

Servicio web de análisis de redes en sistemas de información geográfica

Miguel R. Luaces, José R. Paramá, Diego Seco Naveiras

Laboratorio de Bases de Datos
Universidade da Coruña
Campus de Elviña S/N
{luaces, parama, dseco}@udc.es

Resumen

En este artículo presentamos un sistema para realizar análisis de redes en Sistemas de Información Geográfica (SIG). La arquitectura del sistema es conforme a las propuestas de los organismos internacionales ISO y *OpenGeospatial Consortium*. Siguiendo el ejemplo de otros servicios estandarizados por estos organismos, como el WMS o el WFS, la arquitectura contempla el desarrollo de un servicio web para ofrecer toda la funcionalidad de manera remota.

El análisis de redes en el contexto de los SIG es una necesidad reconocida por los organismos internacionales citados pero que no está implementada en ninguna de las herramientas SIG de procesado y visualización de información geográfica más comunes. Algunos ejemplos de técnicas de análisis que se pueden aplicar son el cálculo de la ruta más corta en redes de carreteras, el cálculo de la facilidad de acceso a núcleos de población o la modelización del flujo de agua en redes de abastecimiento. Para que estas técnicas de análisis se puedan llevar a cabo es muy importante que los pesos de los arcos del grafo definido por la red espacial puedan ser ponderados utilizando características específicas de los elementos geográficos. Muchas de las técnicas de análisis que acabamos de citar se estudian dentro de otros campos como la Investigación Operativa pero los trabajos llevados a cabo en este campo son ajenos a los SIG y se necesita un gran esfuerzo para conectar los productos desarrollados en cada una de las áreas.

En el diseño de la arquitectura se emplearon patrones arquitectónicos y de diseño para obtener una arquitectura modular, robusta y fácilmente extensible. La arquitectura se compone de tres módulos principales. El módulo más importante que implementa toda la funcionalidad es el módulo de análisis de redes (NAM). Sobre el NAM se asienta otro módulo que permite su integración en herramientas de procesado y visualización de información geográfica (como JUMP o gvSIG) y un servicio web que ofrece su funcionalidad de manera remota.

La arquitectura es extensible sobre todo en dos puntos. En primer lugar, es extensible en cuanto a las fuentes de datos para obtener la información geográfica. La información geográfica puede estar contenida en bases de datos, ficheros planos, ficheros *shapefile*, etc. Se desarrollaron componentes de acceso a datos para acceder a las fuentes de información más comunes y se crearon interfaces fácilmente extensibles para acceder a otras fuentes de datos. En segundo lugar, es extensible en cuanto al mecanismo de pesado de los arcos que componen la red. Para representar el peso de un arco se diseñó una jerarquía que representa una fórmula evaluable. También se diseñó una jerarquía paralela para realizar el análisis sintáctico del XML donde se especifica la fórmula. Ambas

jerarquías están conectadas y son fácilmente extensibles.

El sistema se integró en dos herramientas de procesamiento y visualización de información geográfica, JUMP y gvSIG. También se realizó la integración del servicio web en un visor web de información geográfica. La validación se realizó con datos geográficos proporcionados por la *Biblioteca Virtual Galega* (BVG). Esta validación permitió detectar deficiencias en la cartografía digitalizada abriendo una nueva línea de trabajo en el desarrollo de herramientas para mejorarla.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis de redes, servicios web, Open Geospatial Consortium (OGC).

1 Introducción

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) [1] constituyen un área de rápido desarrollo dentro de la informática y ofrecen métodos sumamente innovadores para hacer frente a algunas demandas técnicas que constituyen un reto. Las mejoras recientes en el hardware han hecho posible que la implementación de este tipo de sistemas sea abordable por muchas organizaciones. Además, se ha llevado a cabo un esfuerzo colaborativo por dos organismos internacionales (ISO [2] y el Open Geospatial Consortium [3]) para definir estándares y especificaciones para la interoperabilidad de los sistemas. Este esfuerzo ha hecho posible que muchas organizaciones públicas estén trabajando en la construcción de infraestructuras de datos espaciales [4] que les permitirán compartir su información geográfica.

