

LA PLANIFICACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE ESCOLAR A TRAVÉS DE UN SIG: EL PROYECTO SIGTEBAL

SEGUÍ PONS, J. M.[#], RUIZ PÉREZ, M.^{*}, GUAITA MAS, F.[#],
ESCALAS, F.^{*} y BAUZÀ, A.^{*}

[#] Departament de Ciències de la Terra

^{*} Laboratori de Sistemes d'Informació Geogràfica

Universitat de les Illes Balears

Cra. Valldemossa km. 7,5

07122 Balears, Spain

joana.segui-pons@uib.es

RESUMEN

En este artículo se presentan de forma resumida la metodología y principales resultados del proyecto SIGTEBAL "Sistema de Información Geográfica para el diseño, gestión, análisis y planificación de rutas de transporte escolar en las Baleares". Se trata de un ejemplo de aplicación de los Sistemas de Información Geográfica al área del transporte (SIG-T). El SIGTEBAL se contruye a partir del diseño de una base de datos geográfica de la red viaria regional de Mallorca a la cual se le incorpora información correspondiente al sistema de rutas de transporte escolar (paradas, itinerarios, colégios, etc). El proceso analítico y de planificación de rutas se realiza a partir de la implementación de diversos métodos de optimización. El objetivo final ha sido el diseño y la implementación de un aplicativo orientado al personal técnico de la Consejería de Educación del Gobierno Balear para para facilitar las tareas de gestión de rutas escolares.

Palabras clave: SIG y Transporte, SIG-T, rutas, modelización redes, transporte escolar, diseño de aplicativos SIG.

ABSTRACT

This paper presents the methodology and the main results of the SIGTEBAL project "GIS for the design, management, analysis and planning of school routes in the Balearic Islands" financed by the Balearic Government to a team of the University of the Balearic Islands. It is an example of application of GIS to the field of transport (GIS-t). The SIGTEBAL begins with the design of a geographic data base of the regional road network from Majorca to which information corresponding to the system of school routes (stops, routes, schools, etc) is added. The process of planning routes is made from the implementation of diverse methods of optimization. The final aim has been the design and the implementation of a GIS application oriented to the technical staff of the Council of Education of the Balearic Government to facilitate the tasks of management of school routes.

Keywords: GIS, transport, GIS-T, routes, network modeling, GIS-T, GIS design.

1. Introducción

La planificación de rutas es una de las aplicaciones de mayor difusión en el campo SIG-T. Los SIG hacen posible la planificación de viajes y la optimización de rutas por carretera, por ferrocarril, viajes aéreos, bicicleta en transporte público o privado (Claramunt, Jiang and Bargiela, 2000, White y Thompson, 2000, Fletcher, Henderson and Espinoza, 1995a). Incluso facilitan el desarrollo de rutas que combinen distintos modos de transporte, o que optimicen diferentes criterios como el tiempo de recorrido, coste económico, el valor cultural o ecológico de la ruta, etc. Con los SIG, se optimizan rutas en ciudades, en regiones, en países, continentes o a escala a nivel mundial. Existen numerosas referencias de aplicación de SIG, incluso en países con redes viarias poco definidas y ciudades con complicadas estructuras urbanas, como Tailandia, se proponen modelos de optimización de rutas a diferentes escalas regionales y urbanas (Siangsuebchart y Winyoopradist 2000).

La optimización de rutas de transporte escolar se considera un tema prioritario por parte de las administraciones públicas por la obligatoriedad de su servicio y la trascendencia social y económica que supone. Las rutas de transporte escolar deben ser adaptadas de forma continua a las necesidades de los alumnos de cada centro para cada momento. La planificación de rutas del transporte escolar debe contemplar además de la minimización de tiempo de transporte, la reducción o erradicación de los riesgos circulatorios (cruces peligrosos, pasos a nivel, etc), así como la minimización de costes económicos entre otros parámetros.

En Baleares el problema derivado de la dispersión de los alumnos en núcleos de población, especialmente en las zonas turísticas con gran variabilidad poblacional, hace necesario disponer de un instrumento de gestión y optimización de las rutas de transporte escolar que se adapte dinámicamente a las necesidades de cada año escolar o incluso de cada temporada turística.

El objetivo del proyecto SIGTEBAL consiste en mejorar el sistema de gestión y planificación de rutas de transporte escolar en Baleares. Para ello, en primer lugar se diagnostica el sistema de rutas de transporte utilizado actualmente por la administración autonómica de Baleares en los Institutos de Educación Secundaria (IES) de la isla de Mallorca. Posteriormente se proponen rutas de transporte escolar en función de distintos criterios y finalmente, se desarrolla una aplicación informática, con funcionalidad SIG, para gestionar y planificar las rutas adecuándolas a las demandas educativas existentes.

2. Metodología

2.1. Las fuentes de información

Las fuentes de información se han clasificado en dos categorías; cartográficas y del transporte escolar.

La principal fuente de información cartográfica sobre la que se ha basado el Sistema de Información Geográfica es la red viaria de la isla de Mallorca digitalizada por el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la UIB a partir de la cartografía del Servicio Geográfico del

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

Ejército (1:50.000) actualizada con la información de carreteras del Govern Balear y el Consell de Mallorca. La red dispone de 11.076 nodos y 15.170 arcos. De cada arco se especifica, su longitud, el tipo de carretera y su velocidad media, el tiempo de recorrido, la pendiente, el índice de sinuosidad, las intensidades medias diarias de tránsito y los puntos negros.

Como cartografía general de la isla de Mallorca se ha utilizado un mapa de divisiones municipales escala 1:25.000 del Govern Balear.

Las variables relativas a la información del transporte escolar incorporan referencias generales al sistema de transporte así como información específica de las rutas de transporte escolar actuales. La [figura 1](#) representa la red viaria de Mallorca y las rutas de transporte escolar actuales.

Las fuentes correspondientes a información general sobre el sistema de transporte escolar fueron las siguientes:

Trabajo de campo realizado sobre 20 centros de IES de Mallorca con transporte escolar subvencionado por la *Conselleria d'Educació* (suponen un 37.7% respecto del total de centros de Baleares). Los alumnos que utilizan transporte escolar representan un total de 3.803 individuos, lo que significa un 16.7% respecto de los 22.798 alumnos que cursan Enseñanza Secundaria Obligatoria (E.S.O.).

Base de Datos Municipales que comprende un total de 222 entidades de población de los 53 municipios de Mallorca, con diferentes variable socioeconómica editada por el Instituto Balear de Estadística.

Las fuentes relativas a la información territorial de las rutas de transporte escolar fueron las siguientes :

Colegios Públicos e IES con rutas de transporte escolar, por islas y la Conselleria de Educación, Cultura y Deportes del Govern Balear :

- Itinerarios de las rutas de transporte escolar.
- Coste de las rutas de transporte escolar (2000-2001); Ayudas individualizadas de transporte escolar y otras informaciones territoriales.

Conselleria de Obras Públicas y Transporte del Govern Balear

- Datos de Intensidad Mediana Diaria (IMD) de la mencionada red (2000).

Dirección General de Tráfico (Delegación Provincial de Baleares)

- Puntos negros de la red viaria de las Baleares (1999).

Trabajo de campo :

- Realización de una encuesta de valoración del servicio de transporte escolar al Director/a de cada centro y al presidente/a de la Asociación de Madres y Padres de Alumnos.

