

Diseño de carreteras mediante un sistema de información geográfica: costes de construcción y costes ambientales

Montserrat GÓMEZ
Víctor M. RODRÍGUEZ
Ana E. RODRÍGUEZ
José CHUVIECO
Emilio CHUVIECO

Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares.

RESUMEN: Se presenta en este trabajo un ejercicio didáctico para el empleo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el diseño de carreteras. Se han considerado dos escenarios: a partir de costes de construcción, incluyendo la topografía, litología, hidrografía y red vial previa, y a partir de costes ambientales, ofreciendo tanto una valoración de las rutas previamente diseñadas, como la creación de una nueva superficie de costes. En ambos casos, se ejemplifica la creación de las superficies de coste y el trazado automático de la ruta más idónea en el entorno de un SIG de bajo coste, eligiendo como área piloto la hoja núm. 509 del Mapa Topográfico Nacional, correspondiente a Torrelaguna.

1. LOS SIG EN LA PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

La interdependencia entre los distintos factores que conforman el territorio implica considerar la planificación bajo una perspectiva global. Cualquier actuación sobre el medio físico conlleva el análisis minucioso de sus diversos componentes: suelos, sustrato geológico, vegetación, características climáticas, etc., así como de la acción humana sobre ese espacio, tanto desde el punto de vista productivo, como recreativo.

Para abordar esta óptica global es preciso acudir a herramientas metodológicas que permitan manipular múltiples variables, en sus complejas relaciones geográficas (o si prefiere territoriales), mostrando a la vez la plasmación espacial de tales relaciones. La

síntesis de este vasto elenco de conocimientos garantiza un entendimiento atinado del territorio y, en consecuencia, su adecuada ordenación.

Hasta el momento presente el problema ha sido poder abordar, en la práctica, este enfoque globalizador. Pese a las múltiples metodologías de análisis territorial que se han planteado (regiones homogéneas, funcionales, sistémicas), ninguna parecía ofrecer un procedimiento objetivo de evaluación. Parte del problema, a nuestro juicio, era más instrumental que conceptual, puesto que no contábamos con las tecnologías apropiadas para procesar, en un contexto geográfico, esa multiplicidad de variables. La disponibilidad actual de tales herramientas –caso de la teledetección, los sistemas de información geográfica (SIG), las plataformas de recolección automática de datos (RAD), los sistemas de posicionamiento global por

satélite (GPS), etc.-, nos permite ahora acercarnos a ese ideal de la planificación integrada.

Como es bien conocido, los SIG pueden definirse como programas informáticos que permiten gestionar información geográfica (BURROUGH, 1986; STAR y ESTES, 1990; MAGUIRE *et al.*, 1991; BOSQUE, 1992; CEBRIÁN, 1994). El término gestión incluye las fases de la entrada y depuración de datos en el sistema, la recuperación inteligente de la información, el análisis cruzado entre variables y su representación gráfica. Característica común a los datos almacenados en un SIG es su referenciación geográfica, ya se trate de mapas, estadísticas o variables climáticas sobre un espacio concreto, por lo que todos estos datos pueden relacionarse mutuamente de formas muy diversas.

Un SIG está compuesto por unos equipos físicos, especializados en el manejo de información gráfica (digitizadores, scanners, trazadores, impresoras, filmadoras...), y una serie de programas que, conectados con aquellos, permiten realizar diversas transformaciones a partir de las variables introducidas al sistema. El SIG no es un producto cerrado en sí, sino un compuesto de elementos diversos orientado hacia una finalidad específica. También existen SIG comerciales que intentan recoger todos estos productos bajo una misma estructura, si bien lo más habitual -en el momento presente- sea la comercialización exclusiva de los programas, que pueden adaptarse a configuraciones *hardware* muy amplias.

En consecuencia, un SIG proporciona un almacenamiento coherente de la información espacial, que puede ser actualizada o manipulada con el mínimo esfuerzo. Permite obtener modelos cartográficos, a partir de la transformación o combinación de diversas variables: señalar corredores de una determinada distancia a un río o carretera; realizar tablas de coincidencia entre dos o más mapas; calcular pendientes, exposiciones o medidas de textura; superponer dos o más capas de información, etc. Asimismo, facilita la presentación gráfica de los resultados, al permitir el acceso a diversos periféricos controlados por ordenador. Por último, un SIG puede emplearse como instrumento de

simulación, «... como campo de pruebas para el estudio de los procesos ambientales o el análisis de los impactos causados por decisiones de planeamiento» (BURROUGH, 1986). En otras palabras, gracias al empleo de estos sistemas pueden simularse las consecuencias de ésta o aquella decisión, antes de que un error de previsión haya modificado irreversiblemente el paisaje mismo.

Gracias a los SIG podemos disponer de bases de datos coherentes, georeferenciadas, con un mismo sistema de proyección, escala y nivel de desagregación. Bajo esa óptica, los SIG se consideran como herramienta imprescindible para una moderna planificación del territorio, y como soporte de numerosos proyectos de desarrollo regional (ARONOFF, 1989; BELWARD y VALENZUELA, 1991). Evidentemente, los SIG no proporcionan por sí nueva información: la adquisición de datos sigue siendo el punto clave de cualquier proyecto (hasta el 70% de la inversión, en la experiencia del Servicio Forestal estadounidense: Lachowski *et al.*, 1992). Ahora bien, gracias a estos sistemas, tales datos pueden integrarse apropiadamente, siempre en un contexto espacial, coordinando lo que de otro modo serían sólo variables de interés parcial. En consecuencia, los SIG permiten abordar modelos sintéticos de análisis, que imbriquen distintas variables de cara a la evaluación global de un fenómeno: erosión del suelo, aptitud de la tierra, riesgo de incendio, etc. Asimismo, pueden servir como marcos idóneos para la explicación de determinados procesos, ya que tanto la variable medida (por ejemplo, abandono de tierras o deforestación), como los posibles factores (fertilidad del suelo, accesibilidad...), pueden cruzarse para el conjunto del territorio.

2. OBJETIVOS

El presente artículo tiene por objeto ofrecer algunas sugerencias sobre el empleo de los SIG en la fase de anteproyecto del trazado de infraestructuras. Para ello, presentamos un ejercicio didáctico de simulación, centrado en la hoja núm. 509 del Mapa Topográfico

Nacional correspondiente a Torrelaguna (fig. 1). Sobre este sector, se planteó diseñar el itinerario óptimo para construir una carretera que uniera los núcleos de Colmenar Viejo y Venturada. Puesto que nuestro objetivo era más metodológico que operativo, hemos planteado un problema ficticio, sobre una base de datos de escala regional (1:200.000). Aunque se trata de un modelo simplificado, que en modo alguno pretende solucionar un diseño real de carreteras -lo cual requeriría una escala de trabajo y un modelo de análisis mucho más refinado-, el ejercicio se ha desarrollado sobre datos reales, con objeto de contrastar más adecuadamente la idoneidad del método propuesto.