Dentro de los SIG un campo de aplicación muy importante es el análisis de redes a partir de la información geográfica que las representa (por ejemplo, redes de carreteras, redes de abastecimiento de agua, redes de telecomunicaciones, etc.). El cálculo de la ruta más corta en redes de carreteras, el cálculo de la facilidad de acceso a núcleos de población o la modelización del flujo de agua en redes de abastecimiento son sólo algunos ejemplos de las técnicas de análisis que se pueden aplicar. Para que estas técnicas de análisis se puedan llevar a cabo es muy importante que los pesos de los arcos del grafo definido por la red espacial puedan ser ponderados utilizando características específicas de los elementos geográficos (por ejemplo, tipo y estado de la carretera, diámetro de la tubería, etc.).

Por otro lado, muchas de estas técnicas son bien conocidas y están muy estudiadas dentro de otras áreas de conocimiento como la Investigación Operativa. Existen muchos artículos publicados sobre trabajos relacionados con algoritmos de redes, obtención de rutas de peso mínimo, variantes del problema del viajante (TSP), etc. En los últimos años áreas tan novedosas como la Vida Artificial también están abordando este tipo de problemas obteniendo soluciones muy eficientes a los mismos. Como trabajos más relevantes en esta área podemos citar los de Marco Dorigo sobre colonias de hormigas artificiales para resolver el problema del viajante [5]. Sin embargo, estos trabajos se están desarrollando independientemente del mundo SIG. Se desarrollan productos pensando únicamente en grafos con pesos asociados a sus arcos y es necesario realizar un gran esfuerzo para combinar los productos software desarrollados en cada área.

Se han desarrollado muchas librerías y productos software libre tanto para SIG como para el manejo de grafos. Por una parte, en el área de los SIG se han desarrollado herramientas para el almacenamiento, procesamiento y visualización de la información geográfica. Ejemplos de estas

herramientas son el Sistema Gestor de Bases de Datos PostgreSQL [6] extendido con el módulo para información geográfica PostGIS [7], la herramienta de visualización y procesamiento de información geográfica *Java Unified Mapping Platform* (JUMP) [8] o la herramienta de manejo de información geográfica desarrollada por la *Generalitat Valenciana* gvSIG [9]. Por otra parte, en el área de la Investigación Operativa y manejo de grafos podemos citar la librería *Java Universal Network/Graph Framework* (JUNG) [10] que proporciona un lenguaje común y extensible para modelar, analizar y visualizar datos que pueden ser representados como un grafo.

En este artículo se presenta un proyecto para realizar análisis de redes en SIG a través de un servicio web. Este trabajo, desarrollado en el *Laboratorio de Bases de Datos* de la *Universidad de A Coruña*, pretende cubrir una funcionalidad que se reconoce muy útil y necesaria en el área de los SIG pero que no se incluye todavía en ninguna de las herramientas SIG más comunes. El análisis de redes incluye tanto análisis sencillos, como puede ser el cálculo de rutas y distancias, como análisis complejos, del estilo de cálculos de accesibilidad y conectividad. Además, el trabajo realizado está enmarcado en el contexto actual de los SIG, por lo que, siguiendo el camino abierto por el OGC en especificaciones como el *Web Map Service* (WMS) [11] o el *Web Feature Service* (WFS) [12], se define un servicio web que permite acceder a esta funcionalidad de manera remota. Se emplean estándares siempre que es posible (por ejemplo, se emplea GML para representar información geográfica y se utilizan los tipos de datos reflejados por el OGC para trabajar con objetos geográficos).

El resto de artículo está organizado de la siguiente forma. Primero, se describen algunos conceptos básicos y trabajo relacionado en la Sección 2. A continuación, en la sección 3, presentamos la arquitectura general del sistema y describimos brevemente sus componentes. La arquitectura se estructura en torno a un componente que permite gestionar y realizar análisis sobre redes, denominado *Network Analysis Module* (NAM). Sobre este componente se asienta un servicio web, denominado *Web Network Service* (WNS), que permite el acceso a su funcionalidad de manera remota y un módulo que permite su integración en herramientas de visualización y procesamiento de información geográfica (JUMP, gvSIG, UDIG, etc.). Estos tres componentes son descritos en más detalle en las secciones 4, 5 y 6 respectivamente. La Sección 7 presenta algunos resultados de la implementación y validación realizadas. Finalmente, la Sección 8 presenta algunas conclusiones y futuras líneas de trabajo.

