al sector de la fabricación de material eléctrico, seguido por la industria química (23,4%) o la fabricación de automóviles y repuestos ([figura 3](#)), en consonancia con los datos derivados de la explotación que de este tipo de información se realizó para toda la Comunidad de Madrid (Gómez Delgado *et al.*, 1995).

### 3.2 Traslados de residuos tóxicos y peligrosos

En el caso de las Notificaciones Previas de traslado de estos residuos, y según la normativa vigente, el transportista tiene la obligación de remitir una copia de esta Notificación al órgano ambiental competente de cada una de las Comunidades Autónomas por las que transite desde el principio al final del recorrido (así como al Ministerio de Medio Ambiente).

En este caso, no fue posible acceder a las Notificaciones de Traslado remitidas a la Comunidad de Castilla-La Mancha. No obstante, esa falta de información se suplió en parte, con la revisión de los documentos existentes en la Comunidad de Madrid, puesto que aquí quedaban

---

<sup>2</sup> En este Decreto se incluye la nueva lista comunitaria de residuos peligrosos, actualizada en la Directiva 94/904/CE del 22 de diciembre.

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

---

recogidos algunos movimientos procedentes de la vecina comunidad, cuya trayectoria incluía parte del territorio madrileño.

A partir de estas Notificaciones de Traslado remitidas a la Comunidad de Madrid, pudimos comprobar que, para ese mismo año 1993 fueron notificados un total de 1.645 traslados de RTP. De estos, 332 procedían de un centro productor localizado en el Corredor y el 51% del total, tuvo como destino final algún centro gestor ubicado en este mismo Corredor ([figura 4](#) y [figura 5](#)). Este hecho es debido a la importante presencia de gestores autorizados en la zona (23 en el año 1996 según la Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Regional de la Comunidad de Madrid). Por otro lado, constatamos un importante volumen de traslados "de paso" por la zona de estudio, cuyo origen y destino se encontraba en otras comunidades autónomas (recordemos la posición estratégica que ocupa esta zona y toda la Comunidad de Madrid, como región central del país, que en este caso, acarrea unas consecuencias no muy beneficiosas para la misma).

En la [figura 5](#) se muestra la distribución espacial de estos traslados y el número acumulado de los mismos por tramo de carretera. Observamos como un importante volumen de estos movimientos se concentra en las principales autovías (N-I y N-II) y en las inmediaciones de los centros gestores más importantes de la zona, como la planta de tratamiento físico químico de Valdebebas, la planta de tratamiento biológico de Manoteras, el Depósito de Seguridad de San Fernando o Áridos Ligeros en Villalbilla.

#### 4. Cálculo de rutas para el transporte de RTP en el Corredor del Henares

Ante el importante volumen de movimientos generado por la gestión de los residuos tóxicos y peligrosos, se decidió emplear la técnica SIG para llevar a cabo uno de los análisis de redes más comúnmente utilizados como es el cálculo de caminos mínimos o *shortest path* (Bosque Sendra, 1992, 217). Se pretendía con ello simular el desplazamiento de dichos materiales a través de las carreteras de nuestra zona de estudio y obtener así una colección de rutas óptimas para su traslado.

##### 4.1. El problema de la ruta de mínimo coste y de mínimo riesgo en el transporte de mercancías peligrosas. Revisión bibliográfica.

El problema del cálculo de caminos mínimos ha sido ampliamente tratado en la literatura de análisis de redes. Sus interesantes aplicaciones prácticas, se traducen en numerosos trabajos centrados en distintos y variados tópicos y muchos de estos estudios tienen como finalidad desarrollar planes de emergencia efectivos en caso de accidente (rutas rápidas para la evacuación de heridos, rutas de acceso de ambulancias, camiones de bomberos, etc.).

En el caso concreto de transporte de mercancías peligrosas, el principal problema al que hay que hacer frente es el desconocimiento general sobre el peligro asociado a las sustancias peligrosas y nocivas existentes, derivado de la diversidad física y química de las mismas. Con la finalidad de controlar al máximo esta incertidumbre, los algoritmos desarrollados para simular su dispersión en caso de accidente se caracterizan por la incorporación en el cálculo de una gran cantidad de datos técnicos, como toxicidad sobre la salud, toxicidad sobre los acuíferos, persistencia biológica,

solubilidad del residuo, carga iónica del residuo, infiltración potencial o velocidad de propagación hacia los acuíferos, entre otros (Jennings y Suresh, 1986).

En líneas generales, podemos decir que prácticamente todos los trabajos desarrollados con el objetivo de diseñar este tipo de rutas, parten de lo dispuesto en las reglamentaciones nacionales desarrolladas para el control del transporte de materiales peligrosos, cuyos tres principales criterios suelen ser (a) la minimización de la probabilidad de accidentes, (b) la minimización del número de personas afectadas y (c) la minimización de los daños materiales. Con estas directrices, el riesgo asociado a una red suele establecerse como el producto de la probabilidad de un accidente y las consecuencias del mismo (Boulmakoul *et al.*, 1999). El segundo y también importante punto de partida común en casi todas las reglamentaciones, está referido al tipo de carreteras a utilizar en este tipo de movimientos; como norma general, un vehículo que transporte materiales peligrosos debe circular por carreteras que no atraviesen o queden cerca de zonas densamente pobladas, lugares donde concurren un número elevado de personas, túneles, calles estrechas o callejones, siendo el tipo de carretera más aconsejable las autopistas y autovías. No obstante, existe un común acuerdo en considerar poco realistas a aquellas rutas restringidas a este tipo de factores y diversos autores proponen la inclusión de otro tipo de criterios como:

1. El tipo de población afectada (con el objetivo de determinar el riesgo asociado a categorías especiales de población, entendidos como ciertos grupos con dificultad a la hora de efectuar una evacuación) y los costes de tiempo (Zografos y Davis, 1989, 664).
2. Medidas de equidad respecto al territorio que ha de soportar estos traslados. Así, R. Gopalan y otros, sostienen que la región geográfica atravesada por una red, puede dividirse en zonas de manera que pueda establecerse una serie de rutas que minimice el riesgo total para un número previamente establecido de traslados, y que, simultáneamente, mantenga la diferencia total de riesgo entre cada zona dentro de un umbral y, así, distribuir el riesgo de manera equitativa entre las distintas zonas, ya sea mediante la modificación de la longitud de la ruta o mediante el número de traslados (Gopalan *et al.*, 1990).
3. T. Glickman y M. A. Sontag, realizan un estudio sobre las grandes diferencias entre aquellas rutas que minimizan los costes operativos y las que minimizan el riesgo (basadas en la probabilidad de accidentes de vehículos pesados) y proponen utilizar un sistema de compensaciones entre coste y riesgo que permita estimar el coste medio (medido aquí en muertes evitadas) de cambiar el trazado de una ruta (Glickman y Sontag, 1995).
4. Otros autores consideran fundamental la posibilidad de incluir criterios ambientales en el cálculo de las consecuencias de un accidente y proponen añadir los daños provocados en cultivos y suelos, fauna, lagos y ríos, bosques, incluyéndose también los daños potenciales al patrimonio histórico-artístico, áreas turísticas, etc. (Ashtakala y Eno, 1996). Además, debería establecerse un modelo para cada tipo de mercancía peligrosa trasladada, de manera que, si se implementara en un Sistema de Transporte Inteligente, funcionara como un mecanismo de alerta para el transportista, en aquellas secciones de mayor riesgo de la ruta diseñada.



Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

---

Por otro lado, y según las distintas fuentes revisadas, podemos decir que no son muy numerosos los trabajos en los que se plantea solucionar problemas de este tipo (es decir, tomando como base el transporte de mercancías peligrosas) en un entorno SIG. Este hecho contrasta con las ya conocidas posibilidades que los SIG ofrecen en la creación de modelos de flujos a través de redes lineales (Lupien *et al.*, 1987, Dunn y Newton, 1992). Una de las importantes contribuciones de un SIG en el análisis de redes es la capacidad que los Sistemas de Gestión de Base de Datos ofrecen para el cálculo de dichos flujos a partir de un valor de impedancia, que puede ser resultado de la combinación de varias variables.

Precisamente, y atendiendo a las demandas de las autoridades gubernamentales, se ha producido un notable incremento del interés en este tipo de análisis para resolver problemas de toma de decisiones en tiempo real, ante un accidente en el transporte de materiales peligrosos. M. Lepofsky y otros, apuntan la posibilidad de diseñar un Sistema de Información Geográfica de Transporte (*Geographic Information Systems for Transportation, GIST*) como herramienta para asistir a las autoridades pertinentes en la regulación del transporte de estos materiales, así como las líneas de actuación a seguir en caso de accidente (Lepofsky *et al.*, 1993). La cuantificación del riesgo inherente a este tipo de actividad se llevaría a cabo a partir de la siguiente fórmula:

*probabilidad de accidente x probabilidad de derrame x consecuencias*<sup>riesgo percibido</sup>

Como podemos observar, a la fórmula habitualmente empleada, estos autores añaden la probabilidad de derrame, medida a partir del tipo de sustancia y del tipo de *container* utilizado para el transporte y el riesgo percibido, que se integra en la fórmula como una potencia de las consecuencias (medida en términos de población afectada); si se considera un riesgo neutral, se elevará el factor consecuencias a uno, aumentándose en aquellos casos en los que se prevea un incremento en la percepción del riesgo<sup>3</sup>.