3. DISEÑO DE LA BASE DE DATOS

Para abordar este ensayo, se han considerado las siguientes variables cartográficas: vegetación y usos del suelo, carreteras, hidrografía, curvas de nivel, litología, aptitud del suelo para el cultivo y núcleos habitados. Todas ellas se han digitizado en coordenadas UTM, tomando como base la cartografía del Servicio Geográfico del Ejército a escala 1:200.000. Somos conscientes de que esta escala no resulta muy apropiada para el objetivo propuesto, ya que el diseño de una carretera implica estudios de mucho más detalle. No obstante, puede resultar adecuada para un

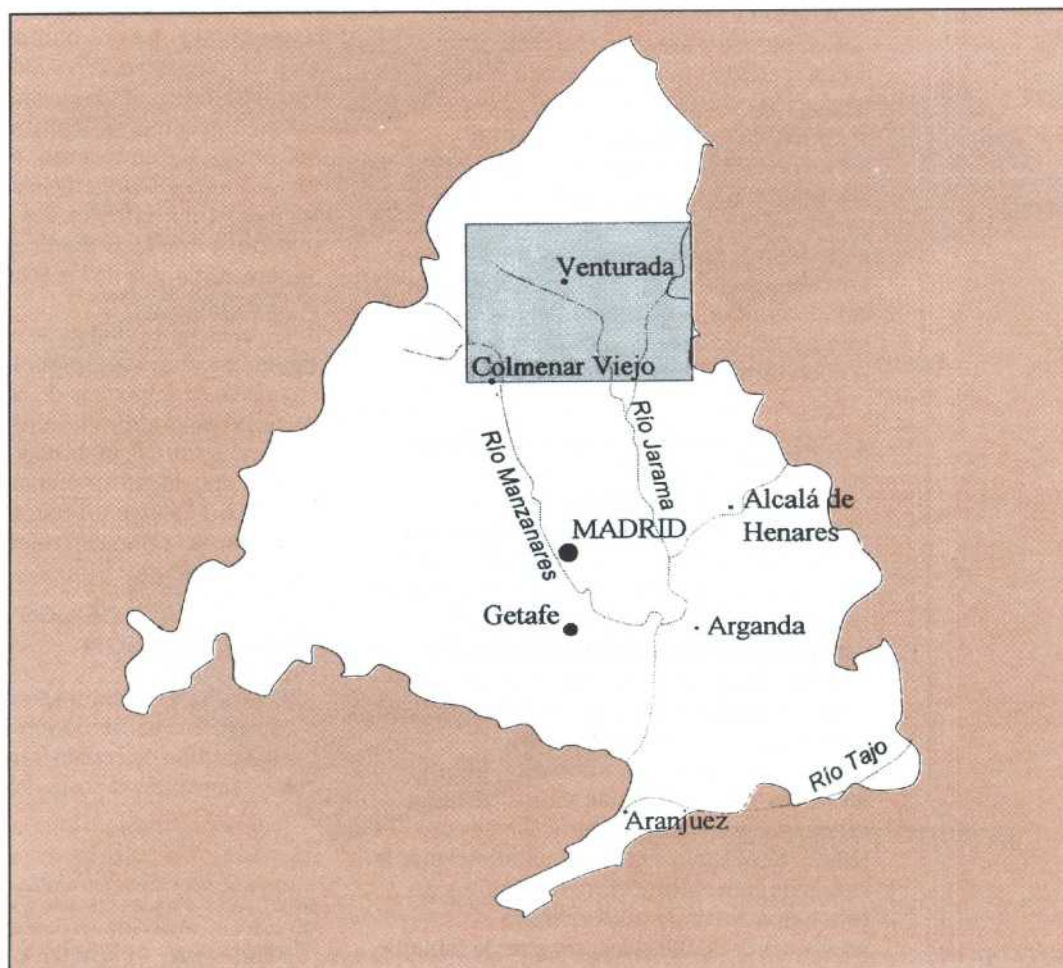


FIGURA 1. Localización de la zona de estudio

anteproyecto regional. Por otra parte, a esta escala se cuenta con la información temática más completa para el territorio de la CAM.

Puesto que el diseño de la carretera implicaba abordar diversas operaciones de análisis espacial (distancias, superposiciones, fricción, cuencas visuales), hemos optado por trabajar con un SIG teselar o raster, más apropiado para este tipo de operaciones (BURROUGH, 1986; BOSQUE, 1992; COMAS y RUIZ, 1993). El programa elegido se denomina IDRISI (versión 4.1.: EASTMAN *et al.*, 1994), que incorpora múltiples herramientas para la manipulación de mapas, en un entorno muy amigable y a un coste prácticamente simbólico.

El proceso de introducir las variables cartográficas se inició mediante digitización semiautomática por tablero. Tras la depuración de errores, los límites de las líneas, puntos y áreas se rasterizaron en capas temáticas individuales con una resolución común de 100×100 m (tamaño de la celdilla= 1 ha). En algunos casos se procedió a un registro geométrico más depurado para garantizar que ajustaran perfectamente entre sí. Esto es especialmente importante en aquellos mapas que incluyen áreas temáticas comunes, como es el caso de la hidrografía y la cobertura del suelo (comparten embalses), y los núcleos urbanos y la cobertura del suelo (comparten núcleos).

4. PLANTEAMIENTO DEL MODELO

En un SIG el trazado de rutas óptimas puede abordarse en un doble escenario (fig. 2): (a) elección del itinerario más conveniente entre dos puntos a partir una red ya establecida, y (b) creación de un nuevo camino partiendo de una superficie de costes.

En el primer caso, se cuenta ya con las conexiones entre los distintos puntos, así como con la información temática correspondiente a cada uno de los arcos que forman la red (volumen de tráfico, anchura, estado del firme: Cfr. GÓMEZ y GUTIÉRREZ, (1993). El objetivo, entonces, es seleccionar la ruta más conveniente entre dos puntos de esta red, a partir de unos criterios previamente establecidos (recorrer la mínima distancia, seleccionar el tramo más fluido, evitar ciertos nodos, etc.).

En la segunda situación, cuando no se cuenta con una red previa, se trata de diseñar el trazado completo de la carretera que una dos o más puntos en una malla regular, considerando unos costes de desplazamiento entre todos los puntos que forman dicha malla. El trazado más conveniente será aquel que minimice los costes, bien sean éstos de construcción o ambientales (reducción del impacto entre ambos puntos). Tales costes se calculan a partir de unos criterios, que deben definirse en términos espaciales e incorporarse al SIG (1).

En consecuencia, este segundo enfoque, que corresponde a los objetivos de nuestro trabajo, implica abordar dos fases (fig. 2). En la primera, debe definirse una *superficie de costes*, esto es, una variable que represente la distribución espacial de la resistencia al movimiento entre dos puntos cualesquiera del mapa. Tal resistencia se mide, habitualmente, en costes asociados a la construcción, pero también pueden considerarse otros costes: ambientales, expropiación, sociales, etc. Una vez obtenida esa superficie de coste, se diseña la ruta óptima entre los dos puntos que pretenden unirse mediante un algoritmo que minimice la suma de los costes de cada posible trazado.

En el ejemplo aquí presentado, respetamos esta división en dos fases, si bien en la obtención de superficie de costes distinguimos entre los asociados a la construcción, más objetivamente calculables, y los ambientales, que siempre implican una cierta subjetividad. La figura 3 incluye un esquema general de la metodología seguida en nuestro modelo.