2 Trabajo relacionado

Una de las bases sobre las que se asienta el trabajo presentado en este artículo es la teoría de grafos. La teoría de grafos tiene unos fuertes fundamentos matemáticos que no podemos explicar en este artículo. En [13] pueden encontrarse definiciones formales a la mayoría de los conceptos que se explicarán de manera más informal a continuación. Analizaremos el contexto en el que se enmarca este trabajo describiendo los detalles más relevantes en cuanto a manejo de grafos.

En primer lugar, analizando el tipo de redes con las que estamos interesados en trabajar en SIG (redes de carreteras, redes de abastecimiento de agua, etc.) se puede observar la característica de direccionalidad en los arcos que componen la red. Por tanto, el primer concepto que se debe tener en cuenta es que los grafos que emplearemos serán *grafos dirigidos* o *dígrafos*. Otra característica de interés es que el *grafo* debe ser *pesado* o *ponderado*; es decir, los arcos que componen la red tienen un peso asociado. Por ejemplo, en una red de carreteras debe ser posible asignar un peso a cada carretera en función de su estado, su longitud y otros parámetros que para el caso concreto se consideren de interés. También es importante tener en cuenta que el *grafo* es *disperso*, cada vértice tiene pocos vecinos. Se entiende por *vecino* de un vértice aquel otro vértice alcanzable mediante

algún camino de longitud 1. Por último, el grafo debe permitir que se puedan obtener *caminos de peso mínimo* en él. Debe cumplir las precondiciones de algoritmos que permiten obtener esos caminos más cortos tales como el *Algoritmo del camino más corto de Dijkstra* [14].

Existen muchas librerías de software libre que dan soporte a los conceptos y algoritmos que acabamos de introducir. En el trabajo que presentamos se emplea JUNG [10]. JUNG es una librería de código abierto que proporciona un lenguaje común y extensible para modelar, analizar y visualizar datos que pueden ser representados como un grafo. Está escrito en Java lo que permite a las aplicaciones basadas en JUNG hacer uso de las características intrínsecas del API de Java. La arquitectura de JUNG está diseñada para soportar gran variedad de representaciones de entidades y sus relaciones, tales como grafos dirigidos y no dirigidos. Proporciona un mecanismo para anotar los grafos, entidades y relaciones con metadatos. Además, la distribución actual de JUNG incluye la implementación de una serie de algoritmos de la teoría de grafos, *data mining*, análisis de redes sociales y, lo más interesante de cara a este trabajo, cálculo de distancias en redes. En este trabajo se emplea JUNG como una caja negra que oculta toda la teoría de grafos. Se extienden los conceptos de grafo, arco y vértice para adaptarlos al dominio de los SIG (se complementan con la información geográfica asociada) y se emplea el API de JUNG directamente para realizar operaciones sobre ese grafo extendido, como la obtención de la ruta más corta entre dos vértices.

Por otra parte, siguiendo el ejemplo de otros estándares como el WMS o el WFS nuestro trabajo proporciona acceso a la funcionalidad de análisis de redes a través de un servicio web. Sin embargo, no es el objetivo de este artículo hacer una explicación exhaustiva acerca de los servicios web. A modo de introducción se puede decir que un servicio web es un componente software accesible mediante los protocolos de comunicación estándares para el Web que recibe peticiones y envía las correspondientes respuestas mediante el uso de una serie de protocolos estandarizados basados en XML.

En la implementación de un servicio web se necesita definir un protocolo de comunicación de datos y un protocolo de definición del servicio. En este trabajo se ha utilizado *Simple Object Access Protocol* (SOAP) [15] como protocolo de comunicación de datos y *Web Services Description Language* (WSDL) [16] como protocolo de definición de servicio. Además, se ha utilizado *Java API for XML-based RPC* (JAX-RPC) [17] que es un software que genera automáticamente código fuente para el servicio a partir de su definición WSDL. SOAP es un protocolo basado en XML para el intercambio de información en un entorno distribuido estandarizado por el W3C [18]. A nivel conceptual permite enviar peticiones y respuestas en XML sobre HTTP, que es la alternativa más usual, o sobre SMTP. WSDL es un dialecto de XML que permite especificar las operaciones y tipos de datos de un servicio web y que, al igual que SOAP, está estandarizado por el W3C. En un documento WSDL se definen los tipos de datos, los mensajes, los tipos de puertos (interfaces que expone el servicio), los *bindings* (protocolo y formato de datos para cada tipo de puerto) y los servicios que expone el servicio web. Por último, JAX-RPC es un API de programación estandarizado como parte de J2EE que facilita el envío y recepción de mensajes. Al estar basado en *Remote Procedure Calls* (RPC) proporciona una comunicación síncrona que es la más empleada hoy en día. Existen varias implementaciones de este API entre ellas la empleada en este proyecto, Apache-Axis [19].