2.2. Construcción de la base de datos geográfica de las rutas de transporte escolar

En primer lugar se diseñó la estructura de la Base de Datos Relacional (SGBDR), elemento configurador, que formará parte del SIG del proyecto SIGTEBAL. Se definieron tablas y se establecieron las pertinentes relaciones entre las mismas. La Base de Datos (BD) del SIG es el eje vertebrador del proyecto, contiene y relaciona los atributos de información alfanumérica y numérica con elementos gráficos relativos al transporte escolar.

Los SIG se pueden clasificar en cuatro generaciones dependiendo de la solución adoptada para almacenar la información espacial, tal y como se describen Larue *et al.* (1993) y queda representado en la [figura 2](#).

La *primera generación* se basa en sistemas construidos directamente sobre el sistema de archivos dichos sistemas proporcionan una funcionalidad muy limitada. La *segunda generación* emplea un SGBDR (Sistema gestor de bases de datos relacional) para la gestión de la información no-espacial, y un conjunto de archivos con estructuras de datos propietarias para los datos espaciales. La *tercera generación* gestiona ambos tipos de información (espacial y no-espacial) en el mismo SGBDR. Pero éste únicamente almacena la información, para manipularla se usa una capa de componentes espaciales externos al SGBDR que define el modelo lógico de los datos espaciales. La mayoría de sistemas actuales pertenecen a la segunda (principalmente) y tercera generación. La *cuarta generación* se basa en SGBDR con extensiones espaciales. Incluyen en su modelo de datos, de forma nativa, las estructuras espaciales (puntos, líneas, polígonos...) y su lenguaje de consulta/manipulación se extiende con los principales operadores y funciones espaciales.

La solución adoptada para la implementación de la base de datos SIGTEBAL pertenece a los sistemas de tercera generación. Se almacena toda la información en un SGBDR, concretamente Microsoft Access ya que se adapta perfectamente a los requerimientos técnicos del prototipo. Si en el futuro aumentan estos requerimientos se puede migrar a cualquier SGBDR de mayor rendimiento como Oracle, DB2, SQL Server o PostgreSQL, por citar algunos.

Algunas de las ventajas de usar un SGBDR como almacén de los datos espaciales se citan a continuación:

- Facilidad de integración de la información corporativa con la información espacial
- Integridad de datos
- Aprovechar las características propias del SGBDR, como herramientas de administración y mantenimiento, copias de seguridad y recuperación, gestión de usuarios, escalabilidad, seguridad, replicación...
- Consulta y manipulación de los datos mediante SQL

2.2.3. Modelo entidad-relación de la base de datos

En la [figura 3](#) se detalla el esquema conceptual de datos definido en el proyecto SIGTEBAL para poder gestionar el transporte escolar. Describe todas las entidades involucradas en la problemática del transporte escolar (centros escolares, alumnos, rutas, paradas, empresas de transporte, flota de autobuses...) y sus relaciones.

Las tablas que contienen información espacial son las siguientes:

- Datos puntuales: paradas de autobús (ATURADES), centros escolares (CENTRES a través de su relación con las paradas) y entidades locales (ENTITATS)
- Datos lineales: tramos de la red viaria (PLN_VIARI)
- Datos poligonales: municipios (PGN_MUNI) y áreas escolares (PGN_ESC)

Para almacenar la información espacial en Microsoft Access se utilizan los siguientes atributos para cada tipo de estructura de datos espaciales:

Datos puntuales:

- XCOORD e YCOORD: coordenadas UTM del punto. Se generan índices sobre estos atributos para mejorar el rendimiento en el acceso

Datos lineales:

- NUMVERT: número de vértices totales de la polilínea
- BOUNDLOWX, BOUNDLOWY, BOUNDUPPX y BOUNDUPPY: coordenadas UTM del rectángulo más pequeño que contiene completamente la polilínea. Se generan índices sobre estos atributos
- VERTICES: atributo binario conteniendo todos los vértices de la polilínea
- NUMPARTS: número de partes en que compone una polilínea
- PARTS: atributo binario con los vértices de inicio de cada polilínea si se compone de múltiples partes

Datos poligonales:

- Los mismos atributos que las polilíneas
- CENTREX y CENTERY: coordenadas UTM del centro del rectángulo más pequeño que contiene completamente el polígono

2.3. Introducción de información geográfica en la base de datos

Para la digitalización de las rutas y las paradas de transporte escolar se ha utilizado una base cartográfica correspondiente a la red viaria de Mallorca y se han seleccionado los arcos que corresponden a cada ruta, las cuales se asimilan a los tramos entre paradas. Se ha añadido, a cada arco seleccionado, un identificador diferente para cada tramo. Este identificador servirá para relacionar los tramos con el resto de la información que se encuentra en la Base de Datos.

Un tramo no tiene porque coincidir necesariamente con los arcos de la red viaria, puede comprender, por ej., parte de uno y parte de otro. Los nodos se identifican con los centros IES o paradas. El atributo del centro o parada se asigna a determinados nodos de la red viaria. La digitalización de las paradas se ha realizado a partir de los nodos de la red. Como que ya se disponía de una tabla de paradas incorporada a la Base de Datos. Se ha optado por añadir a esta tabla el identificador único que corresponde a cada nodo.

Finalmente la información introducida en la BD fue correspondientemente depurada, validada y cartografiada. Para ello se utilizó el programa ArcView vers. 3.2. (ESRI ©).

2.4. Optimización de rutas

Se realizan dos modelos de optimización de rutas. El primero se basa en la optimización de trazados a partir de diversos métodos para el cálculo de la impedancias. Se utilizó el módulo Network del programa ArcInfo vers. 8.1. (ESRI ©)

El segundo, además de considerar las impedancias, optimiza el número de rutas para cada centro escolar. Se aplicó un algoritmos de optimización específico diseñado por Joaquín Pacheco de la Universidad de Burgos (Pacheco, Aragón y Delgado, 2000).

2.4. Desarrollo del aplicativo "SIGTEBAL"

Consistió en la programación de un prototipo informático para la gestión y planificación de rutas diseñado para su utilización por parte de gestores y planificadores de la administración.

3. Resultados

3.1. Análisis de las rutas y su tratamiento

De los múltiples análisis realizados sobre la Base de Datos SIG se obtiene un conjunto de indicadores del transporte escolar que ayudan a comprender y caracterizar el análisis global de rutas entre estos destacamos: la distancia entre paradas, en kilómetros y en tiempo, y la variabilidad espacial de los alumnos.

Del análisis global de rutas se obtuvo el valor de la media resultante que es de 4,5 rutas por cada centro. Además se establece como valor más frecuente, el de 6 rutas, pues se produce en seis de los veinte casos (30%).

De la distancia entre paradas, en kilómetros y en tiempo, se obtuvieron los siguientes resultados: La distancia entre dos paradas consecutivas, expresada en kilómetros, es de 4 km de media, y ello corresponde a veinticinco de los 316 tramos. El valor máximo se sitúa en 16 km, y se da en 5 casos, mientras que los valores mínimos se sitúan, por debajo de 1 km, en 40 tramos y, alrededor de 1 km, en 84 tramos (26.6%).

Respecto a la territorialización de los alumnos transportados, no se perciben grandes diferencias en su distribución geográfica ni por niveles educativos ni por sexos. Sin embargo, se aprecian núcleos de población, localizados en las zonas turísticas de la costa, con un mayor número de alumnos transportados. De la totalidad de ellos, 3.803, con rutas subvencionadas, la gran

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

mayoría reside en Portocristo (Manacor) con 244 seguido de Magaluf (Calvià) 153, Peguera (Calvià) 136 alumnos y Ca'n Picafort (Sta Margalida) con 132 alumnos ([figura 4](#)).