A partir de estos datos, los autores calculan una serie de rutas que combinen eficiencia (el factor económico escogido es el tiempo) y seguridad (a partir de la estimación del riesgo recién descrita). Como en el resto de los casos, también es habitual utilizar distintos pesos para cada una de las rutas y, también como en otros casos, la ruta que maximiza la seguridad resulta económicamente inviable (dos veces más larga que la alternativa más rápida).

Otros de los trabajos de interés y elaborado a partir de técnicas SIG (en concreto Arc/Info), es el de J. Brainard y otros. En este caso se comparan y evalúan diferentes rutas para el transporte de residuos químicos en el Reino Unido (Brainard *et al.*, 1996). Las variables utilizadas para simular distintas rutas fueron el tiempo, la distribución de la población en áreas de 25 hectáreas, la probabilidad de accidentes y la vulnerabilidad de los acuíferos. La comparación de los resultados de los distintos escenarios resulta realmente interesante, pero los propios autores reconocen que una simple comparación de resultados numéricos no es base suficiente para diseñar una política de transporte.

---

<sup>3</sup> Según los autores, el riesgo percibido por el público es mayor cuando se produce un accidente con cien víctimas, que si se producen cien accidentes con una víctima cada uno.

En definitiva, pudimos comprobar que en la inmensa mayoría de los trabajos que se realizan sobre esta materia, se adoptan las directrices marcadas por los reglamentos nacionales. Así, la estimación del riesgo se basa en dos pilares fundamentales como son la probabilidad de accidente y las consecuencias del mismo. Las fronteras de este último no parecen muy nítidas, pudiendo complicarse el proceso hasta el infinito, siempre que se disponga de un abundante volumen de datos técnicos. Quizás la utilización de los modelos de dispersión sea más relevante a la hora de establecer planes de emergencia efectivos en caso de accidente. A nuestro entender, ésta sería una segunda etapa en la planificación de una política adecuada y segura de transporte de mercancías peligrosas, puesto que se contempla la posibilidad de que un accidente ocurra. Sin embargo, nuestra investigación quedaría enmarcada en los estadios inmediatamente anteriores a esta fase. Otro factor común a todos estos estudios, es la utilización de la variable población, tanto para calcular las consecuencias, como para evaluar, a posteriori, el alcance de las distintas rutas calculadas. Por otro lado, en casi todos ellos, se alude a la necesidad de combinar variables de tipo económico y de tipo poblacional o medioambiental, pero pocos se arriesgan a buscar una solución intermedia, aludiendo, cuando se utiliza la técnica SIG, a la imposibilidad de utilizar impedancias múltiples.

Es importante insistir en que en muchos de estos trabajos se desarrollan algoritmos específicos para cada caso, lo que supone una labor importante de programación que, por otro lado, proporciona un cierto grado de libertad para probar con distintas combinaciones. Quizás sea este el motivo por el cual existen relativamente pocos trabajos en los que se utilice un SIG. No obstante, nosotros pretendemos insistir aquí en las ventajas de este tipo de herramientas y en las posibilidades derivadas de la aplicación de esta técnica.

Finalmente, queremos hacer hincapié en que casi todos los trabajos se centran en la obtención y comparación de un tipo de rutas económicamente eficientes y otras que podemos denominar "seguras". En este sentido, una de las principales aportaciones de este trabajo es la utilización de técnicas de evaluación multicriterio (en concreto el Análisis de Punto Ideal) para intentar encontrar un tipo de rutas "compromiso" entre aquellas que minimicen los costes de transporte de este tipo de residuos y aquellas que minimicen el riesgo a la población potencialmente expuesta en caso de accidente.

Teniendo en cuenta toda esta información previa y en función de los datos recopilados y analizados sobre producción y traslados de RTP en nuestra área de estudio, se abordó el cálculo de las rutas óptimas para el transporte de este tipo de residuos. La elección de las variables a utilizar como impedancia se realizó en función de la homogeneidad de los datos disponibles, pues debemos tener presente que se manejaba información de dos comunidades autónomas diferentes, con realidades y disposición y elaboración de datos también muy diferentes.

#### 4.2. Metodología y variables a utilizar en el cálculo de rutas.

El objetivo era calcular una serie de rutas (32) con origen en cada uno de los 16 municipios productores de RTP y con destino final dos de los centros gestores de RTP más importantes de la Comunidad de Madrid: el Depósito de Seguridad de San Fernando de Henares (localizado en el municipio del mismo nombre) y la planta de Tratamiento físico-químico de Valdebebas (ubicada a orillas del río Jarama, en el límite municipal entre Paracuellos de Jarama y Madrid). La ruta número



Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

---

33 tendría como origen dicha planta de tratamiento y como destino final el Depósito de Seguridad, puesto que este es el destino final obligado de la torta filtrada de hidróxidos metálicos y sales insolubles, resultado de los distintos procesos de tratamiento (detoxificación, neutralización y precipitación) a los que son sometidos los residuos líquidos y pastosos que llegan a la planta de tratamiento físico-químico de Valdebebas ([figura 6](#)).

A través del procedimiento de cálculo de caminos mínimos disponible en el SIG PC Arc/Info, basado en el algoritmo de Dijkstra (Daskin, 1995, 43), se obtuvieron las rutas de menor distancia o más cortas entre centros productores y centros gestores y, por otro lado, se calculó otro tipo de rutas que pretendía minimizar el riesgo a la población ante un posible accidente. En el primer caso fue utilizada como variable de medida (impedancia) la distancia. En el segundo caso se utilizaron dos variables ampliamente utilizadas en este tipo de estudios (población y accidentes) y se incorporó una variable nueva: el volumen de tráfico soportado por la red (IMD o Intensidad Media Diaria). Esta última variable nos pareció de enorme interés por dos razones. En primer lugar los conductores de esos vehículos se encuentran potencialmente en riesgo ante un posible accidente en la carretera y, por otro lado, la saturación de determinados tramos de carretera puede favorecer la ocurrencia de colisiones en cadena, etc., que pueden desembocar en un accidente. Por tanto, se estimó que esta variable, no utilizada en ninguno de los trabajos revisados, podría ser de gran utilidad para definir de manera más completa el riesgo inherente a cada tramo de carretera. Todas ellas fueron combinadas a través de una sumatoria lineal ponderada:

$$R = (Población * 0,61) + (IMD * 0,33) + (Accidentes * 0,06)$$

La cartografía digital de las vías de comunicación utilizada en el estudio fue obtenida en el CNIG y convertida a formato ARC/INFO para su posterior manipulación. El año de referencia es 1991 y la escala de digitalización fue 1:100.000. Una vez realizado un proceso de depuración de aquel mapa inicial (puesto que no todas las vías de comunicación iban a ser utilizadas para el cálculo), las carreteras que finalmente conformarían nuestra red, fueron carreteras de competencia/orden estatal (autovías nacionales y carreteras nacionales) y de competencia/orden autonómica (carreteras principales, carreteras secundarias o determinadas carreteras locales), en su recorrido parcial o total.

En cuanto a las variables utilizadas en la determinación del riesgo (puesto que la longitud de cada tramo de carretera es calculada por el propio programa de manera automática), fueron obtenidas en diferentes instituciones, con las dificultades de homogeneización de los datos que eso conlleva:

1. IMD y accidentes mortales de tráfico

Los datos de IMD y número de accidentes con víctimas de las carreteras de competencia estatal, fueron proporcionados por el Departamento de Seguridad Vial, Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento. El Servicio de Planificación y Proyectos de la Dirección General de Carreteras, Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte de la Comunidad de Madrid, nos proporcionó todos los datos referidos a la red autonómica madrileña. En el caso del sector alcarreño, los datos de IMD fueron facilitados por el Servicio de Conservación de la Dirección General de Carreteras, Obras Hidráulicas y

Transportes, Consejería de Obras Públicas de la Junta de Comunidades de Castilla La-Mancha, mientras que la Jefatura Provincial de Tráfico de Guadalajara nos proporcionó los datos sobre accidentalidad (número de accidentes y punto kilométrico en el que se produjeron).

El año de referencia de todos los datos es 1995, salvo contadas excepciones.

## 2. Población residente

El objetivo era disponer, para cada tramo de la red, del volumen de población residente en un radio de 500 metros. El problema de esta variable vuelve a residir en la diferencia de calidad, cantidad, etc., de la información disponible en ambas provincias. En el caso de Madrid, contábamos con una base de datos digital (espacial y temática), referida al último censo de 1991 (Comunidad de Madrid, 1993), información que nos fue proporcionada por el Departamento de Estadística de la Consejería de Economía de la Comunidad de Madrid, siendo la unidad espacial de referencia más pequeña el sector urbano. En el caso de Guadalajara contábamos con la base temática derivada del mismo censo (INE, 1993a), pero referida a dos unidades espaciales diferentes: núcleo urbano y diseminado. La componente espacial, por tanto, tuvo que ser digitalizada y unida a la anterior.