3 Arquitectura del sistema

La Figura 1 muestra nuestra propuesta para la arquitectura de un servicio de análisis de redes en Sistemas de Información Geográfica. La arquitectura se diseñó empleando patrones arquitectónicos y de diseño [20][21][22] para obtener como resultado una arquitectura modular, robusta y

fácilmente extensible. El sistema se estructura en torno a un componente, denominado *Network Analysis Module* (NAM), que implementa toda la funcionalidad necesaria para gestionar y realizar análisis sobre redes. Una de sus características principales es la extensibilidad en cuanto a las fuentes de datos a las que puede acceder (bases de datos, ficheros *shapefile*, ficheros GML, etc.). Esto se refleja en la parte inferior derecha de la figura donde se representan varias fuentes de datos y el módulo extensible de acceso a esas fuentes. La parte inferior izquierda de la figura representa la base de datos en la que el NAM almacena el grafo y todos sus metadatos.

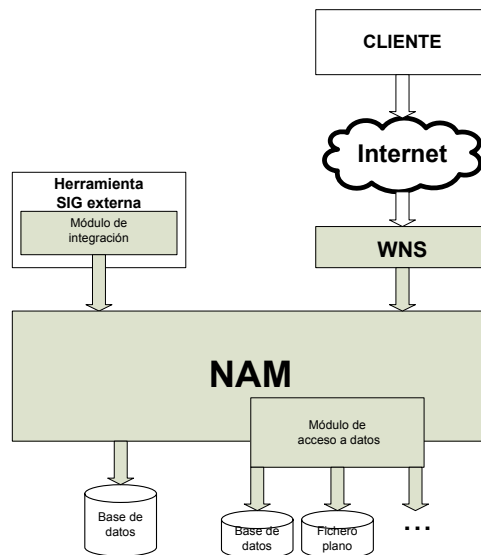


Figura 1. Arquitectura general

Sobre el componente principal se asientan dos módulos que implementan dos posibles modos de empleo del componente principal. En la parte superior izquierda se muestra un módulo que permite la integración en herramientas de visualización y procesamiento de información geográfica (JUMP, gvSIG, UDIG, etc.). El otro módulo, representado en la parte superior derecha, es un servicio web denominado *Web Network Service* (WNS) que permite el acceso a la funcionalidad de análisis de redes de manera remota. Se pueden implementar de manera sencilla clientes que accedan a este servicio a través de Internet empleando un *Proxy* [20] remoto.

El protocolo para el flujo de datos de la arquitectura establece una comunicación entre los módulos de interfaz (módulo de integración en herramientas externas y WNS) y el NAM mediante un lenguaje XML diseñado para realizar la configuración del sistema. Las respuestas del sistema también serán mediante XML o GML en caso de que la respuesta contenga información geográfica.

4 Módulo de Análisis de Redes

El módulo de análisis de redes (NAM) es el encargado de implementar toda la funcionalidad para realizar análisis de redes en SIG. Esta funcionalidad abarca desde la construcción del grafo a partir de la información geográfica que se indique hasta la obtención de rutas de peso mínimo. A continuación se van a explicar brevemente las características más importantes de este módulo.

En primer lugar, el NAM permite construir redes a partir de información geográfica contenida en fuentes de datos diversas, desde una base de datos relacional hasta ficheros planos. Dado que sería

imposible realizar una implementación capaz de obtener los datos para construir las redes de cualquier fuente de datos se realizó un diseño extensible en ese sentido. El módulo proporciona una implementación por defecto para obtener los datos de una base de datos relacional con extensión para información geográfica conforme al estándar *Simple Features for SQL* del OGC [23] y proporciona también interfaces fácilmente extensibles para acceder a otras fuentes de datos.

