

# RESUMEN DE LA TESINA FINAL DE MÁSTER: “DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA LA MEJORA DEL GRAFO DE CARRETERAS”



Autor: JOAN MAHIQUES JORDA  
Tutor: JOAN IGNASI HERRERA  
VALENCIA

MÁSTER EN SISTEMAS DE  
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (UPC)

2015 - 2016

## Tabla de contenido

1. Introducción.....	2
2. Objetivos y fases del proyecto .....	3
3. El Grafo de Carreteras .....	4
4. El Catálogo de Carreteras.....	5
5. Problemática del Grafo de Carreteras.....	6
6. Solución adoptada .....	7
7. Desarrollo del algoritmo .....	8
8. Diseño y desarrollo de la aplicación web .....	9
9. Análisis de los resultados.....	10
9.1. Análisis del radio de curvatura .....	10
9.2. Análisis de los hitos kilométricos.....	11
9.3. Análisis del recorrido de las máquinas quitanieves.....	12
9.4. Análisis sobre la valoración de proyectos .....	13
10. Conclusiones.....	14

# 1. Introducción

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión.

En este Proyecto Final de Master, se pretenden desarrollar las habilidades necesarias para analizar y solucionar problemáticas relacionadas con la gestión de información geográfica, en concreto, la información relacionada con la Red de Carreteras de Cataluña.

La gestión y planificación de la red de carreteras de Cataluña, es competencia de la Dirección General de Infraestructuras de Movilidad Terrestre (DGIMT), perteneciente al Departamento de Territorio y Sostenibilidad, encargada de la producción y mantenimiento del Grafo de Carreteras.

Se entiende por grafo, un conjunto de objetos llamados vértices o nodos unidos por enlaces llamados aristas o arcos, que permiten representar relaciones binarias entre elementos de un conjunto, los cuales son objeto de estudio de la teoría de grafos.

En este proyecto en particular se estudian los grafos aplicados al modelaje de una red de carreteras, el cual nos permitirá mantener y organizar información relacionada con dichas carreteras y aplicar procedimientos relacionados con los costes de los elementos que lo forman, como por ejemplo cálculo de caminos óptimos.

## 2. Objetivos y fases del proyecto

El principal objetivo del proyecto que nos ocupa es el estudio y análisis del Grafo de Carreteras de la Dirección General de Infraestructuras de Movilidad Terrestre (DGIMT) del Departamento de Territorio y Sostenibilidad.

Concretamente se pretenden estudiar y dar solución a la problemática existente entre la relación, por una parte de la información proveniente de la recolección de datos sobre la red de carreteras y de la información generada en la DGIMT, y por otra parte de la información contenida en el Catálogo de Carreteras.

A continuación se presentan las diferentes fases en el que se divide el proyecto:

- Estudio del modelo de datos del Grafo de Carreteras y del Catálogo de Carreteras.
- Exposición de la problemática relacionada con ambos y presentación de la solución adoptada.
- Desarrollo y aplicación del algoritmo diseñado para la solución de la problemática expuesta.
- Diseño y desarrollo de la aplicación web para la presentación de los datos obtenidos y posteriores análisis de resultados.
- Desarrollo de análisis para la evaluación de los resultados en diferentes casos de estudio.

### 3. El Grafo de Carreteras

Gran parte de los sistemas de información de carreteras y transportes se apoyan sobre la definición de un grafo que sirve de esqueleto común para todas las consultas y procesos.

El Grafo de Carreteras nace con la intención de crear un modelo de grafo de carreteras para dar respuesta a las diferentes necesidades de análisis y gestión de la DGIMT, teniendo en cuenta la estructura funcional existente para mantener las diferentes bases de datos. El Grafo sirve de esqueleto común donde relacionar el resto de datos existentes en la DGIMT relacionados con la red de carreteras.

Se ha intentado definir un único modelo de grafo que podría ser aplicable a todos los sistemas de información existentes, a la vez que fácilmente actualizable, y que da servicio a las peticiones más habituales de navegación, conectividad, segmentación dinámica o catalogación.