## 4.3. Incorporación de las variables a la red

### 4.3.1. Intensidad Media Diaria

Una vez recopilados todos los datos, fueron introduciéndose, por tramos, en la base de datos asociada a nuestra cobertura de carreteras.

La variable IMD resultaba de gran interés para determinar y cuantificar el riesgo a la población. Una de nuestras preocupaciones era encontrarnos con un número importante de vías, con ausencia de este dato. Esto nos podía conducir a una situación falseada, puesto que cualquier carretera es transitada por un número determinado de vehículos, por poco importante que sea. En otras ocasiones, el problema estribaba en la escasez de estaciones que controlaban el tráfico de grandes tramos de carreteras junto a las que podía encontrarse algún núcleo de población o que podían estar intersecados con otras vías (no olvidemos que el aforo se lleva a cabo en el lugar puntual donde se encuentra instalada la estación). En estos casos podría producirse una desviación del tráfico y, entonces, la IMD no sería la misma en todo los arcos que conformaran ese tramo.

En los casos en los que se daba esta última circunstancia, la situación se resolvió sumando la IMD de todas las estaciones que controlaban la carretera en cuestión y dividiéndola entre los kilómetros totales de su recorrido. A partir de este dato, se asignaba a cada tramo el número de vehículos correspondientes en función de su longitud, siempre que no existiera una diferencia importante entre el volumen registrado entre las distintas estaciones. Si esto ocurría (debido a la existencia de un cruce con otra carretera de mayor importancia por la que pudiera desviarse el

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

---

tráfico), procuramos ajustarnos a los tramos más inmediatos, efectuando otra suma distinta a partir del cruce en cuestión.

Si el problema era la ausencia de estación, se asumía la IMD de la estación más cercana; cuando se daba una confluencia de tres o más carreteras, con ausencia de datos en alguna de ellas, se asignó la media de las restantes, siempre que dicha vía estuviera compuesta, a lo sumo, por uno o dos arcos.

En líneas generales, podemos decir que son las carreteras que pertenecen a la RIGE las que soportan mayor volumen de tráfico. Tanto la N-I, la N-II como la N-III poseen tramos con IMD superiores a los 100.000 vehículos; junto a ellas destaca la M-40, la A-10, la N-100 y, hasta una carretera local: la M-115.

#### 4.3.2. Accidentalidad

Como ya comentamos, disponíamos del punto kilométrico exacto en el que se había producido el accidente para las carreteras de competencia autonómica, generalizándose a tramos de carretera en el caso de las de competencia estatal. En este caso, también se tuvo especial cuidado para asignar correctamente este dato a cada arco.

El número de accidentes es bastante variable en toda la red. Existe un número elevado de carreteras en las que se registran menos de 2 accidentes anuales (entre ellas varios tramos de las principales nacionales). Una de las zonas más problemáticas se localiza en las carreteras que se encuentran en las inmediaciones de la N-II. En líneas generales, las carreteras de la parte Norte de nuestra área de estudio están caracterizadas por una mayor accidentalidad que las de la parte Sur y lo mismo podemos decir de las carreteras madrileñas, respecto a las carreteras de la provincia de Guadalajara.

#### 4.3.3. Población

Las consecuencias de un accidente sufrido por un vehículo de transporte de RTP pueden ser nefastas si se produce a la altura de un núcleo urbano poblado, aunque como ya apuntamos, existe otra población en riesgo: los ocupantes de los vehículos que circulan, en ese momento, por la carretera en la que se produce el mismo. No podemos predecir, exactamente, cuál puede ser el alcance de un accidente de este tipo (Brainard *et. al*, 1996). Los expertos no aportan datos concretos, puesto que el radio de afección depende, no sólo de la peligrosidad del producto transportado en sí, sino de las condiciones ambientales del momento, la facilidad de propagación del producto, la existencia de barreras artificiales o naturales, etc. No obstante, nuestro estudio pretendía calcular una ruta óptima para el transporte de estos residuos, estableciendo un corredor de seguridad en torno a cada carretera y, estableciendo la impedancia en función de la población residente dentro de ese corredor.

El problema se planteaba en la asignación de este tipo de información (poligonal) a los tramos de carretera (lineal). Se probaron varios procedimientos: dos en PC Arc/Info y uno en IDRISI, siendo este último el que resolvió el problema de manera más satisfactoria.

#### A) Procedimientos en Arc/Info

Los métodos probados en el entorno vectorial fueron el análisis de línea en polígono (superposición de cobertura de carreteras y la de población con el comando IDENTITY) y el análisis de polígono en polígono (también con IDENTITY), asignando después, el dato de población a la carretera más cercana.

En el primer caso, la red resultante se fragmentaba en tantos arcos como polígonos atravesara cada arco inicial, asignándole a cada uno la población existente en ese polígono. Se observó que, además de producirse una notable fragmentación de los arcos que formaban nuestra red, el resultado simplificaba excesivamente los datos. En muchos casos, la carretera no atravesaba un sector urbano densamente poblado por unos metros y quedaba incluida en otro polígono de unidad geográfica superior (normalmente la de entidad), generalmente con escasos o ningún habitante.

En el segundo caso, a la cobertura de población se le superpuso otra de polígonos derivada de la generación de un *buffer* de 500m alrededor de cada carretera. El siguiente paso consistía en asignar la población de los distintos sectores de población, incluidos en el corredor de seguridad, a la carretera más próxima, para salvar, así, el problema de asignación del proceso anteriormente descrito, proceso que se llevó a cabo con el comando NEAR, que calcula la distancia desde cada punto de una cobertura a la línea, punto o nodo más cercano incluido en otra cobertura. Lamentablemente, el producto de esta asignación tampoco resultó muy satisfactorio. La dimensión espacial de cada entidad, núcleo o sector de población se vio reducida a un punto situado, aproximadamente, en el centro de cada polígono, con el problema que esto conlleva. En nuestro caso resultó especialmente problemático en las intersecciones o cruces de dos o más carreteras. La población de cada punto fue asignada al arco o tramo de carretera más próximo, y sólo a uno, aunque dos o más de ellos estuvieran incluidos en el mismo sector urbano. En estos casos, la población real, potencialmente afectada en cada tramo de carretera, podía reducirse hasta la mitad (Gómez Delgado y Bosque Sendra, 1999).

#### B) Procedimiento en IDRISI

En este caso, también disponíamos de una base, previamente elaborada, sobre densidad de población (habitantes por píxel) por sectores o núcleos de población.

Una vez importada y rasterizada la cobertura de carreteras, se generó el corredor de 500 metros en torno a cada tramo. A continuación y mediante el comando DISTANCE, calculamos la distancia euclidiana desde cada celda de la imagen a los tramos de carreteras; DISTANCE, retiene la distancia matemática, pero no el identificador del elemento más próximo (en nuestro caso los identificadores de las carreteras). No obstante, IDRISI posee un comando complementario

(ALLOCATE), cuya función es, precisamente, "recuperar" los identificadores de los elementos desde los que se calculó la distancia y asignárselos a cada una de las celdas. Así, se generó una nueva imagen, en la que el identificador de distancia en metros de cada celda al tramo de carretera más próximo, fue sustituido por el identificador del propio tramo en cuestión.

Sólo restaba superponer una máscara que definiera el corredor de 500 metros (generada con BUFFER). Para obtener el número de habitantes residiendo en cada uno de los corredores, realizamos una extracción de los datos contenidos en las imágenes de habitantes por píxel (mediante el comando EXTRACT), utilizando como referencia los elementos espaciales obtenidos (corredores-polígonos).

Con este proceso se obtuvo un archivo .val (en formato ASCII) con el identificador de cada tramo de carretera y el número de habitantes residentes en un radio de 500 metros. El último paso y definitivo, consistía en incorporar el resultado de nuestro análisis en IDRISI a la cobertura original de carreteras (en PC Arc/Info).

## 5. Resultados de las rutas de mínima distancia y mínimo riesgo

Una vez incorporados los datos, se calculó la impedancia de riesgo para cada tramo de carretera, pues como ya indicamos, para el cálculo de la ruta de mínimo coste se empleó como impedancia la distancia, es decir, la longitud de cada tramo de carretera.

A continuación, utilizamos las herramientas disponibles en PC Arc/Info para el cálculo de caminos mínimos ya mencionado (ESRI, 1997).

En primer lugar, hay que hacer alusión al hecho de que, como era de esperar, no existía coincidencia entre las rutas de mínima distancia y las de mínimo riesgo, salvo algunas excepciones.

A la vista de los resultados ([tabla 2](#)), podemos considerar que la minimización del riesgo supone siempre un incremento del coste total de gestión, mientras que la minimización de la distancia recorrida se traduce en un notable incremento del riesgo ligado a dicha actividad:

En la [figura 7](#), podemos observar uno de los casos más extremos. La diferencia en kilómetros entre la ruta de menor coste y menor riesgo desde Mejorada del Campo a la planta de tratamiento físico-químico de Valdebebas es de 78 kilómetros. No obstante, es el caso del recorrido entre los polígonos industriales más importantes de San Fernando de Henares y el Depósito de Seguridad el que registra una mayor diferencia entre ambas trayectorias: 81,89 Km; resultado todavía más sorprendente si tenemos en cuenta que tanto origen como destino se encuentran en el mismo municipio.