En segundo lugar, los arcos que forman la red pueden ser ponderados en función de diversos factores y atributos de los objetos que los originan. Se realizó también un esfuerzo para la extensibilidad del módulo en este sentido. En la Figura 2 se representa una parte de la vista estática del componente encargado de realizar el pesado de arcos. El peso de cada arco se representa con una fórmula evaluable, la cual denominamos *WeightFormula*. Para diseñar esta fórmula se empleó una jerarquía fácilmente extensible siguiendo el patrón de diseño *Composite* [20]. Una fórmula válida está formada por un literal, una propiedad u operaciones sobre otras fórmulas válidas. Paralelamente a esta jerarquía se diseñó otra siguiendo el patrón de diseño *Chain of Responsibility* [20] que se encarga de analizar sintácticamente el XML donde se define la fórmula e instanciar el objeto compuesto adecuado. Este diseño a nivel global donde una jerarquía se encarga de instanciar a la otra sigue el patrón de diseño *Factory Method* [20].

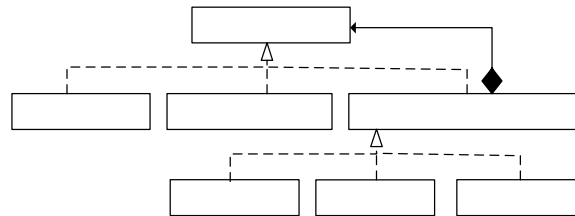


Figura 2. Jerarquía de ponderación de arcos

La Figura 3 presenta un ejemplo real de *WeightFormula*. El contexto donde podría ser válida esta fórmula supone la existencia de una base de datos de carreteras en la cual entre los atributos de la carretera se encuentran su geometría (*the_geom*) y un factor numérico que representa el estado de la carretera (*state*). La fórmula para ponderar los pesos de los arcos que representa la figura es $1.5 * length(the_geom) + state$ y supone que *state* toma valores pequeños para carreteras en buen estado.

```
<weightFormula type="sum">
  <weightFormula type="mult">
    <weightFormula type="literal" param="1.5"/>
    <weightFormula type="dbAttribute" param="length(the_geom)"/>
  </weightFormula>
  <weightFormula type="dbAttribute" param="state"/>
</weightFormula>
```

Figura 3. XML ejemplo de *WeightFormula*

En este ejemplo se emplean dos *WeightProperty*, el estado y la longitud de la carretera. Una propiedad puede ser un atributo de una base de datos (por ejemplo, *state*), una operación sobre el mismo (por ejemplo, *length(the_geom)*), etc.

Para extender el sistema en este punto se deben acometer dos acciones. Primero, extender la

WeightFor
WeightProp
WeightMult

jerarquía de la *WeightFormula* con la nueva operación o tipo de dato definiendo su mecanismo de evaluación. Segundo, extender el analizador sintáctico para que reconozca el nuevo elemento como parte de una fórmula válida y sea capaz de instanciarlo. Siguiendo con el ejemplo de la figura, si el estado de la carretera estuviese determinado por un atributo alfanumérico, sería muy sencillo implementar un operador *switch* que realizase la conversión. Este operador *switch* es mucho más reutilizable que otras alternativas como la implementación de un objeto de acceso a datos a medida o la creación de una vista sobre la tabla de la base de datos.

En último lugar, una vez que está construido el grafo y los arcos tienen un peso asignado se pueden ejecutar técnicas de análisis sobre el grafo. Como ya se ha descrito en una sección anterior para el manejo de grafos empleamos JUNG. Nuestra implementación extiende los conceptos de grafo, arco y vértice de esta librería para complementarlos con la información geográfica del SIG. Por tanto, se pueden emplear directamente las técnicas de análisis que implementa esta librería. Un ejemplo de aplicación es la obtención de la ruta de peso mínimo entre dos puntos siguiendo una red de carreteras. En la interfaz de visualización del SIG se señalará el punto de origen y el punto de destino. El sistema traducirá estos puntos a sus vértices más próximos y obtendrá la ruta de peso mínimo entre ellos. El resultado se puede visualizar de nuevo en el SIG representando las geometrías asociadas a los arcos que componen el camino de peso mínimo.