Dentro del conjunto de datos que conforman el Grafo podemos encontrar dos versiones de este: el Grafo de Planificación y el Grafo Real. El Grafo de Planificación se corresponde con una versión simplificada del mismo, en el cual los nudos colapsan en un único nodo centroide sin ramales ni vías de servicio y donde las vías desdobladas se representan mediante un único eje.

Por el contrario, el Grafo Real incorpora todos los movimientos existentes dentro de los nudos y se representan los viales de servicio así como las vías desdobladas.

Ambos Grafos están compuestos por las siguientes tablas:

- Arcos: son la representación lineal de la red y muestran la geometría de los ejes.
- Nodos: son la representación geométrica de los extremos de los Arcos y puntos de tramificación de la red.
- Giros: representan el movimiento entre dos Arcos a través de un Nodo.
- Ejes: son el conjunto de vías de circulación, con codificación distinta, definidas en la red.

- PKs: son el conjunto de puntos teóricos de la red formados por la proyección sobre los ejes de los hitos reales existentes en el territorio y las posiciones sobre el Sistema de Referencia Lineal con valores enteros que no tienen asociados ningún hito real.
- Tramos: tramos conexos de los ejes principales que tienen el mismo valor de virtualidad.

Los tramos del Grafo de Planificación se clasifican según su carácter de virtualidad. Debido a la no consideración de las vías secundarias que dan continuidad a los ejes dentro de los nudos se implementan los denominados tramos virtuales, los cuales cubren la función de conexión que realizan los ramales.

A parte de estas tablas, encontramos disponibles varias tablas comunes a ambos grafos:

- Hitos Kilométricos: son el conjunto de señales indicativas del kilómetro existentes en el territorio.
- Polos: son las zonas geográficas representativas de los orígenes y destinos de los posibles movimientos dentro de la red.

## 4. El Catálogo de Carreteras

El Catálogo Oficial de Carreteras contiene la relación detallada y la clasificación por categorías de todas las carreteras no reservadas a la titularidad del estado, ya sea de la Generalitat de Catalunya o de las diferentes diputaciones del territorio catalán.

El Catálogo de Carreteras del Grafo contiene los tres niveles de representación del Catálogo Oficial de Carreteras agrupados con su geometría sobre el Grafo de Planificación. Esto conlleva que el catálogo, al igual que el Grafo de Planificación, esté basado en una representación simplificada de la red, donde los nudos colapsan en un único nodo centroide sin ramales, donde las vías desdobladas se representan con un único eje, y no se representan los viales de servicio.

Los tres niveles del Catálogo de Carreteras son los siguientes:

- Carreteras del Catálogo: es una mera relación de las carreteras catalogadas, según su código único de eje.
- Los Tramos del Catálogo: tiene como objetivo el conocimiento de la clasificación técnica y funcional legalmente establecida, así como los órganos a los cuales se les atribuye la competencia de dichas carreteras.
- Los Subtramos del Catálogo: el tercer nivel se establece con la finalidad de que los gestores dispongan del detalle suficiente para poder trabajar sobre las carreteras.

## **5. Problemática del Grafo de Carreteras**

Debido a la propia definición geométrica del Catálogo de Carreteras, por la cual este se basa en el Grafo de Planificación, el cual contiene una representación esquemática de la red de carreteras, donde los nudos colapsan en un único nodo centroide sin ramales, donde las vías desdobladas se representan con único eje, y los viales de servicio no son mostrados, la información contenida en el Catálogo de Carreteras no se puede relacionar con los viales secundarios que dan continuidad a los ejes.

Esto conlleva que el proceso de relación de la información disponible en el departamento mediante métodos como el de segmentación dinámica, ya sea de datos recolectados por terceros sobre la red o información generada en el propio departamento, resulte en una mala georreferenciación de la misma o en cálculos erróneos de datos derivados de esta.