Como podemos comprobar en la [tabla 3](#), en 9 casos las rutas de mínima distancia y mínimo riesgo coincidían sistemáticamente. Se trata de municipios más o menos cercanos a la planta de tratamiento de Valdebebas (al norte del área de estudio), en cuyos recorridos no resulta necesario cruzar la N-II para llegar al lugar de destino

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

---

Por otro lado, y atendiendo a las trayectorias de las distintas rutas, observamos como en las de mínimo riesgo son las carreteras de tipo local las más utilizadas, evitando, en la medida de lo posible, circular por autovías o carreteras de carácter principal por ser éstas las que acumulan mayor intensidad de tráfico o ser las que discurren en torno a las concentraciones urbanas más importantes. Por el contrario, al ser las vías más rápidas y directas, son las más frecuentemente utilizadas en el caso de las rutas de mínimo coste.

## 6. Cálculo de rutas óptimas

Las importantes diferencias detectadas hacían necesaria la búsqueda de una ruta compromiso o ruta óptima, solución intermedia entre los dos escenarios planteados, que en este trabajo se pretendió alcanzar a través del Análisis de Punto Ideal.

Por otro lado, pudimos comprobar que el 99% de las rutas utilizadas y declaradas por los transportistas que llevan a cabo esta actividad, coinciden con aquellas rutas que minimizan la distancia y que, por tanto, minimizan los costes económicos derivados de este transporte, sin tener en cuenta determinados factores de riesgo, por lo que la obtención de una ruta compromiso se hacía, si cabe, más necesaria.

El análisis de punto ideal (API) es un método ampliamente utilizado en el campo de la decisión multicriterio (Barredo, 1996, 84). Partiendo de la distribución de las alternativas a evaluar en un determinado plano (P) y establecidos los criterios en ambos ejes (X e Y), se establece un punto de referencia e inalcanzable como punto ideal (M). Las mejores alternativas serán aquellas que se encuentren a menor distancia (matemática) de dicho punto. Se pretende, por tanto, maximizar los criterios en cuestión. En nuestro caso particular, dispuestas las alternativas o rutas en un determinado plano, la alternativa mejor sería aquella de menor distancia al punto ideal, sólo que, en esta ocasión, el punto ideal está situado en el origen de coordenadas, ya que aquí lo que se pretende es minimizar los criterios de coste y riesgo.

Así, el cálculo de la impedancia de cada tramo de la red para obtener la ruta óptima (RO) se llevaría a cabo a partir de la siguiente fórmula:

$$RO = \sqrt{(D - 0)^2 + (R - 0)^2}$$

donde  $D$  sería la longitud de cada arco de la red y  $R$  sería el riesgo asociado a cada arco, calculado mediante la ecuación citada anteriormente.

De los resultados obtenidos se deriva que la técnica del punto ideal, y en general la obtención de una solución compromiso o ruta óptima entre las rutas de mínima distancia y mínimo riesgo, ofrece buenos resultados en aquellos casos en los que los puntos de origen y destino se encuentran más alejados ([figura 9a](#) y [figura 9b](#)); concretamente se trataba de 4 de las 33 trayectorias simuladas, no siendo posible encontrar resultados intermedios en el resto.



A la vista de los resultados reflejados en la [tabla 3](#), también podemos comprobar cómo es en los casos en los que la diferencia entre las rutas de mínimo coste y de mínimo riesgo era mayor, donde ha sido imposible encontrar una solución compromiso, ni tan siquiera un resultado diferente de los obtenidos hasta el momento. En función de la ubicación del origen y destino, los resultados coincidían exactamente con la ruta de mínima distancia o la ruta de mínimo riesgo. También podemos comprobar en esta tabla, cómo no siempre se obtuvieron soluciones compromiso en todas y cada una de las rutas de mayor recorrido entre origen y destino.

Finalmente, hemos de hacer constar que se probaron hasta 5 escenarios más, modificando el modo de interrelación de las variables. No exponemos aquí los resultados, pues la tónica general de los mismos era la ya descrita para el primero de ellos.

En estos escenarios se probaron varias posibilidades como incluir en el cálculo de la ruta de mínimo coste la distancia y la IMD soportada por la red (combinándolas a través de un API para obtener la impedancia final); con este procedimiento conseguimos modificaciones (muy poco significativas) en 8 rutas. En un tercer escenario se planteó el cálculo de la ruta óptima con las mismas variables, pero aplicando la sumatoria lineal ponderada y jugando con pequeñas variaciones en los pesos otorgados a las mismas (una especie de "análisis de sensibilidad"); sólo se obtuvo una modificación respecto a los resultados de los escenarios anteriores. En un último ensayo, se replanteó el procedimiento de cálculo de la impedancia de riesgo. Así, se utilizó la combinación de la variable población y la probabilidad de accidentes, relacionando, para el cálculo de esta última, la IMD con el ancho de carretera (a través de una sumatoria lineal ponderada). De nuevo la aportación de nuevos resultados significativamente diferentes fue prácticamente nula.

## 7. Conclusiones

En primer lugar podemos concluir que la utilización de la técnica de evaluación multicriterio de análisis de punto ideal resulta de gran interés para la determinación de rutas "compromiso". El moderado éxito alcanzado en el caso que nos ocupa es atribuible, en gran medida, a la propia configuración espacial de la zona, dominada por la barrera infranqueable constituida por la N-II, así como la distribución geográfica de las variables utilizadas en el estudio, que se traduce en una acumulación muy acusada de externalidades negativas en zonas muy concretas. De hecho, en torno a dicha vía se acumula el 41% de los accidentes acontecidos y reside el 60% de la población registrada en el corredor de 500 metros establecido alrededor de toda la red. En la figura 9a y figura 9b podemos comprobar como el paso a través de la N-II, suele desplazarse con frecuencia unos 25 kilómetros, cerca de la provincia de Guadalajara, donde la acumulación de los factores de riesgo con los que venimos trabajando es mucho menor. Son, por tanto, las fuertes desigualdades en cuanto a la distribución geográfica de las variables implicadas en este estudio las que han impedido obtener resultados de compromiso, lo que no significa que en otro espacio geográfico, con otras características, no pueda aplicarse con éxito esta metodología.

No obstante, creemos aconsejable la utilización de las rutas que minimizan el riesgo frente a aquellas que minimicen la distancia recorrida, puesto que la seguridad que éstas proporcionan puede compensar el incremento de tiempo empleado para recorrerlas. De hecho, en el peor de los casos se registra una diferencia de 82 kilómetros, que, traducido en tiempo, supone pasar de emplear 10

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

---

minutos en el recorrido a una hora. Por otro lado, no se trata de movimientos que se realicen a diario, ni siquiera todas las semanas, lo que nos anima a plantear que, ante la posibilidad de un viaje esporádico cada cierto tiempo, la diferencia de hasta 50 minutos puede ser perfectamente asumida por el productor (que es el que contrata al transportista si no tienen los medios necesarios para hacerlo él mismo) con tal de evitar consecuencias irreversibles derivadas de un accidente de estas características.

Esta recomendación queda, por tanto, en abierta contraposición con lo dispuesto por la legislación vigente sobre transporte de mercancías peligrosas por carretera (Real Decreto 74/1992), puesto que se ha comprobado (al menos en este caso) que siguiendo las indicaciones legales sobre el uso de autovías y carreteras principales, se fomenta la utilización de las rutas que minimizan los costes, que como hemos podido comprobar, suelen ser las más peligrosas.

Por último y no por ello menos importante, hemos de decir que de los resultados de este trabajo se deriva que la técnica SIG ofrece interesantes ventajas para la planificación de itinerarios de transporte de estos peligrosos residuos, dado que nos permite la integración y representación de un gran número de variables, así como una sencilla modificación o actualización de las mismas. Por otro lado, es posible combinar una serie de interesantes variables que nos permiten simular con facilidad el movimiento de recursos a través de una determinada red y realizar un rápido análisis del efecto de los mismos.

## 7. Referencias bibliográficas

- Ashtakala, B. y Eno, L. (1996): "Minimum risk route model for hazardous materials", *Journal of Transportation Engineering*, 122, 5, pp. 350-357.
- Barredo, J. I. (1996): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid. Ra-ma.
- Bosque Sendra, J. (1992): *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, Ediciones Rialp.
- Boulmakoul, A., Laurini, R., Servigne, S., Idrissi, M. A. J. (1999): "First specifications of a telegeomonitoring system for the transportation of hazardous materials", *Computers, Environment and Urban Systems*, 23, pp. 259-270.
- Brainard, J., Lovett, A., Parfitt, J. (1996): "Assesing hazardous waste transport risks using a GIS", *International Journal of GIS*, 10, 7, pp. 831-849.
- Celada, F. (1991): "Relaciones empresariales en la industria del Corredor", *Economía y Sociedad*, 5, Marzo, pp. 131-156.
- COPLACO (1974): *Estudio subregional del Corredor Madrid-Guadalajara*, Madrid, Safer, dos volúmenes.
- Daskin, M. S. (1995): *Network and Discrete Location. Models, Algorithms and Applications*. New York, John Wiley & sons, Inc.
- Díaz Muñoz, M. A. y Galve Martín, A. (1993): "Reestructuración productiva y mercado laboral en el Corredor del Henares", *Economía y Sociedad*, 9, Diciembre, pp.135-152.
- Dunn, C., Newton, D. (1992): "Optimal routes in GIS and emergency planning applications", *Area*, 24(3), pp. 259-267.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (1997): *Network Analysis*, ESRI, Inc., Redlands, CA, USA.