5 Servicio Web de Análisis de Redes

El *Web Network Service* (WNS) se ha desarrollado para seguir la tendencia actual marcada por los organismos de estandarización ISO y OGC pudiendo de este modo integrarse en la arquitectura colaborativa que estos organismos proponen para los SIG. Sigue el ejemplo de otros servicios estandarizados como el WMS o el WFS.

La interfaz del servicio proporciona acceso a toda la funcionalidad del módulo de análisis de redes sobre el que está construido. Esta funcionalidad incluye la gestión de redes (creación, búsquedas, borrados, etc.), la inserción de componentes (arcos y vértices) desde distintas fuentes de datos, la aplicación de técnicas de análisis, etc.

Algunos de los casos de uso enumerados requieren especificar bastantes parámetros de configuración para ser ejecutados. Por ejemplo, para insertar arcos en una red se debe especificar, además de la red en la que se desean insertar, la fuente de datos (por ejemplo, una base de datos accesible en una determinada URL, con un nombre de usuario y su contraseña), las geometrías que van a dar lugar a los arcos (por ejemplo, cierto atributo de una tabla disponible en la base de datos antes configurada), la expresión para la obtención de los pesos de los arcos, etc. Para indicar esta configuración el protocolo de comunicación de la arquitectura establece la definición de un lenguaje XML para la especificación de estos parámetros.

Por motivos de eficiencia se desarrolló un mecanismo de caché de redes para no tener que acceder a la base de datos cada vez que un usuario desea realizar una operación sobre una red. Dada la naturaleza multiusuario del servicio se implementó un mecanismo de manejo de la concurrencia en el acceso a la caché. El empleo del patrón de diseño distribuido *Read/Write Lock* [21] permite que el sistema sea muy eficiente en el acceso a la caché. Este patrón permite lecturas concurrentes y exclusividad en escritura. Se realizó la implementación de este patrón a nivel de cada red en la caché debido a que hacerlo a nivel caché implicaría que mientras que se está modificando una red no se puede realizar la lectura de ninguna otra, por lo que la eficiencia global del sistema sería mucho menor.

La tecnología que permite la comunicación (en este caso SOAP combinado con WSDL) debe ser totalmente transparente para los clientes. Los clientes deben trabajar del mismo modo que si lo estuviesen haciendo contra un sistema local. Para lograr este objetivo se desarrolló un *Proxy* [20] que encapsula la tecnología empleada para la comunicación remota. Esto permite que los clientes del servicio puedan ser desarrollados por personas sin conocimientos sobre servicios web haciendo mucho más accesible el WNS.

6 Integración en una herramienta de visualización

Existen muchas herramientas de software libre que permiten visualización y procesamiento de información geográfica. En esta sección presentamos cómo se realizó la integración del Módulo de Análisis de Redes en dos de ellas: JUMP y gvSIG. Ambas herramientas, a pesar de ser muy similares, tienen sus particularidades en cuanto a interfaz de usuario y mecanismo de extensión. El módulo de integración debe tener en cuenta estos dos aspectos. En cuanto a interfaz de usuario, la funcionalidad nueva debe resultar lo más natural posible para los usuarios habituales de la herramienta. Por ello se deben considerar las particularidades de cada una de las interfaces y se debe adaptar la nueva funcionalidad lo mejor posible. En cuanto al mecanismo de extensión, cada herramienta proporciona su propio mecanismo a pesar de tener un procedimiento de extensión similar. El procedimiento para extender las herramientas consiste en desarrollar unos adaptadores que implementen la interfaz de extensión que proporcionan delegando la funcionalidad, en este caso, en el NAM. Los adaptadores y el módulo que implementa la funcionalidad deben ser empaquetados en un jar que se copia a un directorio específico de la aplicación.

En la Figura 4 se presenta una captura de pantalla de la herramienta JUMP con el Módulo de Análisis de Redes integrado en ella. En el menú se puede observar la entrada *Network Analysis Module*, esta opción da acceso a las funcionalidades de creación de red, inserción de arcos y vértices, búsquedas de redes, etc. En la barra de herramientas las dos más a la derecha ejecutan la búsqueda de la ruta más corta entre dos puntos, la primera de ellas, y la búsqueda de rutas entre un origen y un destino pasando por ciertos puntos, la segunda. La ventana modal *Paths Found* muestra los resultados de la ejecución en cuanto a longitud y peso de la ruta. También se puede observar cada ruta obtenida en una nueva capa de la ventana de mapa.