3.2. Optimización de rutas de transporte escolar

Para ilustrar el análisis de optimización de rutas realizado a efectos de simplificación se presentarán los resultados obtenidos para las comarcas del *Raiguer* y *es Pla* de Mallorca. En la [figura 5](#) aparecen los centros IES Pau Casanoves, IES Berenguer d'Anoia, i Sineu que serán objeto de análisis.

Los centros que constituyen actualmente la oferta educativa en esta zona son el IES Berenguer d'Anoia y el IES Pau Casanoves, en Inca y el IES Sineu, ubicado en este municipio.

La optimización del transporte escolar en primer lugar se ha centrado en **el cálculo del camino mínimo** entre dos nodos para diversos valores de impedancia:

A) *Impedancia = longitud o tiempo*

La primera de ellas se ha realizado en función de la variable longitud total, expresada en kilómetros, del recorrido de la ruta, desde la parada de origen al centro de destino. En segundo lugar se ha asimilado la impedancia al tiempo de recorrido expresado en minutos y obtenido a partir de la asignación de una velocidad media a cada uno de los arcos para el transporte escolar teniendo en cuenta el tipo de carretera.

El primer ejemplo que presentamos se centró en la optimización a partir de la longitud de la ruta. En el IES Berenguer d'Anoia confluyen un total de 9 rutas, de las que 3 son compartidas con el IES Pau Casanoves. Por tanto, de las seis rutas, se han obtenido valores de optimización destacables en tres casos, concretamente en las de Alaró; Santa Maria y Consell; y en la de Caimari, Selva y Biniamar. En las dos primeras, la reducción de la distancia recorrida en kilómetros o en tiempo, se consigue incorporando la autopista en diferentes tramos del itinerario. En el tercer caso también se debe a un cambio en la carretera utilizada. En los tres casos los valores de optimización no ([figura 6](#)) son muy elevados, diferencias de 3 minutos y 3 km.

El IES Pau Casanoves cuenta con seis rutas de las que tres son compartidas con el centro anterior. Tres de las seis se optimizan de forma destacable, aunque de forma menos significativos que los del centro anterior. Hablamos de reducciones de un máximo de dos minutos en tiempo de recorrido y de 2,5 km. kilómetros en longitud.

Podrían optimizarse una parte importante del conjunto de rutas, tanto en términos de tiempo como de longitud, al introducir en los itinerarios que lo posibiliten la autopista como vía de acceso al municipio de Inca. Sin embargo, cuantitativamente los resultados no difieren mucho de los actuales.

B) Impedancia = Modelo multicriterio de impedancias (Modelo de Impedancia)

La impedancia expresa el coste o resistencia de cada a ser atravesado. Por tanto, el cálculo de caminos mínimos busca conseguir, con el mínimo coste posible, la combinación de arcos consecutivos que unan las paradas con los puntos de destino. Se ha optado por asignar a la impedancia el resultado de la combinación lineal del tiempo de recorrido, del volumen de tráfico soportado por la red (IMD) y del número puntos negros. (De esta forma mayor tiempo, mayor IMD, y mayor número de accidentes incrementa la impedancia).

La optimización de las rutas de transporte escolar del IES de Sineu a partir del Modelo de Impedancia concluye que de las ocho rutas existentes, tres presentan variaciones significativas. La ruta 35 disminuye su duración en 8 minutos y apenas modifica la longitud. La ruta 37, una vez optimizada, presenta una diferencia de 1 minuto respecto de la ruta original. La ruta 38 difiere en 3.4 km y en 13 minutos menos en relación a la ruta actual ([figura 7](#)). Ha de tenerse en cuenta que esta optimización prioriza la seguridad de la ruta sobre la disminución del tiempo de recorrido, lo cual la hace adecuada para el transporte de escolares.

El segundo método aplicado consiste en **la optimización del número de vehículos**.

El algoritmo de optimización del número de rutas implementado permite planificar un número preestablecido de rutas óptimas a partir de las diferentes paradas existentes y del número de alumnos que suben en cada una de ellas (Pacheco *et al.*, 2000).

Este algoritmo fue utilizado para la resolución del problema de planificación de trazado y número de rutas de transporte escolar en la provincia de Burgos. La racionalidad (optimización) se entiende, en este caso, en términos de minimización del coste total del transporte y de duración del trayecto, calidad de las carreteras, etc. y otros aspectos relevantes. Este planteamiento es un caso específico del conocido como Problema de Rutas de Vehículo (*VRP, Vehicle Routing Problem*), o más específicamente, Problema de Rutas de Vehículos con Restricciones de Carga y Tiempo (*VRPTW, Vehicle Routing Problem with Time Windows*).

El diseño del algoritmo utiliza una técnica heurística. Los criterios de optimización establecidos son los siguientes: minimización el número de vehículos, minimización la duración de la ruta más larga y minimización la distancia total de recorrido o coste.

Su aplicación para el el IES Berenguer d'Anoia en el municipio de Inca dio lugar a los siguientes resultados ([figura 8](#)): Sus nueve rutas, incluyendo las tres compartidas, se optimizan en función de la utilización de 7, 6 y 5 vehículos. En el primer caso, con 7 vehículos, la modificación consiste en el agrupamiento de rutas, con tan sólo una parada. De esta manera se agrupan en un solo itinerario las paradas de Alaró y Lloseta, además de la de Biniamar, que se elimina de la ruta original Caimari-Selva-Biniamar, para incorporarse a esta nueva. En la optimización a partir de 6 vehículos se mantiene una de las dos rutas de Binissalem y dos de las creadas en la optimización anterior con 7 vehículos. Aparece una nueva ruta que agrupa las paradas de Moscari, Caimari y Selva, y otra, las de Alaró y Binissalem. En la optimización a partir de 5 vehículos tan sólo se introduce un

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

recorrido nuevo: Alaró-Consell-Binissalem. Los cuatro restantes son, en un caso, iguales a una ruta original y, en los otros tres, iguales a los introducidos en las optimizaciones anteriores (7 y 6 vehículos).

3.3. Desarrollo del aplicativo informático

Como resultado final del proyecto se ha diseñado una aplicación informática para la gestión del transporte escolar en la isla de Mallorca ([figura 9](#)). Se trata de un prototipo implementado en Microsoft Visual Basic que permite la gestión de las rutas de transporte y sus paradas, centros escolares y alumnos usuarios del transporte escolar, empresas de transporte encargadas del servicio, información estadística de rutas, municipios y entidades locales.

Mediante un conjunto de componentes ActiveX de la empresa Sylvan Ascent Inc. (SylvanMaps/OCX-4) se completa la aplicación con funcionalidad SIG. Estos componentes pueden acceder a datos espaciales almacenados en un SGBDR para el cual exista un controlador ODBC o ADO/OLEDB.

El hecho de *extender* espacialmente la aplicación ofrece la posibilidad de visualizar los centros escolares y el trazado de las rutas con sus respectivas paradas mediante un mapa interactivo con las opciones de navegación habituales en este tipo de aplicaciones (modificación de la escala, cambio del área de visualización, pequeño mapa de referencia interactivo). Además, permite acceder a las fichas de datos de los centros y las paradas pulsando con el ratón sobre sus iconos en el mapa; así como, acceder a la localización de centros escolares, rutas y paradas, municipios y entidades locales, desde sus fichas de datos.