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

Glickman, T.S y Sontag, M.A. (1995): "The tradeoffs associated with rerouting highway shipments of hazardous materials to minimize risk", *Risk Analysis*, Vol.15, No.1, pp.61-67.

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (1999): "Posibilidades y limitaciones del cálculo de caminos mínimos en IDRISI. Cálculo de rutas óptimas para el traslado de residuos tóxicos y peligrosos en el Corredor del Henares", *II Reunión de Usuarios de IDRISI*, Girona, 2 de julio de 1999.

Gómez Delgado, M., Rodríguez Espinosa, V.M. y Vela Gayo, A. (1995): "Los residuos tóxicos y peligrosos en la Comunidad de Madrid. Una aproximación a su distribución geográfica a través de las declaraciones anuales de productores", *Serie Geográfica* No.5, pp. 145-171.

Gómez Mendoza, J. (1977): *Agricultura y expansión urbana. La campiña del Bajo Henares en la aglomeración de Madrid*. Madrid, Alianza Universidad.

Gopalan, R.; Kolluri, K.; Batta, R. y Karwan, M. (1990): " Modeling equity of risk in the transportation of hazardous materials", *Operations Research*, Vol.38, No.6, pp. 961-973.

Leguina, J. (1988): "Evolución sectorial del empleo en la CAM: una aplicación del análisis de los desplazamientos", *Economía y Sociedad*, No.1, Diciembre, pp. 8-24.

Lepofsky, M.; Abkowitz, M. Y Cheng, P. (1993): "Transportation hazard analysis in integrated GIS environment", *Journal of Transportation Engineering*, Vol.119, No.2, pp. 239-254.

Zografos, K. y Davis, CH. (1989): "Multi-objective programming approach for routing hazardous materials", *Journal of Transportation Engineering*, Vol.115, No.6, pp. 661-673.

## TABLAS

**Tabla 1. Establecimientos industriales y empleados por subsectores de actividad (Madrid año 1994 y Guadalajara año 1996)**

	CORREDOR	
	Nºempresas	Nºempleados
Industrias extractivas	31	306
Alimentación y bebidas	408	3.784
Textil y de la confección	99	2.020
Madera y corcho	167	914
Papel, edición y artes gráficas	397	4.809
Química	133	4.810
Transformación del caucho y materias plásticas	203	3.121
Producción de minerales no metálicos (vidrio, cerámica, cemento, cal y yeso)	218	6.680
Metalurgia y fabric. de productos metálicos	990	9.740
Construcción de maquinaria y equipo mecánico	315	6.967
Material y equipo eléctrico, electrónico y óptico	239	7.751
Fabricación material de transporte	73	2.513
Fabricación de muebles y otros	420	3.464
Construcción	1.281	10.068

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

Venta y reparación de vehículos	967	4.559
Servicios a las empresas	134	1.251
Otros	100	985
<b>TOTAL</b>	<b>6.175</b>	<b>73.742</b>

Fte. MINER y elaboración propia

**Tabla 2. Comparación de la media y desviación típica de cada variable para los cálculos de mínima distancia y mínimo riesgo**

	Rutas de mínima distancia		Rutas de mínimo riesgo	
	Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
<i>Distancia (m)</i>	20.396,47	10.717,75	44.892,58	30.006,68
<i>Población en riesgo</i>	42.993,63	32.497,80	11.992,50	17.512,21
<i>Volumen de tráfico (IMD)</i>	240.866,18	212.025,67	70.432,27	57.364,89
<i>Accidentes</i>	14,45	7,46	8,80	5,95
<i>Riesgo total</i>	111,73	76,20	42,46	23,81

**Tabla 3. Resultados de distancias (en metros) de los cálculos realizados para los distintos tipos de rutas**

Rutas	Mínima Distancia (D)	Mínimo Riesgo (R)	Óptima (API)
1. Fuente el Saz – Valdebebas	17.382,03	=	=
2. Fuente el Saz – Depósito	26.626,22	76.112,21	D
3. Valdeolmos – Valdebebas	18.551,35	41.757,53	D
4. Valdeolmos – Depósito	26.461,65	75.758,80	D
5. Algete – Valdebebas	13.883,09	=	=
6. Algete – Depósito	21.793,39	81.745,18	D
7. Paracuellos – Valdebebas	1.102,46	=	=
8. Paracuellos – Depósito	22.060,39	93.147,23	D
9. Ajalvir – Valdebebas	7.534,91	=	=
10. Ajalvir – Depósito	13.423	80.890,45	D
11. Daganzo – Valdebebas	10.119,41	=	=
12. Daganzo – Depósito	16.007,51	78.305,95	D
13. Camarma – Valdebebas	23.821,94	45.571,79	D
14. Camarma – Depósito	19.537,98	42.853,56	D
15. Meco – Valdebebas	27.080,37	50.678,20	D
16. Meco – Depósito	22.796,40	37.747,16	36.774,91
17. Coslada – Valdebebas	13.270,20	19.233,16	R
18. Coslada – Depósito	10.695,12	15.147,12	R
19. San Fernando – Valdebebas	15.075,04	17.428,32	R
20. San Fernando – Depósito	8.890,28	90.783,86	D
21. Torrejón – Valdebebas	15.926,96	=	=
22. Torrejón – Depósito	5.030,97	=	=



Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

23. Alcalá – Valdebebas	21.493,32	=	=
24. Alcalá – Depósito	14.044,83	18.599,77	17.627,52
25. Mejorada – Valdebebas	23.895,47	101.966,30	28.464,59
26. Mejorada – Depósito	7.506,67	15.956,83	D
27. Azuqueca – Valdebebas	31.738,29	47.591,23	33.536,10
28. Azuqueca – Depósito	27.454,33	37.876,14	36.903,89
29. Cabanillas – Valdebebas	43.995,66	=	=
30. Cabanillas – Depósito	40.923,35	64.238,93	51.646,59
31. Guadalajara – Valdebebas	44.143,47	49.375,16	D
32. Guadalajara – Depósito	39.859,50	73.796,02	49.309,07
33 Valdebebas – Depósito	20.957,90	88.425,40	D

Notas: 1. Las rutas sombreadas en la primera columna, corresponden a las 10 rutas más largas, mientras que las sombreadas en la segunda y tercera columna corresponden a los casos en los que se produce una mayor diferencia, en distancia, entre la ruta más corta y la menos peligrosa. 2. El signo "=", significa que los resultados fueron iguales a los que aparecen en la primera columna.