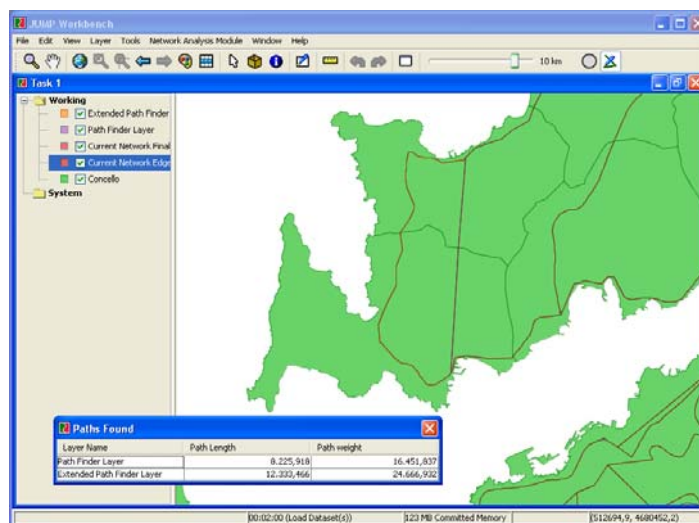


Figura 4. Integración en JUMP

7 Implementación y validación

La implementación y validación experimental del sistema se realizó con datos de las carreteras de la comunidad autónoma de Galicia proporcionados por la *Biblioteca Virtual Galega* (BVG) [24]. En la Figura 5 puede observarse una captura de pantalla del WNS integrado en un visor web de información geográfica desarrollado también en el *Laboratorio de Bases de Datos* de la *Universidad de A Coruña*.

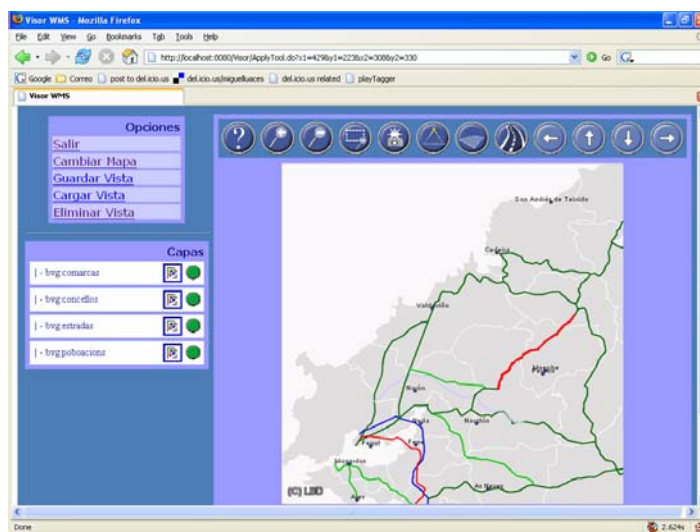


Figura 5. Integración en un visor web de información geográfica

En la actualidad este sistema no está operativo con la cartografía proporcionada por la BVG debido fundamentalmente a problemas con la digitalización de la cartografía. El problema principal que se descubrió es de conectividad. Las geometrías de las carreteras no llegan a intersecar en muchos cruces donde deberían hacerlo. El sistema nos permitió comprobar estas deficiencias en la cartografía y se está trabajando en el desarrollo de herramientas que permitan mejorar su digitalización.

8 Conclusiones y trabajo futuro

En este artículo se ha presentado una arquitectura de sistema para realizar análisis de redes en SIG. En el diseño de esta arquitectura se han empleado patrones arquitectónicos y de diseño obteniendo como resultado una arquitectura robusta, modular y fácilmente extensible. Esta extensibilidad permite el acceso a diversas fuentes de datos para la obtención de la información geográfica que origina las redes. También permite una configuración total del mecanismo de pesado de los arcos que componen la red mediante una fórmula parametrizable. Siguiendo la tendencia actual en los SIG la arquitectura contempla un servicio web de análisis de redes siguiendo el ejemplo de otros estandarizados como el WMS o el WFS.