4. Conclusiones

Como conclusión final del estudio de las rutas de transporte escolar de los IES del *Raiguer* y *el Pla de Mallorca* se puede afirmar que la estructura radial de las rutas de cada centro, así como la carencia de una red de carreteras más compleja, reducen bastante la capacidad del SIGTEBAL para proporcionar alternativas a las rutas de transporte escolar actuales. Sin embargo esta aplicación permite analizar, gestionar y planificar nuevos itinerarios y permite exportarse a otras redes de otros ámbitos regionales. El SIGTEBAL tiene mayor funcionalidad como gestor que como elemento de planificación, si bien permite conocer si las rutas existentes son las más óptimas, a través de diferentes algoritmos de optimización.

El proyecto SIGTEBAL se ha caracterizado por su aplicabilidad inmediata a la gestión y planificación del transporte escolar, ya que ha dado lugar a una aplicación informática con el mismo nombre SIGTEBAL que ya está siendo utilizada por la Conselleria de Educación del Govern Balear. A partir de la Base de Datos SIG construida y mediante la utilización de un lenguaje de programación haciendo uso de componentes SIG, se generó un programa de fácil manejo que incorpora las funcionalidades básicas para el análisis y la gestión del transporte escolar en una Comunidad Autónoma.

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

Agradecimientos

Se desea hacer constar nuestro agradecimiento a la Conselleria d'Innovació i Energia del Govern Balear por la financiación del proyecto SIGTEBAL (Direcció General de Recerca, Desenvolupament Tecnològic i Innovació. Conselleria d'Innovació i Energia. Govern de les Illes Balears. Referència IB 3/2000.UIB).

También deseáramos agradecer al Dr. Joaquín Pacheco y a la Dra. Cristina Delgado de la Universidad de Burgos su trabajo en la implementación de los modelos de optimización de rutas en función del número de vehículos.

Referencias bibliográficas

- Claramunt, C., Jiang, B. y Bargiela, A. (2000): "A new framework for the integration, analysis and visualisation of urban traffic data within geographic information systems", *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 8, 1-6, pp. 167-184.
- Comas, D. y Ruiz, E. (1993): *Fundamentos de los sistemas de información geográfica*. Ariel, col. Geografía y Ecología, Barcelona.
- Delgado, C. y Pacheco, J. (2001): "Minmax vehicle routing problems: application to school transport in the province of Burgos (Spain)", *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 505, pp. 297-318.
- Dueker, K. J. y Butler, A. (2000): "A geographic information system framework for transportation data sharing". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8, 1-6, pp 13-36.
- El Shafey, M. y Nasimudheen, M. A. (1997): "Al Hady – Decision support system for vehicle routing". *User Conference Proceedings*. Environmental System Research Institute; digital format downloaded. <http://gis.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to450/pap439/p439.htm>
- Fletcher, D. R., Henderson, T. E. y Espinoza, J. (1995a). *The GIS-T / ISTE A pooled fund study and integrated approach to transportation planning*. Environmental System Research Institute. User Conference Proceedings; digital format downloaded.
- Fletcher, D. R., Henderson, T. E. y Espinoza, J. (1995b) *The GIS-T / ISTE A pooled fund study and integrated approach to transportation planning*. *User Conference Proceedings*. Environmental System Research Institute; digital format downloaded.
- García Palomares, J. C. (2000): "SIG y accesibilidad: efectos de las nuevas autopistas orbitales de Madrid", en Aguado, I. y Gómez, M (Ed.): *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*. Alcalá de Henares, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá de Henares, public. en CD-Rom, pp. 623-639.
- Gipps, P. G., Gu, K. Q., Hels, A. y Barnett, G. (2001): "New technologies for transport at route selection", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 9, pp. 123-134.
- Gould, M. (1998): "Innovación en Sistemas de Información geográfica", en *Tecnología geográfica para el siglo XXI*. Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, pp. 41-59.
- Gutiérrez Puebla, J., Gould, M. (1994): *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Síntesis, Madrid.
- Gutiérrez, J., Monzón, A., Piñero, J. M. (1994): "Accesibilidad a los centros de actividad económica en España", *Revista de Obras Públicas*, 3.331, pp. 39-49.

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

- Gutiérrez, J., González, R. y Gómez, G. (1996): "The European high-speed train network. Predicted effects on accessibility patterns", *Journal of Transport Geography*, 4, 4, pp. 227-238.
- Gutiérrez, J., Monzón, A. y Piñero, J. M. (1998): "Accessibility, network efficiency, and transport infrastructure planning", *Environment and Planning A*, 30, pp. 1337-1350.
- Jourquin, B. y Beuthe, M. (1996 a): "Transportation policy analysis with a geographic information system: the virtual network of freight transportation in Europe", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 4, 6, pp 359-371.
- Martín Jiménez, A. (1999): "Fracaso escolar en las enseñanzas medias de Alcorcón", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 19, pp. 325-348.
- Miller, H. J. y Storm, J. D. (1996): "Geographic information system desing for network equilibrium-based travel demand models", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 4, 6, pp 373-389.
- Grupo de Metodos Cuantitativos, SIG y Teledeteccion (AGE) (1996): *Modelos y Sistemas de Informacion Geografica*. Vitoria, Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología.
- Moldes, F. J. (1995): *Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, RA-MA.
- Moro, I. y Ealo, J. (2000): "Estudio de la accesibilidad de los centros escolares de la red pública vasca de educación en el municipio de Bilbao", en Aguado, I y Gómez, M. (Ed.): *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*. Alcalá de Henares, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá de Henares, public. en CD-Rom, pp. 718-734.
- Pacheco, J., Aragón, A. y Delgado, C. (2000): "Diseño de Algoritmos para el problema del Transporte Escolar. Aplicación en la Provincia de Burgos". *Questiio*, 1, 24, pp. 55-82.
- Palacios Morera, M. (1995): "Sistemas de información geográfica temporal", *Anales de la Universidad Complutense*, 14, pp. 11-29.
- Pitarch Garrido, M. D. (1998): "Un modelo de evaluación de la localización de la oferta de servicios educativos públicos", en Alegre, P. et al. (Coord.): *Tecnología geográfica para el siglo XXI*. Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, pp. 77-94.
- Ralston, B. A. (2000): "GIS and ITS traffic assignment: issues in dynamic user-optimal assignments", *Geoinformatica*, 4, 2, pp. 231-243.
- "School bus routing goes High-Tech". *ArcNews*, 4, 22, pp. 1-16.
- "School planning confronted with demographics and transportation networks using GIS". www.dpmpe.unifi.it/histocity/wg3/wg3-galliani.htm
- Serra del Pozo, P. (1996): "Transformaciones preliminares para el análisis de la demanda de transporte en un entorno SIG", en *Modelos y sistemas de informacion geografica*. Vitoria, Grupo de Metodos Cuantitativos, SIG y Teledeteccion (AGE) y Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, 458 págs.
- Siangsuebchart, S., Winyoopradist, S. (2000): "Integration of 2 scales road network analysis (country and city)", *User Conference Proceedings*. Environmental System Research Institute; digital format downloaded.
- Tapiador, F. y Roque, J. L. (1998): "Estudio topológico de optimización de la red de carreteras Castellano-Leonesa", en Alegre, P. et al. (Coord.): *Tecnología geográfica para el siglo XXI*. Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, pp. 95-105.
- Larue, T., Pastre, D. y Vièmont, Y. (1993). "Strong integration of spatial domains and operators in a relational database system" 3rd International Symposium, SSD '93, Singapore.
- Thill, J. C. (2000): "Geographic information systems for transportation in perspective", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8, 1-6, pp 3-12.