5. CÁLCULO DE LOS COSTES DE CONSTRUCCIÓN

Para el cálculo del mapa de costes asociados a la construcción de la carretera hemos partido de considerar aquellos factores que incrementan el coste del trazado ideal

(1) En sentido estricto, este análisis no requiere contar con un SIG, puesto que podría definirse la malla geográfica como una matriz numérica codificada manualmente. Este es el caso del trabajo publicado por Mozón *et al.* (1990). El desarrollo conceptual se asimila al que aquí presentamos, aunque la falta de herramientas cartográficas limita su análisis espacial, poniéndose más énfasis en el modelo de optimización.

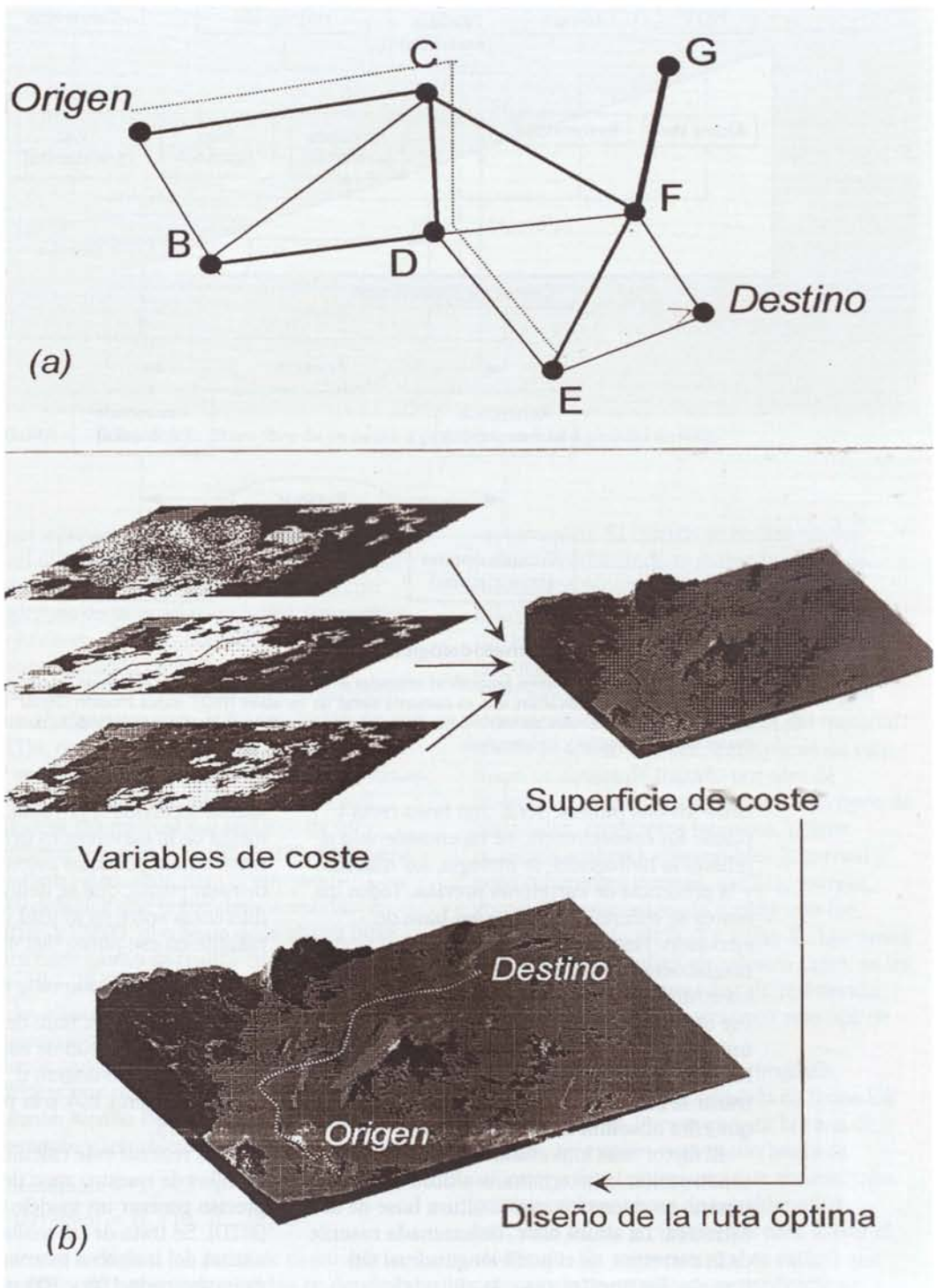


FIGURA 2. Alternativas para el diseño de rutas óptimas en un S.I.G.: (A) Selección de la ruta más conveniente a partir de una red establecida; (B) trazado a partir de una superficie de costes.

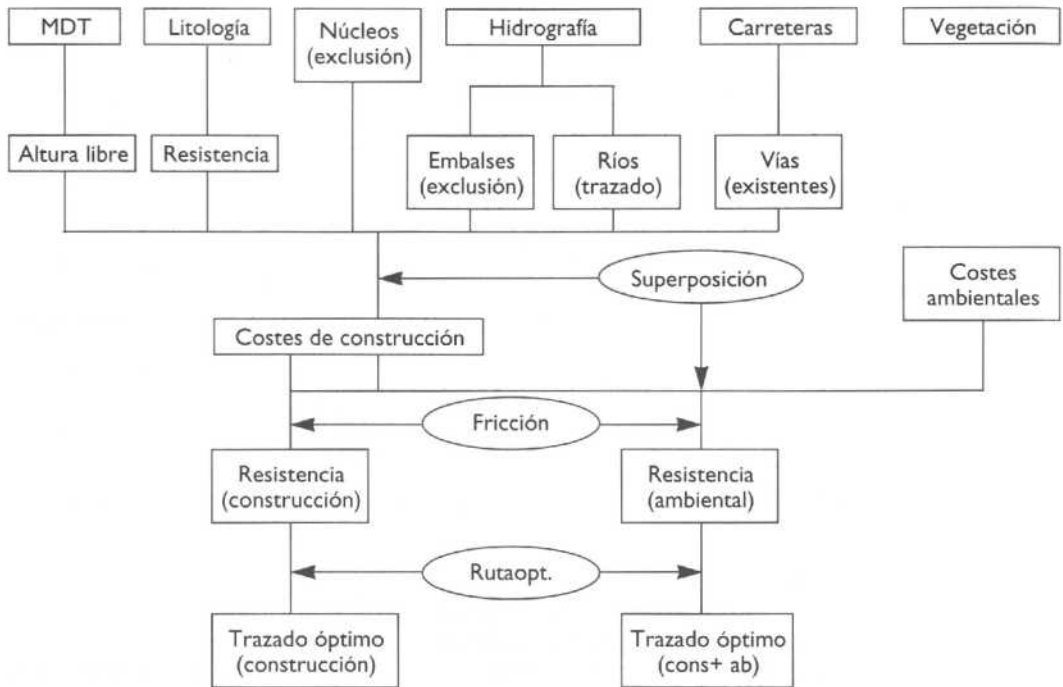


FIGURA 3. Esquema metodológico.