Dichos cálculos repercuten en las valoraciones económicas de los trabajos realizados sobre la red de carreteras, ya sean trabajos relacionados con la recolección de datos sobre el terreno o proyectos relacionados con el mantenimiento o mejora de la propia red.

## 6. Solución adoptada

Se ha propuesto como solución de la problemática expuesta el diseño de un algoritmo que nos permita calcular una nueva tabla integrada dentro del Grafo, la cual nos debe permitir relacionar la información proveniente de la red de carreteras con la información contenida en el Catálogo.

Para tal propósito dicha tabla debe ser un registro de los tramos reales que conforman cada una de las carreteras contenidas en el Catálogo. Dichos tramos deberán tener en cuenta los ramales que dan continuidad a las vías principales dentro de los nudos. Para tal efecto, el algoritmo calculará la ruta óptima que debería seguir un vehículo dentro del nudo para continuar circulando por el mismo eje.

Para tal efecto, los atributos incluidos en esta tabla son los siguientes:

- CARRETERA: código de la carretera a la que pertenece el tramo.
- CODIEIX: código del eje en el que se sitúa el tramo.
- TRAM: código del tramo correspondiente al tramo del Catálogo de Carreteras en el que se sitúa.
- SUBTRAM: código del subtramo correspondiente al subtramo del Catálogo de Carreteras en el que se sitúa.
- POSICIOINICI: posición métrica del inicio del tramo desde el inicio del eje.
- POSICIOFINAL: posición métrica del final del tramo desde el inicio del eje.
- CODISENTIT: código del sentido de circulación del tramo.
- DIRECCIÓN: sentido de avance del registro de tramos dentro del eje.

Los campos CARRETERA, TRAM y SUBTRAM nos permitirán relacionar esta tabla con el Catálogo de Carreteras, mientras que los campos CODIEIX, CODISENTIT, POSICIOINICI, POSICIOFINAL nos permitirán realizar procesos de segmentación dinámica.



## 7. Desarrollo del algoritmo

Para el desarrollo del algoritmo se ha utilizado la interfaz de desarrollo (GeoMedia Objects) del software GeoMedia Profesional y su módulo de gestión de redes GeoMedia Transportation Manager. GeoMedia Objects provee de acceso a las funcionalidades de análisis geográfico para el desarrollo de aplicaciones basadas en información geográfica o para la personalización del propio GeoMedia mediante el lenguaje de programación Visual Basic 6.0.

En el desarrollo del algoritmo se pueden diferenciar dos fases principales. Una primera fase, en la cual se desarrolla una primera versión del algoritmo basado en el recorrido de los tramos del Grafo de Planificación de las carreteras catalogadas, tanto en el sentido de avance del eje como en sentido contrario. Se identifican los tramos según su propiedad de virtualidad y se procesan según los siguientes criterios:

- Los tramos reales se almacenan en la nueva tabla sin ningún procesamiento especial, ya que estos sí que son potencialmente relacionables con los tramos del Catálogo de Carreteras.
- Para los tramos virtuales se calcula el camino óptimo que une los nodos inicial y final de dicho tramo. De este modo obtenemos los viales secundarios que conectan los ejes principales dentro de los nudos.

Como final de la primera fase se evalúan los resultados obtenidos de la ejecución de esta primera versión del algoritmo. Mediante una primera comprobación gráfica de los resultados se detectaron errores provocados por la no consideración de los tramos no virtuales que intersectan con los nudos, provocando un cálculo erróneo de los caminos óptimos dentro de estos nudos.

En la segunda fase de desarrollo del algoritmo, se propone una solución para la problemática encontrada en la primera versión, la cual consiste en realizar una nueva clasificación de los tramos de ambos Grafos que los divida según si estos intersectan con los nudos.

Mediante este pre procesamiento se consigue reducir al mínimo los cambios a realizar en la primera versión del algoritmo.