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

"Transporte escolar: encuestadas 92 empresas y comprobada la edad de 424 autobuses en todo el país". *Consumer*, 29.

Thompson, B. (2000): "Using GIS to target market potential bus riders", *User Conference Proceedings*. Environmental System Research Institute; digital format downloaded.

White, M. (1991): "Car navigation systems", en Maguire, D. J., Goodchild, M. F. y Rhind, D. W. (Eds.): *Geographical information systems: Principles and applications*. Harlow, Longman Scientific and Technical, pp 115-125.

FIGURAS

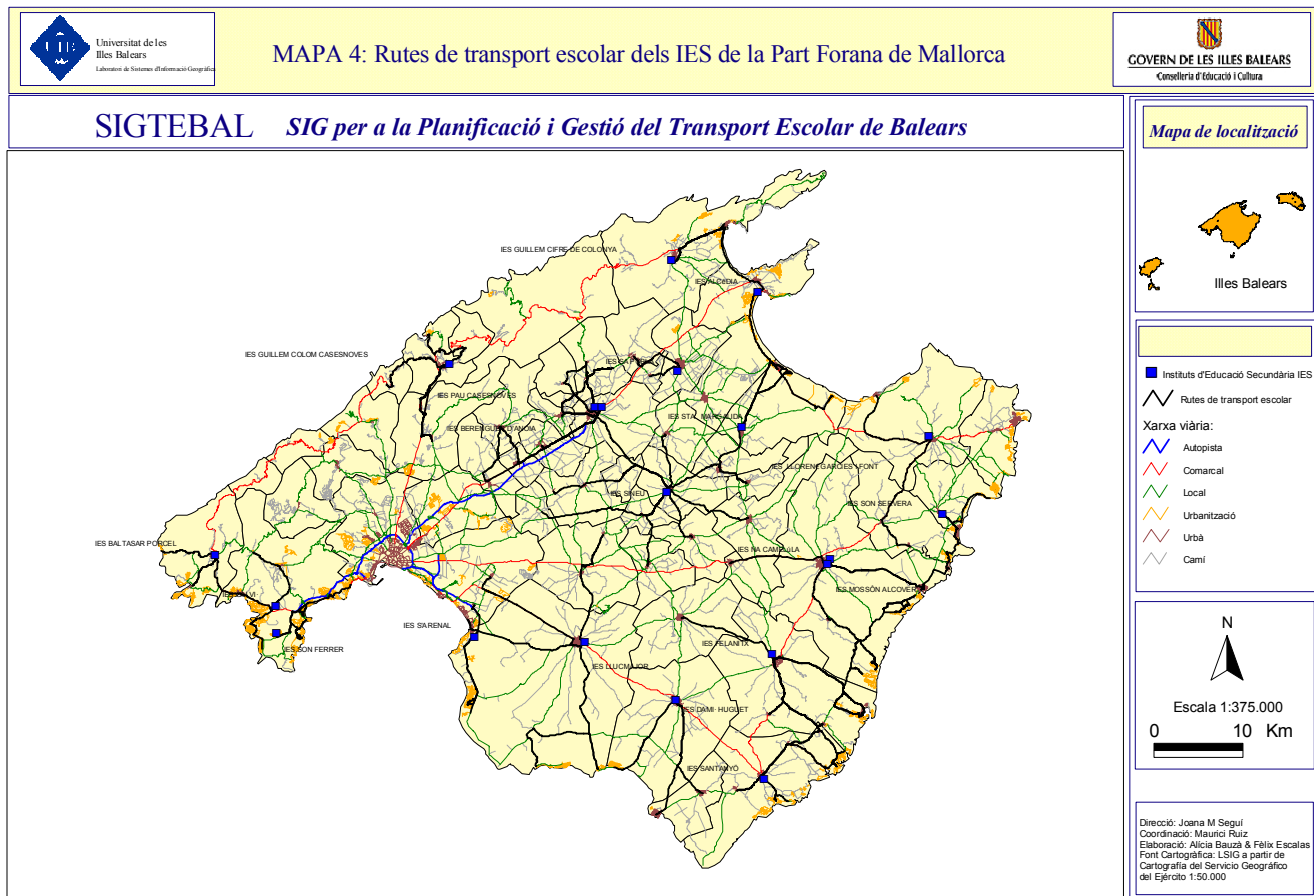


Figura 1. La red viaria de Mallorca y las rutas de transporte escolar existentes

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

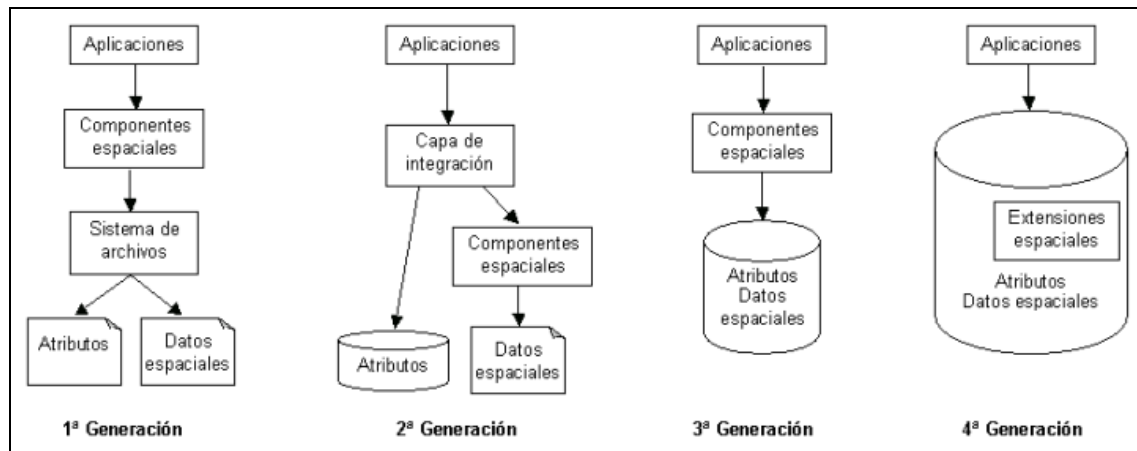


Figura 2. Sistemas de almacenamiento de información espacial en los SIG

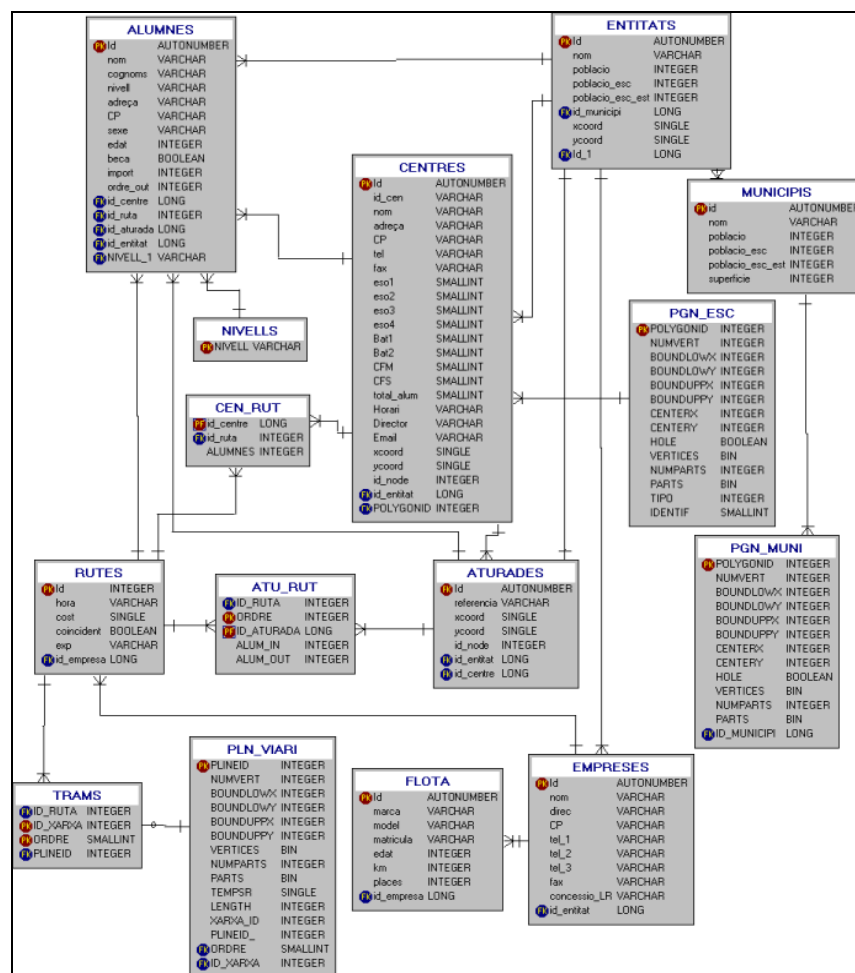


Figura 3. Modelo entidad-relación de la aplicación SIGTEBAL

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

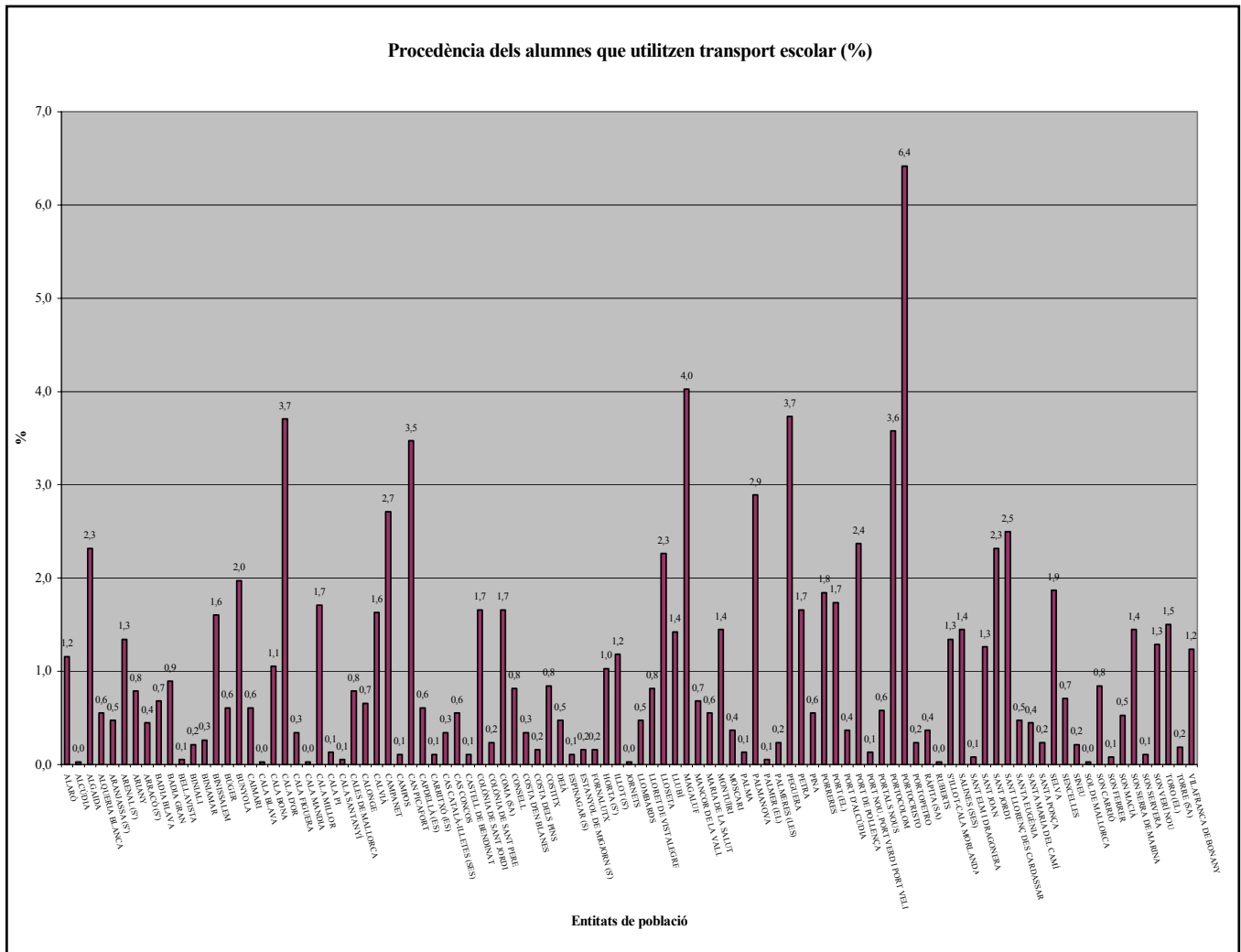


Figura 4. Procedencia de los alumnos que utilizan transporte escolar, entidades de población