Los recuadros indican variables geográficas utilizadas en el trabajo, mientras las elipses las operaciones de análisis utilizadas. Se ha omitido la recodificación, que es común a todas las variables (MDT indica Modelo Digital del Terreno; Rutaopt, el algoritmo para trazar rutas de máxima pendiente en una superficie de costes; cons+ amb, la consideración conjunta de los costes de construcción y ambientales).

entre los dos puntos; sería una línea recta y plana. En consecuencia, se ha considerado el relieve, la hidrografía, la litología, los núcleos y la presencia de carreteras previas. Todos los costes se refieren a una unidad base de ejecución. Hemos evitado introducir magnitudes económicas absolutas puesto que los costes de mercado varían notablemente. Por otra parte, nuestro objetivo requiere únicamente saber cuáles son las áreas más baratas y caras de construcción, con objeto de trazar la ruta de mínimo coste, y no tanto a qué cifra absoluta asciende tal coste.

El factor más importante en los costes de construcción lo determina la altitud del terreno en referencia con la altura base de la carretera. La altura base, denominada rasante de la carretera, es el perfil longitudinal del trazado. En nuestro caso, la altitud de Colmenar Viejo (origen) es de 880 m, mientras Venturada (destino) está situado a 842 m. Teniendo en cuenta la distancia que separa

ambas localidades (18 Km), la pendiente media de la carretera es del 0,23%. A partir de estos datos, podemos calcular la altura libre de cada punto, que se define como la diferencia entre su altitud y la altitud de la rasante en ese punto (fig. 4):

$$H_{lb} = H_b - (H_o + d_{ob} p)$$

siendo H_{lb} la altura libre de un determinado punto b; H_b la altitud de ese punto; H_o la altitud del punto origen, d_{ob} la distancia entre el punto origen y b, y p la pendiente media de la carretera.

Para realizar este cálculo sobre todas las celdillas de nuestro zona de estudio era preciso generar un modelo topográfico digital (MTD). Se trata de un malla que ofrece la altitud del terreno a intervalos regulares, en este caso cada 100 x 100 metros, con la misma resolución de las otras variables que forman parte de nuestro estudio. El MTD puede generarse por métodos fotogramétricos

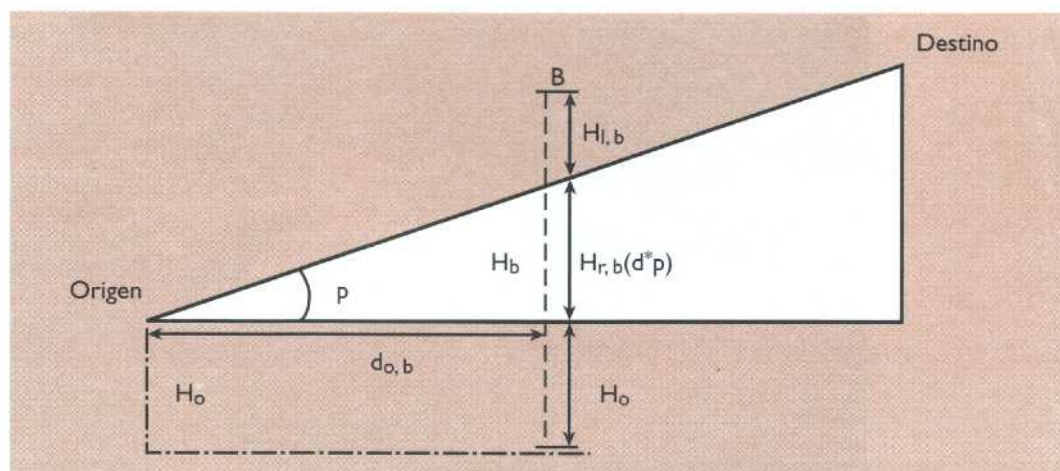


FIGURA 4. Cálculo de la altura libre de un punto a partir del modelo digital del terreno.

o por interpolación a partir de las curvas de nivel digitizadas. En nuestro caso, optamos por esta última alternativa, utilizando un algoritmo de interpolación lineal por perfiles incluido en el programa IDRISI. Con una buena densidad de curvas, hemos comprobado en otras ocasiones la fiabilidad de este algoritmo para la interpolación de MTDs, con errores inferiores a 30 m a partir de mapas a escala 1:50.000 (CHUVIECO y SALAS, 1993). Para este ejemplo, los errores son mayores (43 metros) por tratarse de una cartografía a menor escala (1:200.000), pero resultan adecuados para el objetivo metodológico que pretendemos aportar. A partir del MTD, el cálculo de la altura base para cada punto se realizó con los programas de manipulación aritmética del SIG IDRISI.

La altura base nos sirve para calcular los costes asociados al movimiento de tierras. Hemos asumido un coste unitario para celdillas que tuvieran la misma altura de la rasante, siendo los costes de cada celdilla en desmonte y terraplén:

$$\text{desmonte} = H_{i,b}/15, \text{ si } H_{i,b} > 0$$

$$\text{terraplen} = H_{i,b}/10, \text{ si } H_{i,b} < 0$$

Como es lógico, las áreas de desmonte se identificaron por aquellas celdas en donde la altura base fuera positiva (esto es, donde la altura del punto fuera superior a la rasante), mientras que, en caso contrario, se requeriría

un terraplén. El cálculo se realizó en dos pasos, recodificando el mapa de altura base a dos rangos (positivos y negativos), para aplicar los oportunos costes relativos, y volviendo a fundir los dos mapas una vez calculados los costes.

El movimiento de tierras tiene un coste claramente asociado a la dureza del material donde se opera. Por ello, multiplicamos este mapa de costes de trazado por otro de litología, en donde se distinguían tres tipos de materiales: compactos (granitos, neises, cuarcitas, calizas), disgregables (pizarras) y poco coherentes (arenas, arcillas, margas, yesos). El coste asignado a cada uno fue, respectivamente, de 5, 3 y 1 (fig. 5). Las áreas pantanosas (embalses en nuestro caso), se les dio también el máximo valor de resistencia, por la dificultad de construir en este tipo de terrenos.

En lo que se refiere a la hidrografía, consideramos un coste añadido en todos los cursos fluviales. Puesto que, en la zona de estudio, no existen cursos con anchura superior a 5 m, estimamos que no resultaba preciso realizar obras de consideración, bastando tubos prefabricados para salvar el obstáculo. En consecuencia, se estimó que cruzar uno de estos cauces implicaría un coste adicional de 1,5 unidades, aplicándose ese coeficiente a todas las celdillas que contaran con un curso fluvial.