Se han obtenido un total de 21.049 registros, con una longitud total de 13.161 Km, de los cuales, 13.688 registros se corresponden a tramos de ejes principales, con una longitud total de 12.904 Km, y 7.361 registros se corresponden a ejes secundarios, con un total de 257 Km. Esto conlleva una reducción de la longitud del Catálogo de Carreteras de 49 Km, lo que se corresponde al 0,42% de dicha longitud.

## 8. Diseño y desarrollo de la aplicación web

En este apartado se presenta la aplicación web desarrollada para la visualización de los resultados obtenidos y los análisis que se han llevado a cabo de los mismos, los cuales se detallan en el siguiente capítulo.

La aplicación web consiste en un visor de mapas que nos permite visualizar los resultados obtenidos y las diferencias con el catálogo de carreteras mediante una vista general, en la cual se visualiza el Catálogo de Carreteras a escalas pequeñas y los nuevos tramos obtenidos a escalas grandes.

También se han implementado cuatro vistas para los distintos análisis llevados a cabo para la evaluación y justificación de los resultados.

Dicha aplicación ha sido desarrollada mediante las siguientes tecnologías:

- Leaflet: librería JavaScript aplicada a la visualización de mapas en internet.
- Mapbox: proveedor en línea de mapas personalizados para sitios web, basados en los datos abiertos de OpenStreetMap y la NASA.
- CartoDB: plataforma de software como servicio que proporciona herramientas GIS para la producción de mapas y su posterior visualización en navegadores web.

Esta aplicación está disponible en la siguiente dirección web: <https://visorgraf-joamajor.c9users.io>.

## **9. Análisis de los resultados**

Se han propuesto cuatro casos de estudio relacionados con la problemática expuesta en este proyecto, las cuales nos sirven para justificar la elaboración del mismo.

Estos casos de estudio están relacionados con la información proveniente de los distintos servicios existentes en la DGIMT y la repercusión en términos de valoración económica que produce la introducción de los tramos obtenidos en el Grafo de Carreteras.

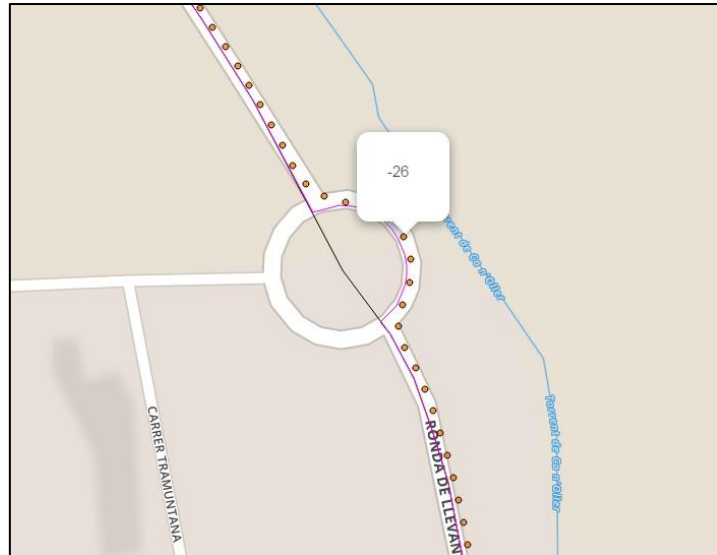
### **9.1. Análisis del radio de curvatura**

En este apartado se toman como valores a analizar los datos referentes a los radios de curvatura de los ejes, los cuales son primordiales en casos de transporte de mercancías mediante vehículos de transporte de movilidad reducida.

Estos datos se almacenan y gestionan en el sistema de información denominado Visor de Carreteras (VIC), el cual se corresponde con una aplicación interna de la DGIMT para la visualización de datos y fotografías referentes a carreteras.

Esta información se toma mediante campañas de recolección de datos en campo, es decir, estos datos están basados en el Grafo Real. Esto implica que dichos datos no se relacionen correctamente con el Catálogo de Carreteras.

La utilización de los resultados obtenidos en el proyecto provoca una correcta asignación de dichos datos al Catálogo de Carreteras y una correcta valoración económica de los mismos trabajos de recolección de datos.