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

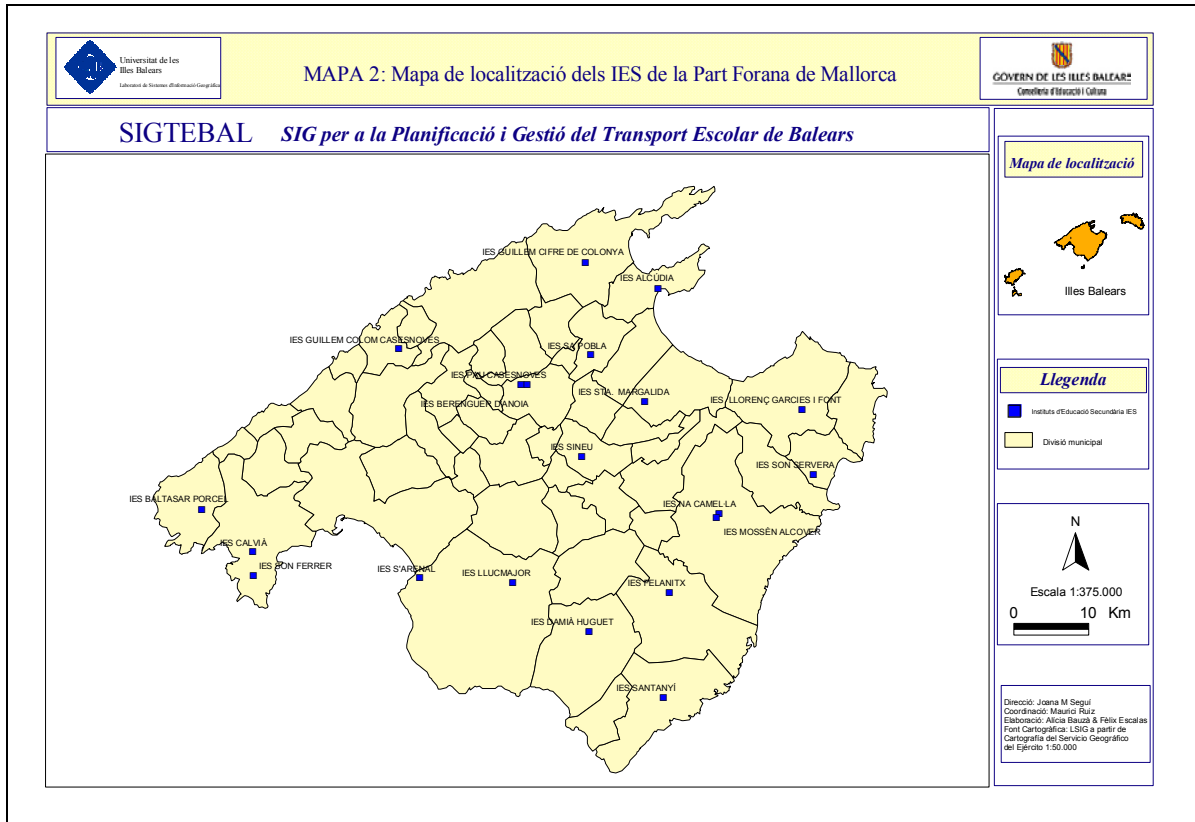


Figura 5. Localización de los centros de enseñanza secundaria de Mallorca (excluido el municipio de Palma)

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", GeoFocus (Artículos), nº 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

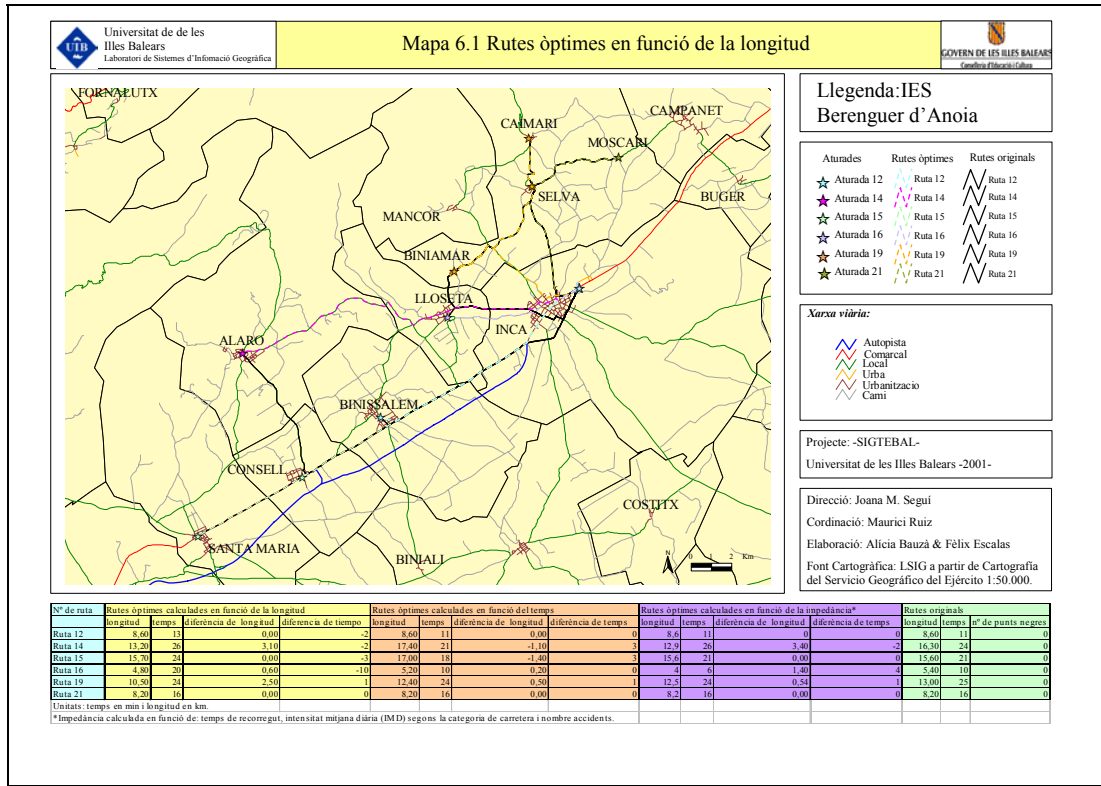


Figura 6. Optimización de rutas, Impedancia = Longitud. IES Berenguer d'Anoia

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", GeoFocus (Artículos), nº 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

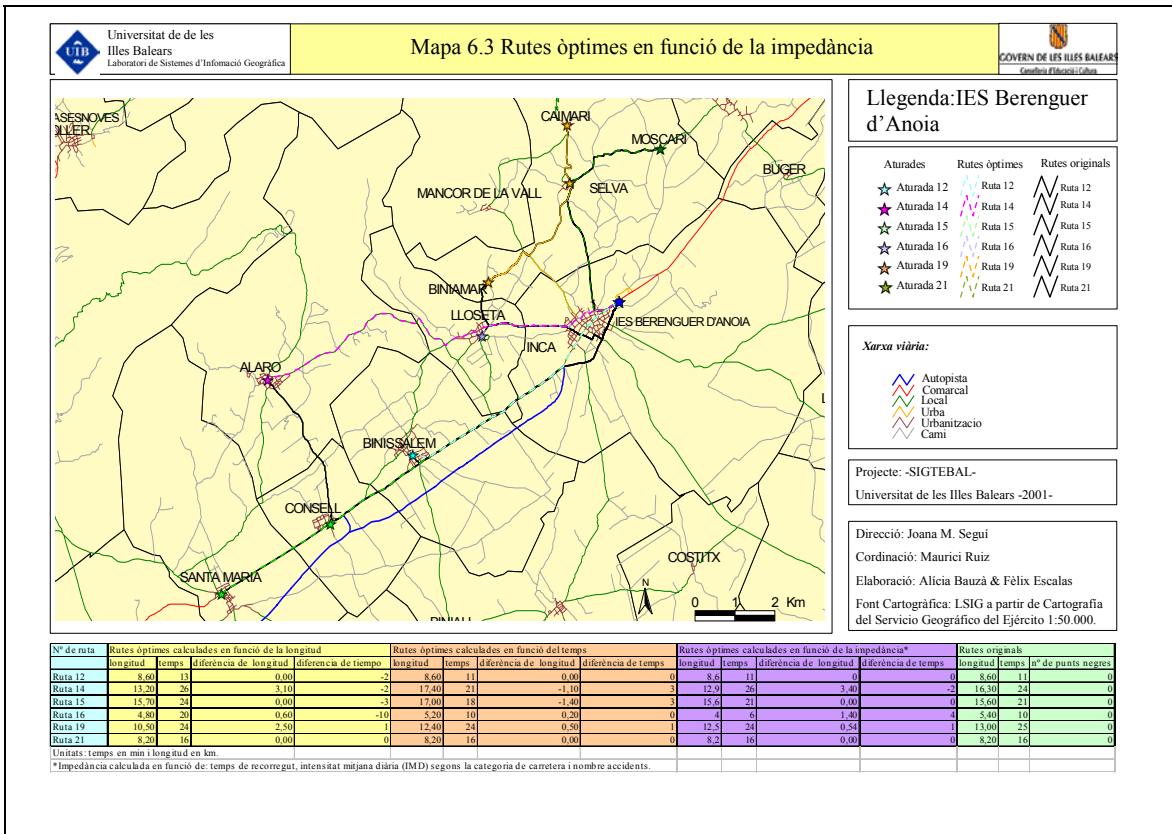


Figura 7. Optimización de rutas, Impedancia = Modelo ponderado tiempo, IMD, peligrosidad. IES Berenguer d'Anoia