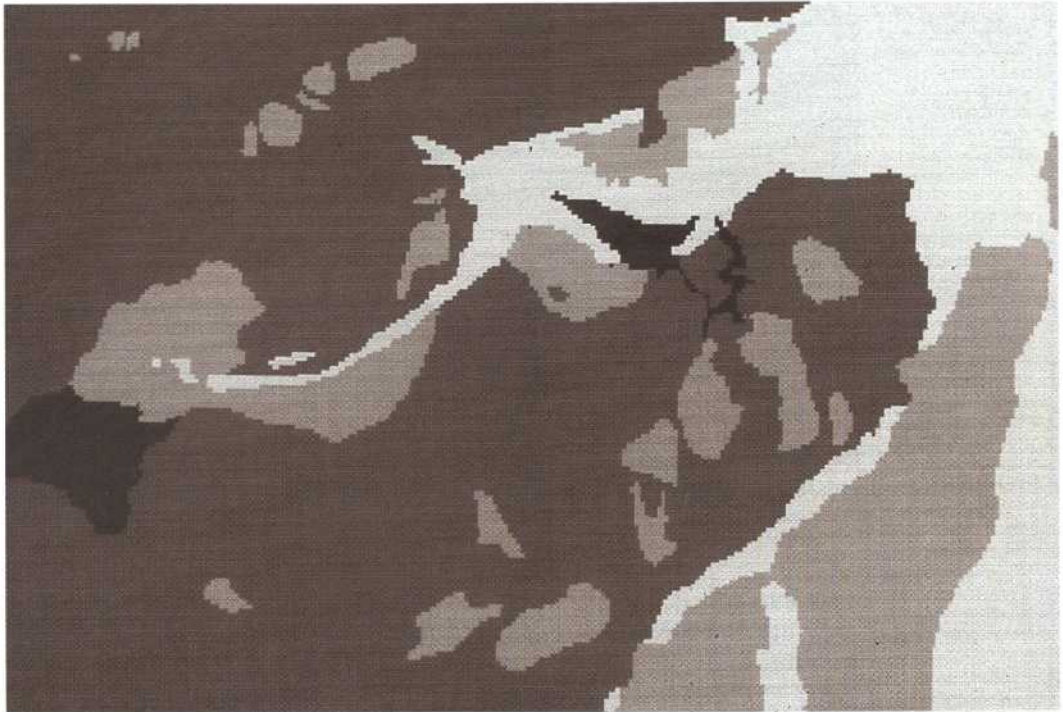


FIGURA 5. Tipo de litologías según su resistencia a la construcción. Los tonos más oscuros indican mayor resistencia litológica y, por tanto, un coste de construcción más elevado.

Finalmente, se consideró como circunstancia favorable la presencia de carreteras previas en el itinerario de la proyectada, estimándose una reducción del 50 % frente a las zonas que no dispusieran previamente de calzadas. Aplicamos este valor a todas las celdillas con carreteras asfaltadas, prescindiendo de las que contaban con pistas forestales.

En resumen, el mapa de costes finalmente obtenido incluye los siguientes componentes:

$$\text{Costes} = \text{Nivelación} * \text{Litología} * \text{Hidrografía} * \text{Carreteras}$$

puesto que cada celdilla, dentro del SIG, tiene valores en cada una de estas variables, puede obtenerse la distribución espacial de este índice de coste para toda la zona de estudio (fig. 6).

Para que pueda concluirse esta fase, previa al diseño del trazado óptimo, es preciso convertir esta superficie de coste en una superficie de fricción. Para ello, se indica un punto de origen, a partir del cual se calcula la fricción como la resistencia a desplazarse

desde ese punto al resto de las celdillas que forman el mapa, considerando como criterio de resistencia la superficie de costes antes generada. Antes de obtener la fricción, y para evitar que la carretera pase por lugares no deseados, en nuestro caso embalses y núcleos de población (áreas de exclusión), recodificamos el coste de las celdillas con estas cubiertas a un valor muy alto. En consecuencia, su fricción resulta excepcionalmente elevada, lo que implica que sean posteriormente rechazadas en el trazado de la ruta de menor coste.

Para el cálculo de la superficie de fricción se utilizó un algoritmo incluido en el programa IDRISI, que calcula la fricción de cada punto como la distancia que le separa, en la superficie de coste, del punto origen de la carretera. En este caso, no se trata de distancias euclidianas entre cada punto y el origen, sino de distancias medidas como el mínimo número de celdillas que tienen que ser atravesadas para llegar al origen. El resultado de este análisis puede concebirse



FIGURA 6. Costes de construcción. Los tonos más claros corresponden a menores costes, mientras los negros indican zonas de exclusión (embalses y núcleos)

como una superficie tridimensional, en donde la altura de cada punto de la malla geográfica es equivalente a su coste de desplazamiento respecto al origen, en función de su distancia y de los costes asociados a las celdillas que les separan (fig. 7a).

También puede calcularse la fricción tomando como referencia el punto que hemos marcado como destino (fig. 7b), con objeto de comparar posteriormente el trazado seleccionado con el que se diseñe desde el origen. Esta práctica permite estudiar la sensibilidad de la solución, a la vista de las alteraciones locales en la superficie de costes (OTERO y ALCAIDE, 1994).

6. TRAZADO DE LA RUTA ÓPTIMA

A partir de la superficie de fricción previamente generada, existen diversos criterios para señalar la ruta óptima entre los puntos de origen y destino. El más utilizado en el entorno de un SIG es el denominado de máxima pendiente.

Este tipo de algoritmos parten de un punto de destino, señalado por el usuario, y de la superficie de fricción calculada en el paso anterior. A partir de situar el punto de destino en dicha superficie, analiza una ventana de 3×3 valores, señalando la dirección que implique la máxima pendiente. En el paso siguiente, se desplaza esa ventana hacia la celdilla obtenida como solución anterior, volviendo a señalarse la de máxima pendiente en la nueva ventana de 3×3 celdillas. El proceso es iterativo hasta que se obtiene el punto de origen, puesto que es el valor que cuenta con la menor fricción. Esta estrategia imita el trazado de un río por su cuenca de drenaje, ya que el agua sigue siempre la línea de máxima pendiente desde las zonas más elevadas hasta el fondo del valle. En este caso, el relieve topográfico se convierte en un *relieve de costes*, y el trazado resultante minimiza el coste existente entre los puntos de origen y de destino.

Como es lógico, el trazado que obtiene el programa está directamente asociado a los



FIGURA 7A. Mapas de fricción obtenidos a partir de la superficie de costes: (a) cálculo desde Colmenar a Venturada. Los valores más altos de fricción corresponden a los tonos claros.



FIGURA 7B. Mapas de fricción obtenidos a partir de la superficie de costes: (B) cálculo desde Venturada a Colmenar. Los valores más altos de fricción corresponden a los tonos claros.

criterios empleados para definir la superficie de costes, por lo que la clave de la ruta óptima está más en cómo se definan tales criterios que en el algoritmo en sí. No obstante, la solución del problema requiere que la superficie defina bien las diferencias espaciales de costes, ya que si el coste local fuera el mismo (nula pendiente) el algoritmo no podría proceder. Por otra parte, los resultados que ofrece no son simétricos, obteniéndose distintas soluciones si se cambia el origen por el destino, tanto en la superficie de fricción como en el arranque del proceso.

Como vemos en la figura 8, esto es precisamente lo que ocurre en nuestro caso, en donde aparecen dos rutas óptimas bien diferenciables, según se inicie la carretera desde Colmenar (2) o desde Venturada (1). La ruta finalmente seleccionada será aquella que minimice los costes totales, lo que puede realizarse sumando los valores de coste de todas las celdillas que ambas atraviesan. Abordamos este objetivo con un comando del programa IDRISI, que nos permite calcular una serie de parámetros estadísticos de un

mapa a partir de categorías indicadas en otro. En nuestro caso, señalamos como mapas de entrada los de costes y rutas óptimas, obteniendo unas sumas de 449.808 unidades de coste cuando la carretera arranca de Colmenar (2) y de 188.504 unidades cuando arranca de Venturada (1). En consecuencia, esta última, con un coste global 2,38 veces inferior, es la solución más ventajosa del problema planteado.