## FIGURAS

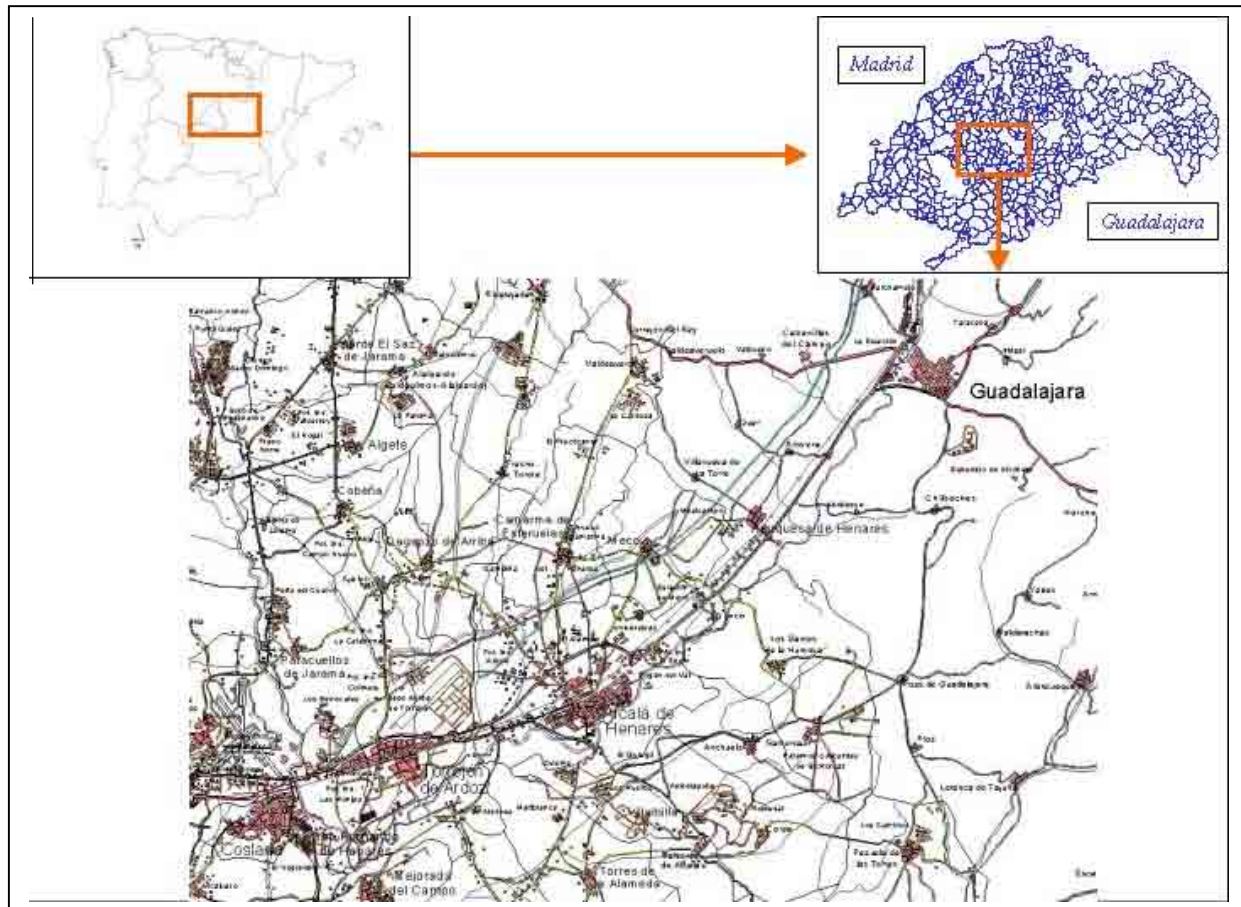
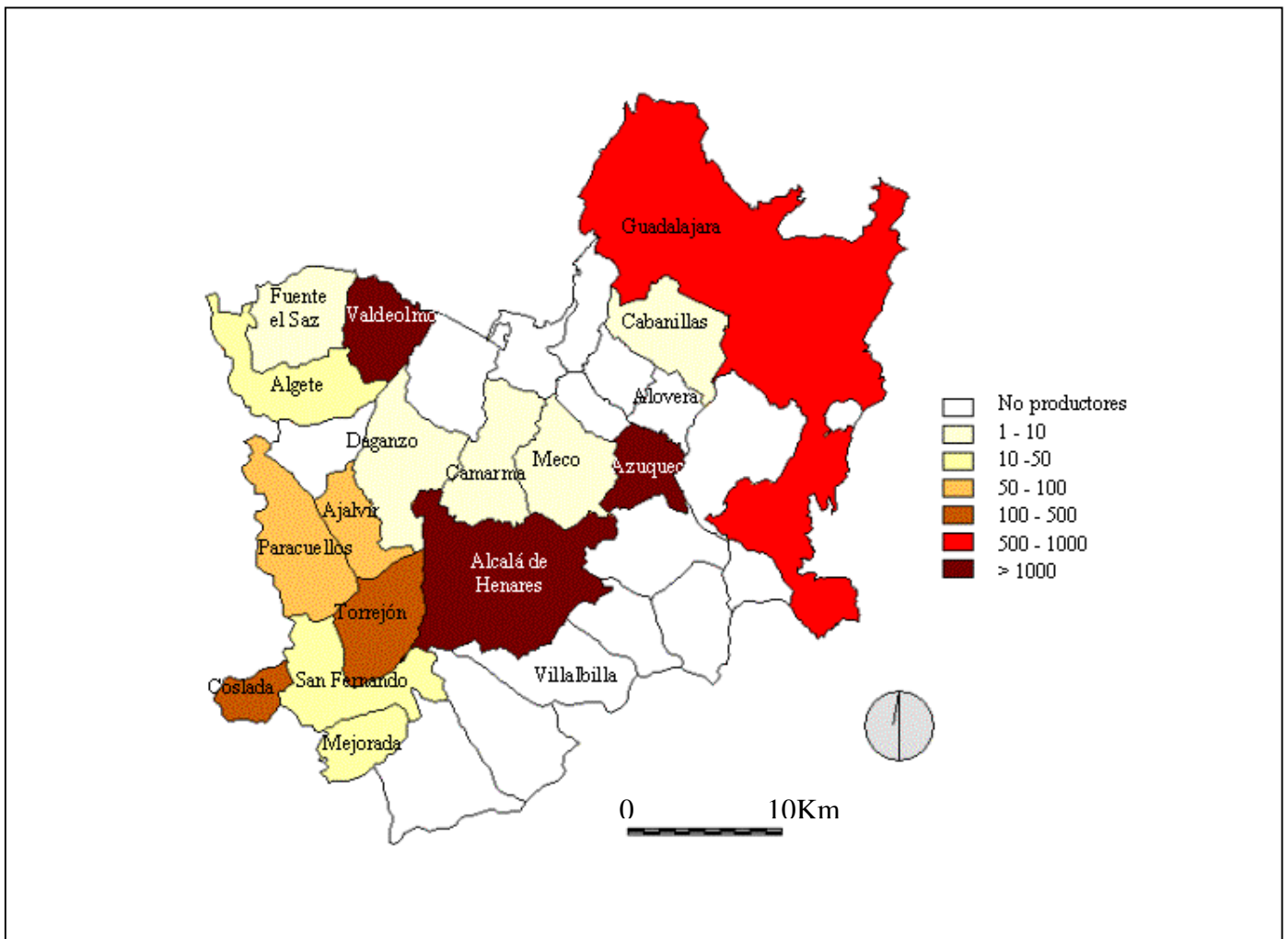


Figura 1. Localización del área de estudio

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

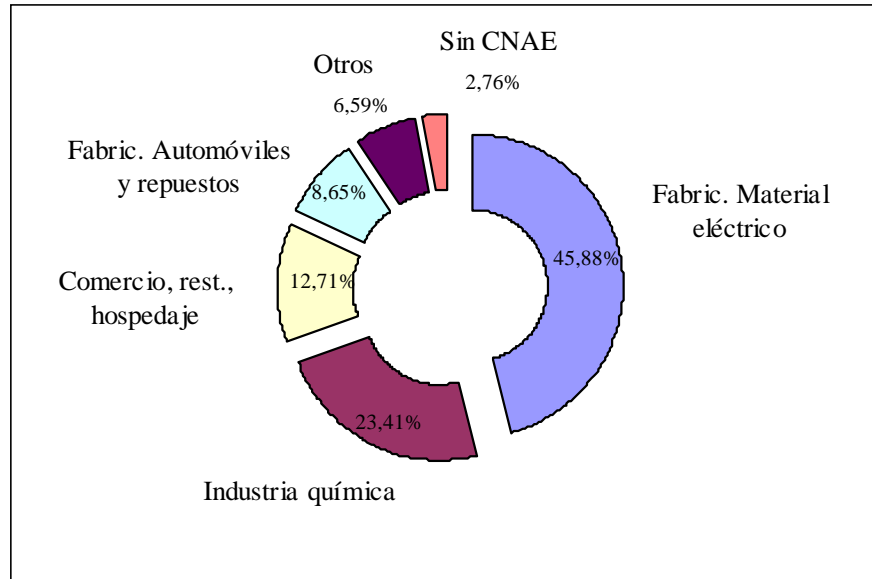


**Figura 2. Producción de RTP (TM) en el Corredor del Henares (1993)**

Fuente: Agencia de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid (1993) y elaboración propia