Se ha obtenido una valoración total de los trabajos de recolección de datos para el VIC de 184.449 € para la longitud calculada sobre el Catálogo de Carreteras y de 209.837 € para los tramos obtenidos en el proyecto. Esto supone un incremento en la valoración total de 25.338 €.

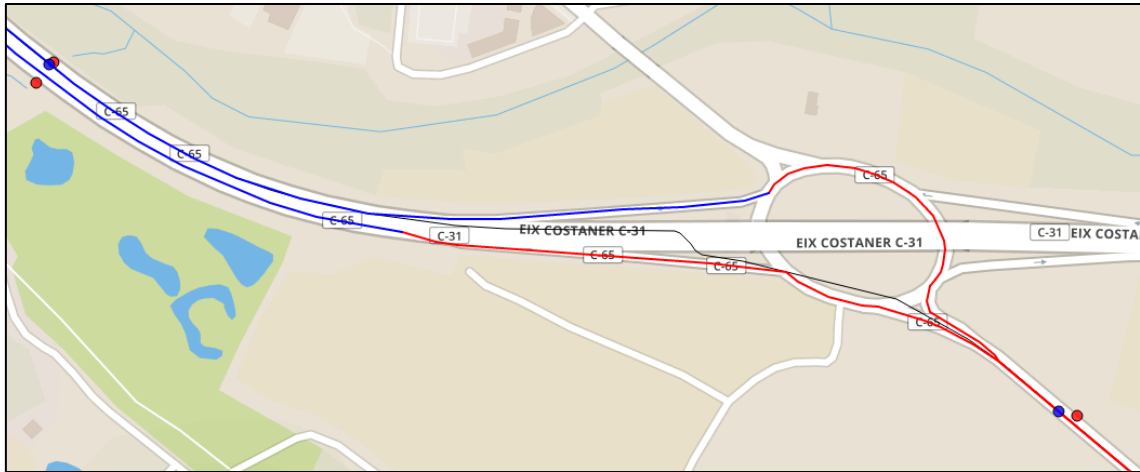
## 9.2. Análisis de los hitos kilométricos

En este caso de estudio se analizan las posiciones relativas a los hitos kilométricos, en concreto se estudia el efecto que provoca la utilización de los resultados obtenidos en el cálculo de la posición teórica de dichos hitos.

Este caso de análisis proviene de la duda existente en relación al método utilizado para posicionar los hitos kilométricos en el terreno, es decir, si se tienen en cuenta los viales secundarios que conectan los ejes.

Este hecho puede provocar un desfase en la posición de los hitos, el cual se acumulará a lo largo de la carretera y por lo tanto, en un proceso de segmentación dinámica erróneo de los eventos medidos mediante dichos hitos, como por ejemplo los accidentes de tráfico.

Se han calculado las posiciones teóricas de los hitos para una carretera en concreto, la cual presenta diversos nudos de conexión a lo largo de su trayectoria, y se ha comprobado que dichas posiciones coinciden con una tolerancia de  $\pm 10$  metros a lo largo de toda la carretera.



### 9.3. Análisis del recorrido de las máquinas quitanieves

Uno de los trabajos realizados sobre la red de carreteras y valorado en DGIMT es la limpieza que realizan las máquinas quitanieves en las carreteras durante la temporada de nevadas. Dicha valoración se realiza teniendo en cuenta la distancia recorrida por dichas máquinas a lo largo de una jornada.

Para tal efecto disponemos de los datos GPS de las posiciones a lo largo del camino recorrido, tomadas con un intervalo de tiempo determinado. Estos datos nos permiten obtener la distancia recorrida mediante el cálculo del camino óptimo que une estas posiciones, tanto en el Grafo de Planeamiento como en el Grafo Real.