7. CONSIDERACIÓN DEL FACTOR AMBIENTAL

Según la legislación española vigente (Real Decreto Ley 1302/86 y Reglamento de Aplicación R. D. 1131/86), y siguiendo las directrices comunitarias europeas, cualquier proyecto de ejecución o puesta en funcionamiento de una infraestructura debe ir acompañado de una evaluación de su impacto ambiental, en el que se barajen distintas alternativas con diferentes índices de impacto sobre el medio. Desgraciadamente, no siempre

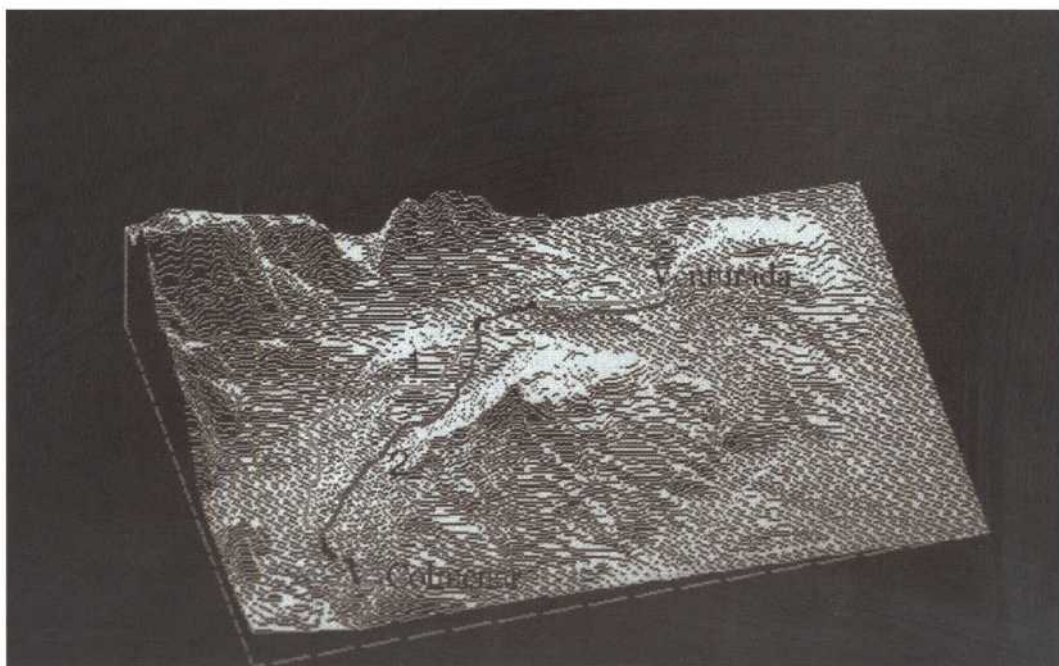


FIGURA 8. Alternativas para el trazado de la carretera (en rojo) representadas sobre el modelo digital del terreno. En color negro aparecen los tramos coincidentes. Ruta 2, de Colmenar a Venturada, y ruta 1 de Venturada a Colmenar.

se escogen aquellas alternativas que suponen una menor transformación ambiental, quedando este aspecto relegado a un segundo plano frente a otros intereses, fundamentalmente socio-económicos.

Por esta razón, estimamos que un diseño óptimo de cualquier infraestructura debe considerar, junto a los costes de construcción, los ambientales. El problema, claro está, es definir con rigor y objetividad estos costes, puesto que algunas de las variables que conforman lo que podemos llamar «calidad ambiental» son de difícil cuantificación.

En cualquier caso, el empleo de los SIG permite analizar, en un contexto espacial, dichos costes ambientales, ofreciendo una magnífica imagen sobre su diferenciación espacial.

Para el ejemplo concreto que nos ocupa, la inclusión de los costes ambientales resulta de especial interés, por cuanto las especiales características de una carretera (longitud, construcción por tramos, su recorrido por diferentes medios con características ambientales diversas, etc.) conllevan una compleja estratificación y ponderación de variables que, sin duda, se ven simplificadas y facilitadas por el empleo de los SIG (OTERO *et al.*, 1993; REBOLJ, 1993; STUART y PHILIP, 1993).

No obstante, a la hora de establecer funciones de coste ambiental, es necesario establecer una gradación o ponderación de las variables que entran a formar parte de las mismas. La tarea no es fácil, puesto que la actual normativa de evaluación del impacto ambiental no ofrece ninguna indicación que pueda servirnos para establecer la ponderación más adecuada de las variables (ARCE, 1992). Tampoco en la bibliografía revisada hemos hallado unos criterios de común aceptación que nos ayudaran a incorporar este concepto de coste ambiental a la superficie previamente generada de costes de construcción.

Puesto que aspectos comúnmente tratados en la consideración del coste ambiental, como es el caso de la litología, ya se habían incorporado a los costes de construcción, simplificamos nuestra valoración del medio restringiéndola a las variables visibilidad y cobertura de vegetación y usos del suelo. La valoración de la fauna hubiera resultado

mucho más compleja, pues no contábamos con información espacializada de suficiente calidad. Por otro lado, la vegetación es considerada como uno de los factores más importantes en la valoración ambiental. La exclusiva utilización de criterios botánicos queda justificada si consideramos la fuerte concordancia existente entre diversidad florística y faunística: las comunidades vegetales constituyen los elementos bióticos característicos (OTERO, 1993: 261).

Estas dos variables, visibilidad y vegetación, pueden servirnos como ejemplo para plantear las dos formas de introducir los costes ambientales en el trazado óptimo de infraestructuras. Por un lado, el factor ambiental puede utilizarse para decidir cuál de las rutas alternativas previamente diseñadas resulta más conveniente (menos «impactante»). Por otro, podría servir para generar un mapa de coste ambiental, que se añadiera a la generada únicamente considerando los costes de construcción.

Ilustramos la primera de estas modalidades (elección entre trazados ya diseñados a partir de que minimicen el coste ambiental) considerando la cuenca visual de las rutas obtenidas en el epígrafe anterior. La segunda posibilidad –considerar los costes ambientales como nueva capa a añadir a los costes de construcción– se ejemplifica con el caso de la cobertura vegetal.

7.1. Generación de una cuenca visual

Partiendo de las dos rutas óptimas obtenidas a partir de los costes de construcción, un posible criterio para optar por una u otra sería la consideración del impacto ambiental que ambas producen. Una forma de abordar este análisis sería calcular cuál de las dos se integra mejor en el paisaje, es decir, descubrir cuál de ellas resulta de mayor calidad visual.

Una forma de valorar esta integración sería obtener la cuenca visual de las rutas propuestas. La cuenca visual abarca todas las zonas visibles desde un punto o conjunto de puntos (CEOTMA, 1984: 393): en nuestro caso, los dos trazados seleccionados. La delimitación de las cuencas visuales se apoya en los rasgos fisiográficos del terreno y se

caracteriza por contener un conjunto de factores físicos y bióticos que perfectamente pueden servirnos para establecer un indicador aceptable en la evaluación de diferentes impactos. Por otra parte, la cuenca es un aspecto de gran importancia para evaluar el impacto visual y, junto con otros indicadores, estimar el paisajístico. No cabe duda de que el impacto visual es una de las afecciones más significativas que produce sobre el medio cualquier construcción de infraestructuras lineales y no lineales (ANDRÉS ORIVE *et al.*, 1991; DE PAZ *et al.*, 1990).