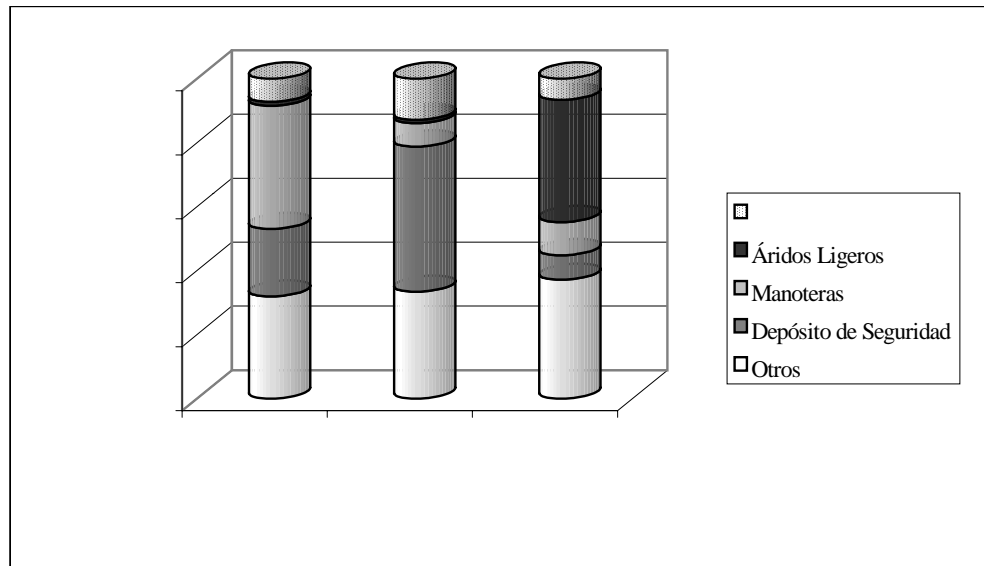


Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75



**Figura 3. Producción de RTP por sector de actividad**

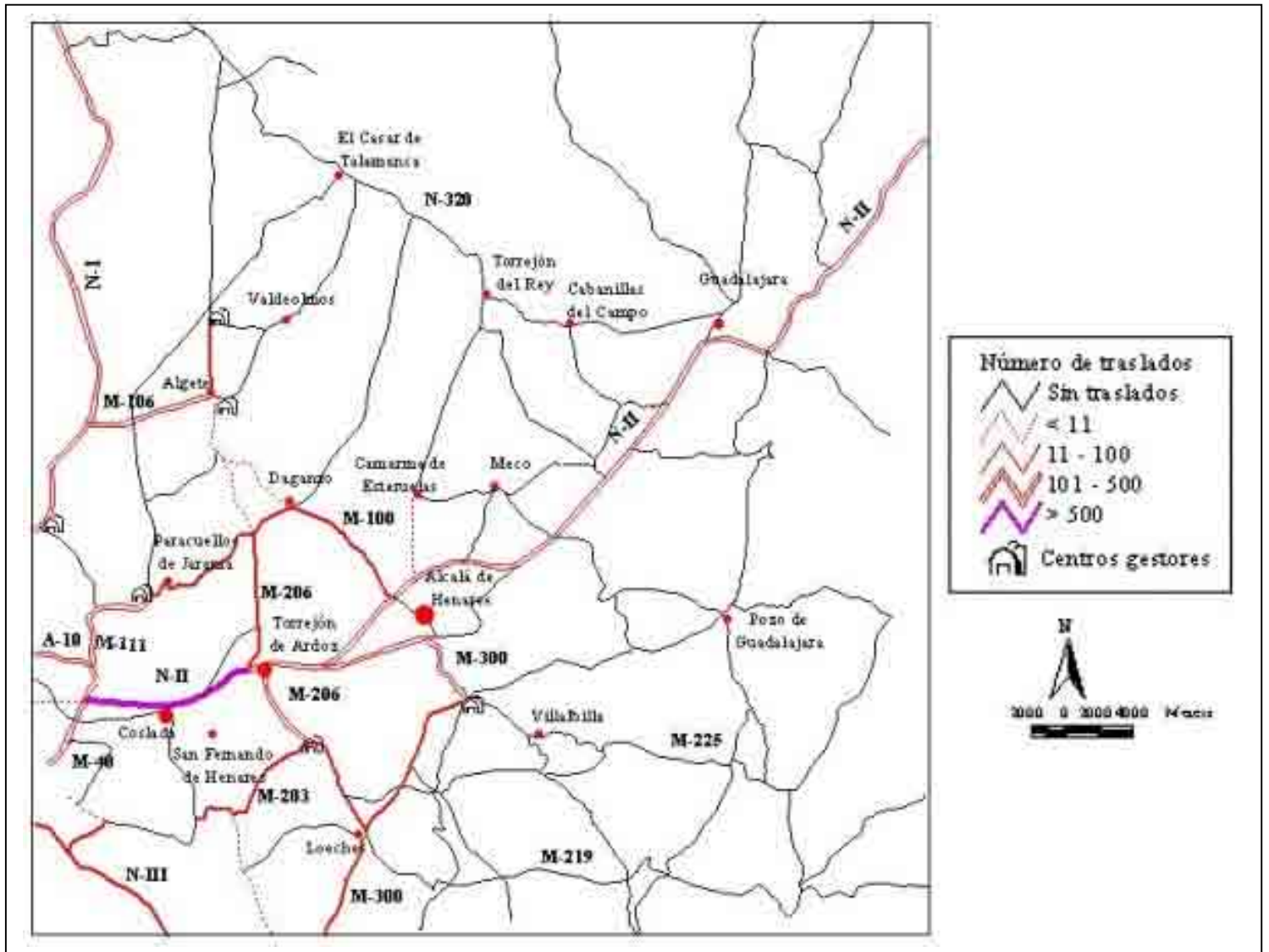
Fuente: Agencia de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid (1993) y elaboración propia



**Figura 4. Porcentaje de traslados con destino a los principales centros gestores de la Comunidad de Madrid**

Fuente: Agencia de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid (1993) y elaboración propia

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75



**Figura 5. Traslados de RTP en el Corredor del Henares (1993)**

Fuente: Agencia de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid (1993) y elaboración propia

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

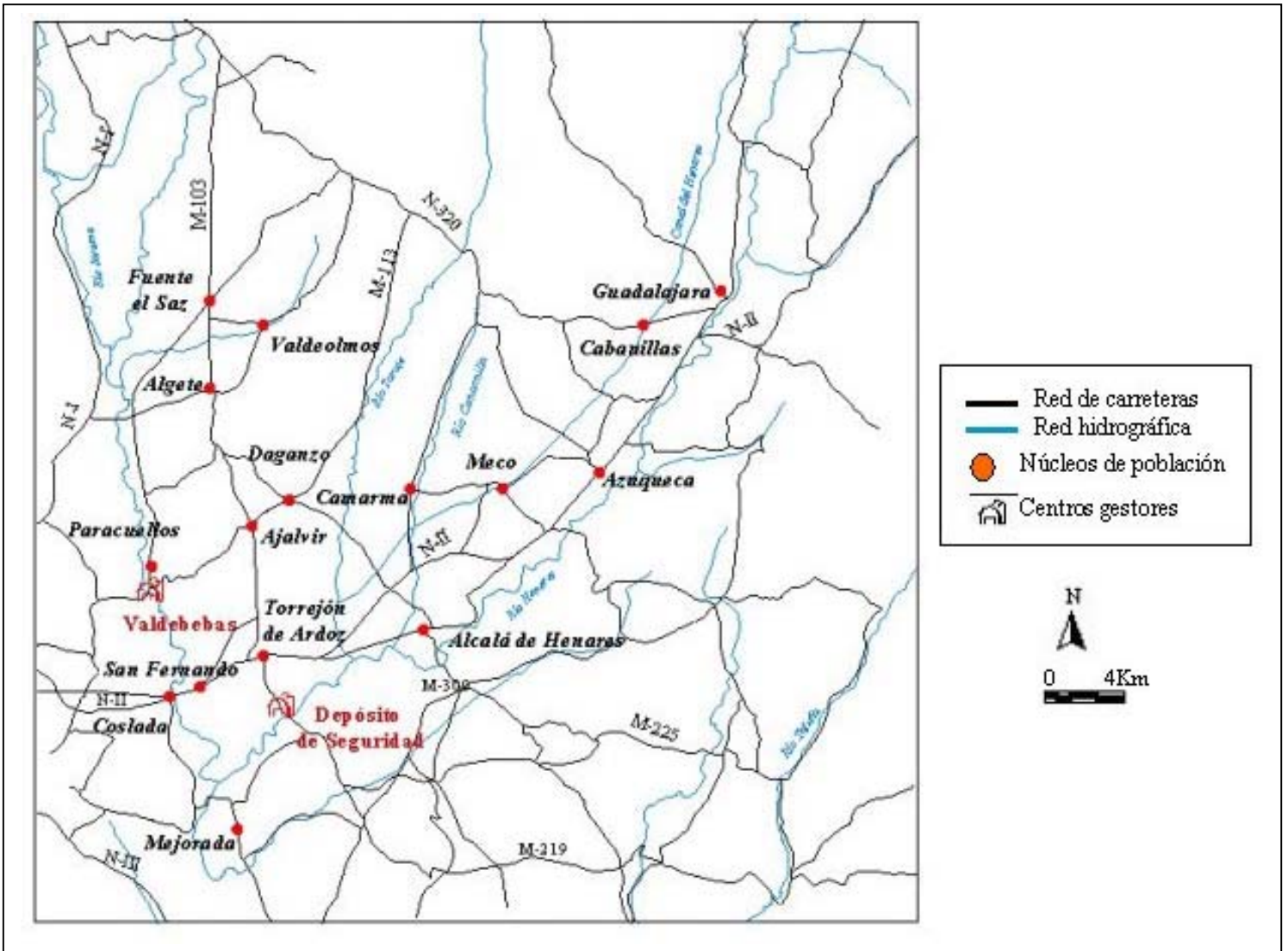


Figura 6. Localización de los puntos de origen (centros productores) y destino (centros gestores) de las distintas rutas calculadas