La implementación y validación experimental del sistema con datos de la BVG nos permitió observar uno de los principales problemas en los SIG, la conectividad de las geometrías. La calidad

de la cartografía digitalizada es mucho más baja de lo que sería deseable aunque se está mejorando sustancialmente con el empleo del GPS en el proceso de digitalización.

Entre las futuras líneas de trabajo se encuentra, en primer lugar, finalizar el desarrollo de herramientas que permitan mejorar la calidad de la cartografía. Esto permitirá que se pueda dar acceso al público al WNS con la cartografía de la BVG. En segundo lugar, planeamos la implementación de componentes de acceso a datos para otras fuentes de datos (por ejemplo, ficheros *shapefile*). También pensamos hacer uso de la facilidad de extensión de la herramienta para desarrollar nuevos operadores de pesado de arcos (por ejemplo, el ya comentado operador *switch*). Son posibles futuras mejoras de los componentes desarrollados principalmente en cuanto a optimizaciones del consumo de memoria y mecanismo de caché. Otra línea de trabajo futuro podría ser la exploración de técnicas novedosas, como colonias de hormigas virtuales, para la obtención de rutas de peso mínimo. Finalmente, es posible su implantación en sistemas SIG reales (por ejemplo, en ideAC [25]).

Referencias

- [1] M. F. Worboys. *GIS: A Computing Perspective*. Taylor & Francis, 1995. ISBN: 0-7484-0065-6.
- [2] Geographic information – reference model. International Standard 19101, ISO/IEC, 2002.
- [3] OpenGIS Reference Model. OpenGIS Project Document 03-040, Open GIS Consortium, Inc., 2003.
- [4] Global Spatial Data Infrastructure Association. Accedido en la URL <http://www.gsdi.org/>.
- [5] M. Dorigo y L. M. Gambardella. *Ant colonies for the travelling salesman problem*. BioSystems, volumen 43, páginas 73 – 81, 1997.
- [6] PostgreSQL. Accedido en la URL <http://www.postgresql.org>.
- [7] PostGIS. Accedido en la URL <http://postgis.refractor.net>.
- [8] JUMP. Accedido en la URL <http://www.vividsolutions.com/jump>.
- [9] gvSIG. Accedido en la URL <http://www.gvsig.gva.es>.
- [10] JUNG. Accedido en la URL <http://jung.sourceforge.net>.
- [11] Open Geospatial Consortium, Inc. Web Map Service (WMS) Implementation Specification. Accedido en la URL http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=5316.
- [12] Open Geospatial Consortium, Inc. Web Feature Service (WFS) Implementation Specification. Accedido en la URL http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=8339.
- [13] R. P. Grimaldi. *Matemáticas discreta y combinatoria. Una introducción con aplicaciones*. Tercera edición. Addison-Wesley Iberoamericana, 1997.
- [14] E. W. Dijkstra. *A note on two problems in connexion with graphs*. Numerische Mathematik, 1:269-271, 1959.
- [15] Simple Object Access Protocol (SOAP) 1.1. Accedido en la URL <http://www.w3.org/TR/2000/NOTE-SOAP-20000508/>.
- [16] Web Services Description Language (WSDL) 1.1. Accedido en la URL <http://www.w3.org/TR/wsdl>.
- [17] JAX-RPC Project. Accedido en la URL <https://jax-rpc.dev.java.net/>.
- [18] W3C. World Wide Web Consortium. Accedido en la URL <http://www.w3.org/>.
- [19] Apache-AXIS. Accedido en la URL <http://ws.apache.org/axis/>.
- [20] E. Gamma, R. Helm, R. Johnson y J. Vlissides. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-oriented Software*. Addison-Wesley, 1996.
- [21] M. Grand. *Patterns in Java*. Volume 1. John Wiley & Sons, 1998.
- [22] D. Alur, J. Crupi y D. Malks. *Core J2EE Patterns*. Prentice Hall, 2003.
- [23] Open Geospatial Consortium, Inc. Implementation Specification for Geographic

- information - Simple feature access - Part 2: SQL option (SFS). Accedido en la URL http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=13228.
- [24] Biblioteca Virtual Galega. Accedido en la URL <http://bvg.udc.es>.
- [25] Información en la web de la EIEL de la Diputación de A Coruña (<http://www.dicoruna.es/webeiel/>).