Para la obtención de la cuenca visual, hemos utilizado un programa incluido en el SIG IDRISI. A partir de cada una de las dos rutas óptimas previamente generadas, y sobre el modelo topográfico digital, el programa realiza una búsqueda progresiva de todas aquellas celdillas visibles a una cierta distancia y a una determinada altura (en nuestro caso escogimos, respectivamente, un radio de 3.000 metros y una altura de 0 metros, es decir, a nivel del terreno), desde un punto de vista dado. En nuestro caso, consideramos como punto de vista los centros de todas las celdillas por las que atravesaban

las dos rutas (el cálculo se realizó una vez para cada ruta). Como resultado, el programa proporciona el área observable desde cada una de las alternativas de trazado de la carretera. Lógicamente, la cuenca visual de menor extensión indicará la ruta menos visible de las dos y, por tanto, la que tiene un menor impacto visual, o si se prefiere una mayor integración, en el paisaje.

Para nuestro problema, la ruta más idónea es la trazada desde Venturada a Colmenar, que cuenta con una extensión de 11.729 hectáreas, frente a la que se trazó desde Colmenar a Venturada, que ofrece una extensión de 13.001 ha. En este caso, los costes ambientales coinciden con los de construcción, al resultar elegido el mismo trazado con ambos criterios. La figura 9 recoge la cuenca visual de la ruta Venturada-Colmenar, con las especificaciones antes indicadas.

7.2. Integración del coste ambiental en los costes de construcción

Como antes se indicó, otra posible forma de incluir el aspecto ambiental en el trazado

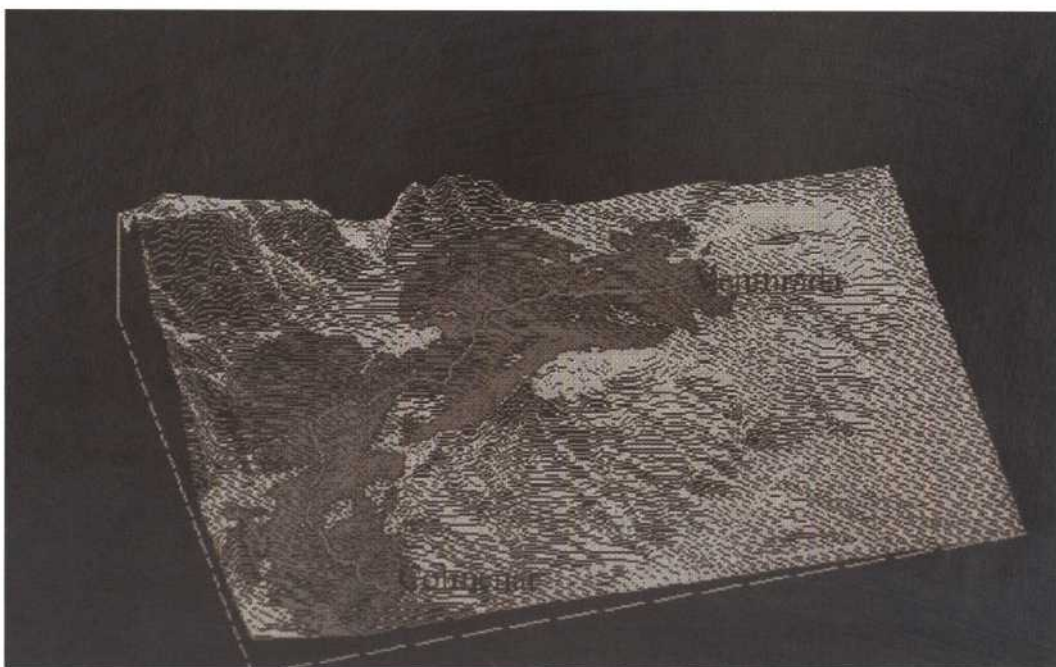


FIGURA 9. Cuenca visual generada a partir de la ruta I.

óptimo de infraestructuras sería generar una capa de costes ambientales, que se sumara a los de construcción previamente generados (MONZÓN *et al.*, 1990).

En nuestro caso, hemos simplificado este aspecto, considerando únicamente la vegetación y usos del suelo. A partir de la literatura revisada, hemos seleccionado los siguientes criterios de valoración:

1. Protección de especies vegetales autóctonas, en especial aquellas de porte arbóreo.
2. Preservación de formaciones de especial singularidad.
3. Protección de superficies vegetales, en función de lo que representan respecto al entorno o considerando su interés ecológico en el mismo.

A partir de estos criterios, se procedió a agrupar el mapa de formaciones vegetales de la CAM (Mapa de ocupación de usos del suelo de la CAM, escala: 1:200.000, hoja 509) correspondiente a nuestra zona de estudio, que había sido previamente digitizado e

introducido en nuestro SIG. Las distintas categorías recibieron una codificación de 1 a 5, de menor a mayor coste ambiental, según se recoge en la tabla 1. Las zonas de mayor

TABLA 1. Valoración ambiental de las diferentes formaciones vegetales

Vegetación y usos del suelo	Valor
Cultivos agrícolas de regadío	2
Cultivos agrícolas de secano	1
Dehesas	2
Mosaico de cultivos de secano y vegetación natural	1
Matorrales	1
Pastizales	1
Pinares (<i>pinus silvestris</i>)	2
Enebros y Sabinas	4
Encinares	4
Fresnedas	4
Vegetación de ribera	4



FIGURA 10. Calidad ambiental obtenida a partir de la tabla 1. Los tonos verdes más saturados indican alta calidad ambiental y los menos saturados baja calidad ambiental. En negro aparecen las zonas de exclusión (embalses y núcleos urbanos).