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

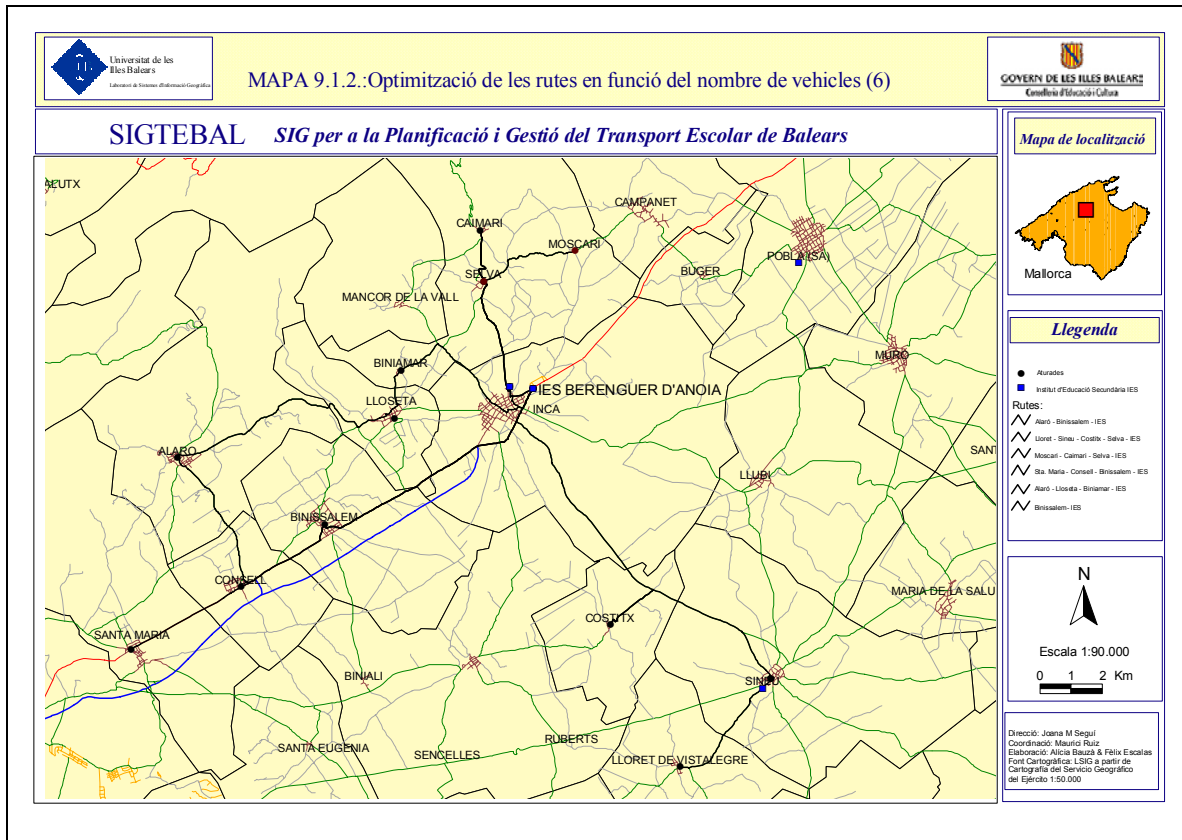


Figura 8. Optimización de rutas / número de vehículos. IES Berenguer d'Anoia

Seguí Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guaita Mas, F., Escalas, F., Bauxà, A. (2003): "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, p. 58-76. ISSN: 1578-5157

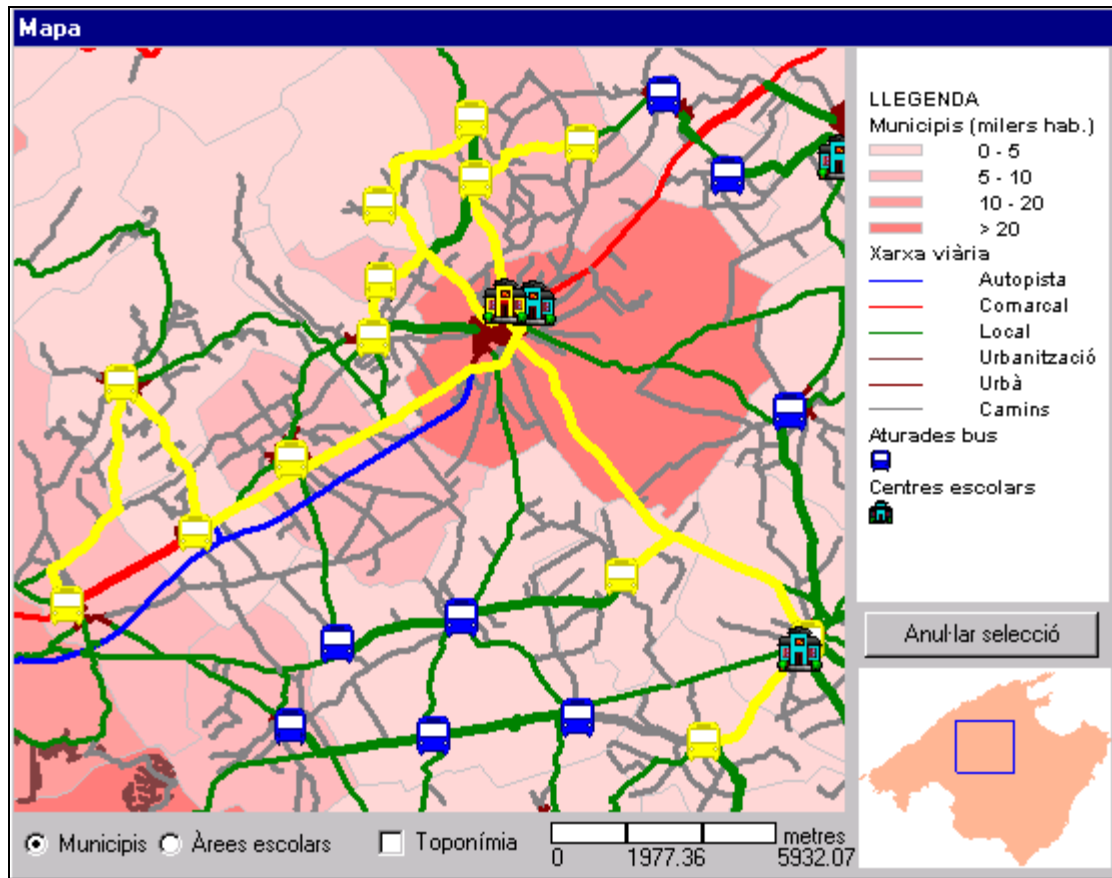


Figura 9. Interfaz del programa SIGTEBAL.