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

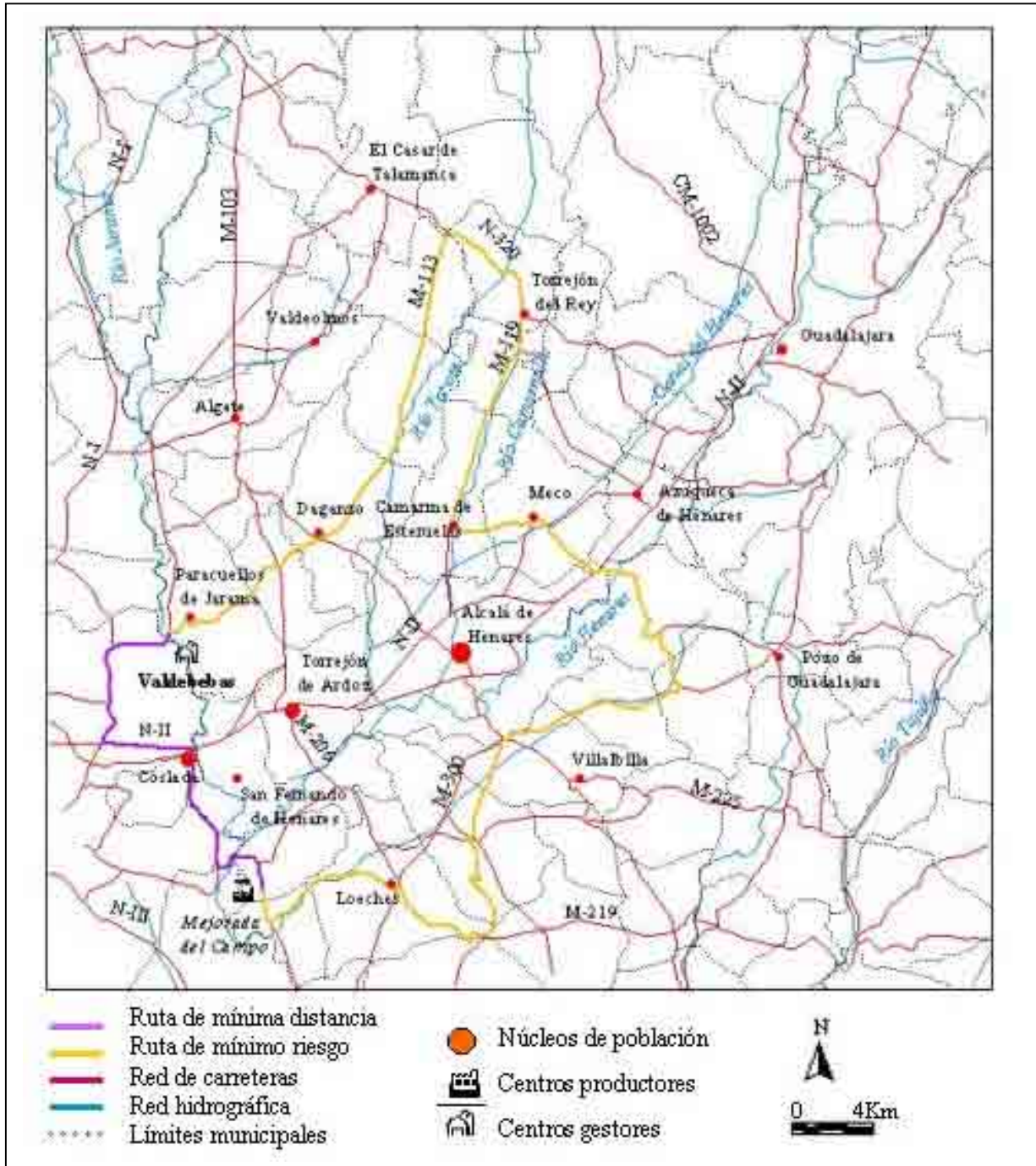
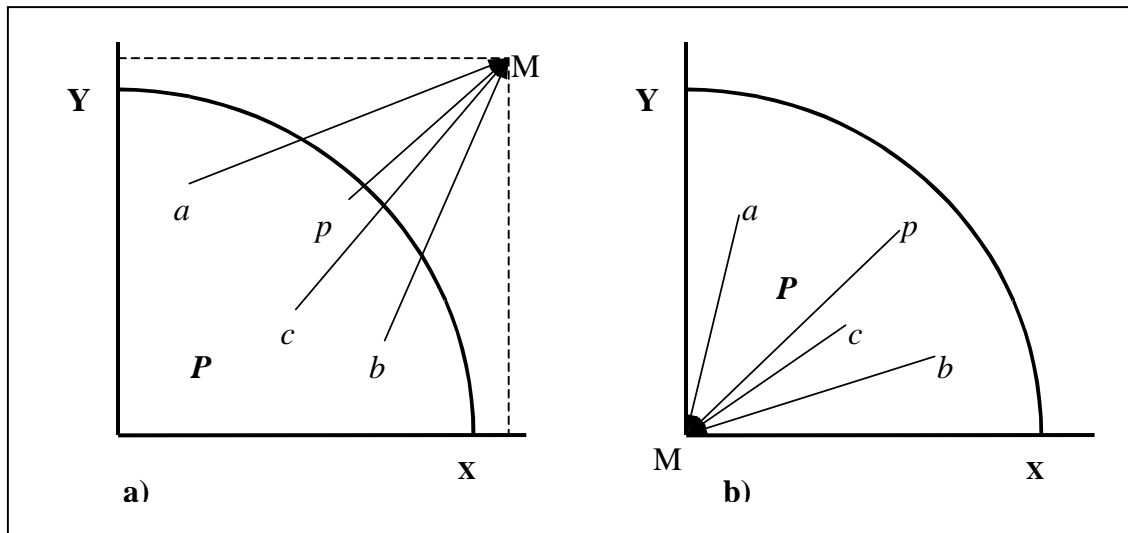


Figura 7. Ruta de mínima distancia y mínimo riesgo entre Mejorada del Campo y la planta de tratamiento físico-químico de Valdebebas

Fuente: elaboración propia

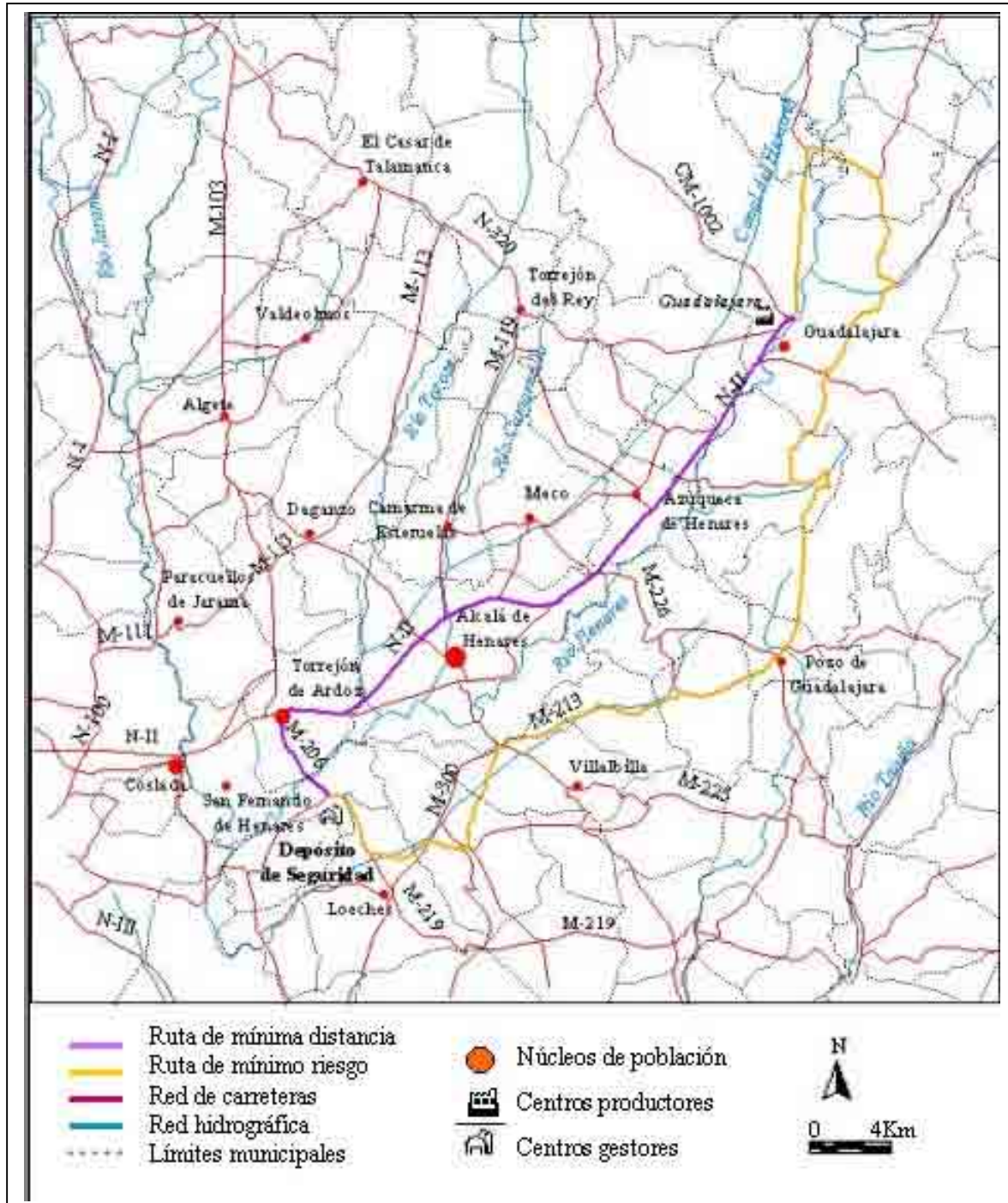


Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75



**Figura 8. Análisis de punto ideal (API) maximizando (a) y minimizando (b) las distancias entre las distintas alternativas. Adaptado de Barredo (1996).**

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75



**Figura 9a. Ruta de mínima distancia y ruta de mínimo riesgo entre Guadalajara y el Depósito de Seguridad**

Fuente: elaboración propia



Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): "Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 1, p. 49-75