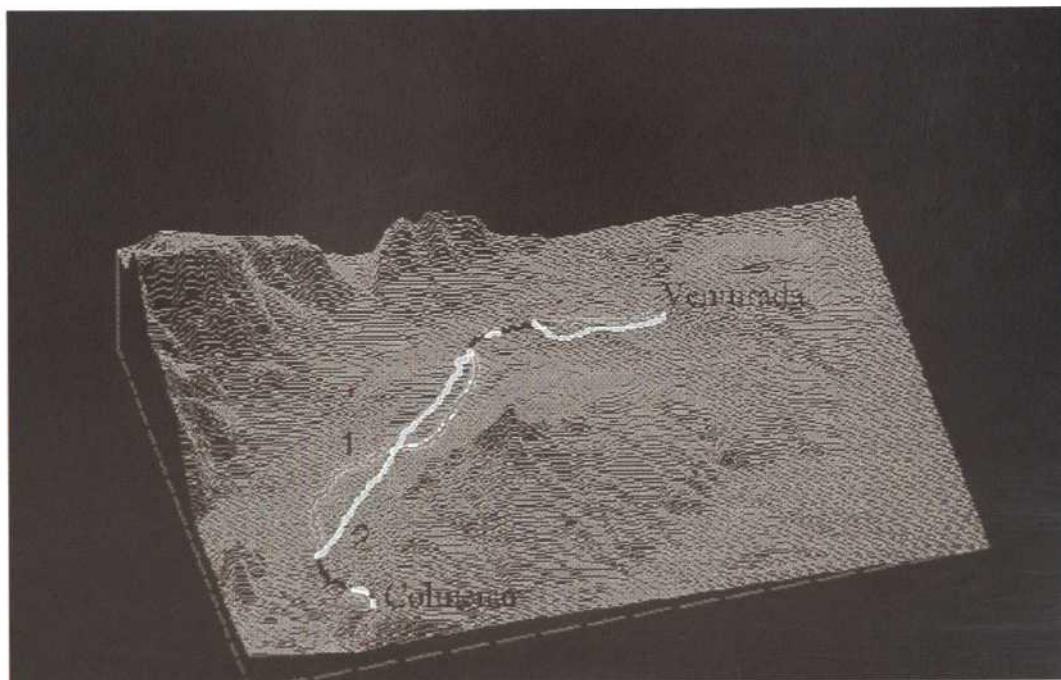


FIGURA 11. Nuevos trazados incluyendo los costes ambientales (en verde) sobre el modelo digital del terreno. Las zonas de coincidencia aparecen en negro. Ruta 1: de Colmenar a Venturada, Ruta 2: de Venturada a Colmenar.

calidad son las ocupadas por formaciones arbóreas autóctonas y singulares (fresnedas, enebros, pinares), mientras que aquellas áreas de menor calidad, ocupadas por matorrales o pastizales, representan el menor coste. Las áreas de exclusión (núcleos y áreas residenciales y embalses) recibieron una ponderación alta, para que fueran evitados en el trazado óptimo (fig. 10).

El coste derivado de esta valoración ambiental fue multiplicado por el mapa de costes asociados a la construcción, obteniéndose un nuevo mapa de costes y, posteriormente, dos nuevas superficies de fricción calculadas desde Venturada y desde Colmenar Viejo. En consecuencia, el factor ambiental se considera aquí como un componente más de la superficie de costes, lo que implica que modifique el trazado de la carretera previamente diseñado.

El proceso y los comandos empleados para generar las superficies de fricción y las rutas óptimas fueron los mismos utilizados previamente.

Como puede observarse (fig. 11), estas rutas modifican las trazadas en el anterior epígrafe, evitando ahora a los tipos de vegetación más sensibles, definidos por una alta ponderación en la tabla 1. Como es lógico, al introducir un factor multiplicativo, los costes totales son mayores, pero puede mantenerse una valoración relativa sobre cuál de las dos rutas resulta más adecuada. Al igual que ocurría con los costes de construcción, la carretera trazada a partir de Colmenar ofrece un coste total mucho más alto que la calculada desde Venturada (en este caso 6,75 veces más coste), aunque las rutas no coinciden exactamente con las trazadas previamente.

CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado una aplicación práctica del interés que los Sistemas de Información Geográfica pueden brindar al diseño de infraestructuras, y más concretamente, a la planificación del trazado

de carreteras. Si bien, tanto los datos necesarios como el modelo de análisis deberían ser mucho más detallados para una aplicación real, el proceso metodológico puede aportar algunas sugerencias de interés en este campo. Parece evidente que los SIG pueden ofrecernos una imagen mucho más certera que las herramientas convencionales sobre el contexto espacial en el que se desenvuelve la planificación de

infraestructuras. Un SIG nos permite elaborar rutas alternativas, plantear distintos escenarios, evaluar geográficamente diversas propuestas. Por otra parte, el empleo de esta técnica ofrece la posibilidad de enriquecer los criterios que actualmente se utilizan en el diseño de trazados, incorporando los factores ambientales y sociales, además de los propiamente relacionados con costes de construcción.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDRÉS, A.; BANÓN, S. y CASADO, A. (1991): «Cartografía de paisajes para la conservación en el territorio histórico de Álava», en: *IV Jornadas sobre el paisaje: alternativas de desarrollo y conservación del paisaje*, 131-137, Segovia.
- ARCE, R. M. (1992): «Carretera y Medio Ambiente», en: *II Simposio Nacional sobre carreteras y medio ambiente*, 78-93, MOTPMA, Madrid.
- ARONOFF, S. (1989): *Geographic Information Systems: A Management Perspective*, WDL Publications, Ottawa.
- BELWARD, A. S. y VALENZUELA, C. (1991): *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing countries*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- BOSQUE SENDRA, J. (1992): *Sistemas de Información Geográfica*, Rialp, Madrid.
- BURROUGH, P. A. (1986): *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Clarendon Press, Oxford.
- CEBRIÁN, J. A. (1994): *G.I.S. Concepts, Infocarto-Departamento de Geografía (UEX)-Grupo de métodos cuantitativos (AGE)*, Cáceres.
- CEOTMA (1984): *Guía metodológica para el estudio del medio físico*, Madrid.
- CHUVIECO, E. y SALAS, J. (1993): «Los SIG en el análisis y gestión del medio ambiente», en: *Catastro. Revista del Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria*, n.º 18, 61-72.
- COMAS, D. y RUIZ, E. (1993): *Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica*, Barcelona, Ariel.
- EASTMAN, R. (1994): *IDRISI: A grid-based geographic analysis system. Versión 4.1*, Clark University, Worcester.
- GÓMEZ, G. y GUTIÉRREZ, J. (1993): «Creación de una red digital de infraestructuras viarias a escala metropolitana», en: *II Congreso de la Asociación Española de SIG*, 54-70, AESIG, Madrid.
- LACHOWSKI, H.; MAUS, P. y PLATT, B. (1992): «Integrating remote sensing with GIS. Procedures from the Forest Service», en: *Journal of Forestry*, vol. 90, 16-21.
- MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F. y RHIND, D. W. (1991): *Geographical Information Systems*, Longman, London.
- MONZÓN, A.; MARTINEZ, E. y ESPLUGA, A. P. (1990): «Método para el trazado automático de obras lineales», en: *Estudios Territoriales*, n.º 32, 191-215.
- OTERO, I. (1993): *Planificación territorial. Estudio de casos*, ETSIM, Madrid.
- OTERO, I.; ALCAIDE, M. T. y MONZÓN, A. (1993): «Metodologías basadas en los SIG para planificar redes de transporte minimizando los costes ambientales», en: *XII Congreso Mundial IRF*, Vol. 1, 759-768. Asociación Española de la Carretera, Madrid.
- OTERO, I. y ALCAIDE, M. T. (1994): «Utilización de un SIG para encontrar el trazado de una carretera con un coste ambiental mínimo», en: *II Congreso de Ingeniería Automática* (en prensa), Toledo.
- PAZ, A. I. de, PINTO, V. y FONT, X. (1990): «Una metodología de evaluación del impacto paisajístico-visual de explotaciones a cielo abierto, basada en parámetros cuantificables», en: *IV Reunión de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio: La cornisa cantábrica*. Comunicaciones, 447-456, ETSIM, Gijón.
- REBOLJ, D. (1993): «Rodee. An integrated road design environment», en: *XII Congreso Mundial I.R.F.*, Vol. 1, 597-602. Asociación Española de la Carretera, Madrid.
- STAR, J. y ESTES, J. (1990): *Geographic Information Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- STUART, M. y PHILIP, S. (1993): «Integrated environmental management in road planning for developing countries», en: *XII Congreso Mundial I.R.F.*, Vol. 1, 705-719. Asociación Española de la Carretera, Madrid.