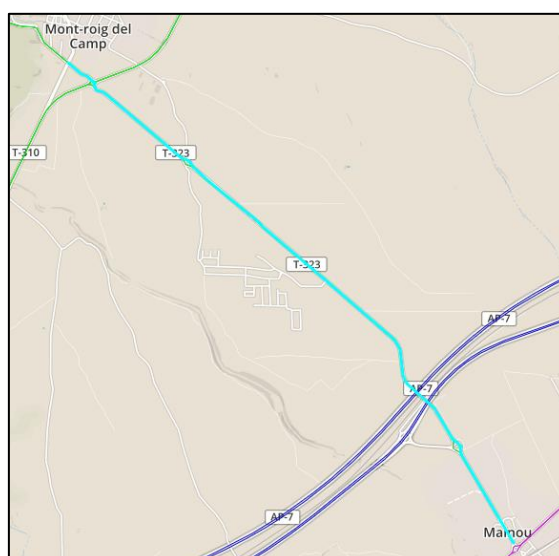
En este sentido, los resultados obtenidos nos permiten relacionar los segmentos del camino calculado sobre el Grafo Real y la información sobre las carreteras recorridas, contenida en el Catálogo de Carreteras. Esta relación nos permitirá calcular la proporción del valor económico para cada una de las carreteras recorridas, y por lo consiguiente para cada organismo competente.

## 9.4. Análisis sobre la valoración de proyectos

El respectivo servicio de la DGIMT encargado de la valoración de los distintos proyectos y obras ejecutadas sobre la red de carreteras tiene a su disposición una base de datos denominada Proyectos y Obras (PIO), en la cual se recogen todas las actuaciones ejecutadas o planificadas y sus principales propiedades de planificación.

El problema que nos encontramos a la hora de valorar los distintos proyectos viene dado por la propia definición de los tramos asignados a estos. El LRS definido está pensado para geolocalizar los tramos sobre el Catálogo de Carreteras, es decir, sobre el Grafo de Planificación, lo que conlleva una acumulación de errores en la longitud del proyecto, y por lo tanto en su valoración, debido a la no consideración de las vías secundarias.

Este problema se soluciona utilizando como LRS los tramos calculados en este proyecto, los cuales incorporan las vías secundarias que dan continuidad a los ejes principales dentro de los nudos.



Para el ejemplo calculado en este apartado, correspondiente a un proyecto de reforzamiento de firmes en la carretera T-323 con una valoración de 752.000 € (150,4 €/Metro), se obtiene una discrepancia en la valoración de 1.143 €, correspondiente a una disminución de la longitud de 7,6 metros.

## **10. Conclusiones**

Se valoran positivamente los resultados obtenidos, los cuales permitirán realizar correctamente ciertos procesos llevados a cabo en la DGIMT, tal como se ha demostrado en el capítulo anterior mediante la realización de los cuatro casos de análisis presentados.

Los resultados nos permiten afirmar que la problemática expuesta, correspondiente a la relación de la información proveniente de la realidad de la Red de Carreteras de Cataluña y los eventos que en ella se dan, sintetizada mediante el Grafo de Carreteras y los diversos sistemas de información existentes en la DGIMT, y la información disponible en el Catálogo Oficial de Carreteras queda solucionada parcialmente mediante la implementación de los resultados obtenidos en el mismo Grafo de Carreteras.

De los mismos resultados surge una nueva meta a alcanzar en la DGIMT. Como se ha comentado en apartados anteriores los resultados obtenidos no contemplan todas las vías secundarias existentes en el territorio, debido a que los ramales que conectan ejes con codificación diferente no son procesados por el algoritmo desarrollado. Una posible solución que se podría contemplar es la realización de un catálogo de vías secundarias, en el cual se contemplen las principales características técnicas y funcionales de dichos viales. Este posible catálogo podría complementar tanto el Catálogo de Carreteras como los tramos obtenidos en este proyecto.

Por lo que respecta a los valores obtenidos por el autor de este documento durante la realización del proyecto, podemos afirmar que se han afianzado y obtenidos nuevos conocimientos relacionados con los SIG y la programación orientada al análisis de información geográfica.