

A spatial graph model for managing service networks in geographical information systems

Jonás A. Montilva C.

*Grupo de Investigación en Ingeniería de Datos y Conocimiento (GIDyC),
Departamento de Computación, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. E-mail: jonas@ing.ula.ve*

Abstract

Representing, manipulating and visualizing service networks in geographical information systems have been usually performed through vector-based and raster spatial data models. These models have limited semantic expressiveness for modeling service networks. The spatial properties of the entities (nodes and arcs/edges) of a network are simplified by a geometric graph made of points and lines. On the other hand, the non-spatial properties of a network are managed separately from the spatial properties, which forces the user to become familiar with two different modeling notations. This paper introduces an object model for representing, manipulating and visualizing service networks in 2D and 3D. The model is based on the notion of spatial graph, which emerged from the integration of geometric graphs and spatial objects. The distinguished feature of the model is its ability to capture the geometrical and topological properties of a service network and express them in a direct, natural and simple manner.

Key words: Geographical information systems, spatial databases, object-oriented models

Un modelo de grafos espaciales para la gestión de redes de servicios en sistemas de información geográfica

Resumen

La representación, manipulación y visualización de redes de servicios en sistemas de información geográfica se ha realizado tradicionalmente usando los modelos de datos vectoriales y *raster*. Estos modelos tienen una capacidad semántica muy limitada para manipular redes en el computador, pues reducen la representación de las propiedades espaciales de las entidades que componen una red a un grafo geométrico formado por puntos y líneas. Por otro lado, aquellas propiedades no relacionadas con el espacio se tratan en estos modelos por separado, lo cual obliga al usuario a familiarizarse con dos notaciones diferentes, una para el manejo de datos espaciales y otra para los no espaciales. En este artículo se presenta un modelo orientado a objetos para la representación, manipulación y visualización digital en dos y tres dimensiones de redes de servicios. La base conceptual de este modelo la constituye la noción de grafo espacial, la cual emergió de la integración de los conceptos de grafo geométrico y objeto espacial. La importancia del modelo de grafos espaciales estriba en su habilidad para representar redes en una forma directa, natural y simple. El modelo contiene una colección de clases de objetos reutilizables que simplifican el modelado y manipulación de redes en el computador y mejoran significativamente su visualización en dos o tres dimensiones.

Palabras clave: Sistemas de información geográfica, bases de datos espaciales, modelos orientados a objetos.

Introducción

A finales del milenio pasado, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se convirtieron en una de las herramientas informáticas más utilizadas por ingenieros, arquitectos, geógrafos y demás profesionales afines a las ciencias de la tierra y del ambiente. Los SIG son aplicaciones informáticas que facilitan la representación, manipulación y visualización de entidades espaciales, entre las cuales se incluyen las redes de servicios.

Un SIG se desarrolla mediante la utilización de herramientas de *software* proporcionadas por empresas especializadas. La mayoría de estas herramientas emplean, para representar y manipular internamente las entidades espaciales del problema, dos tipos de modelos de datos espaciales conocidos como modelos vectoriales y modelos *teselares* o de rejilla [1, 2].

El dominio de aplicación de un SIG está compuesto por diferentes tipos de entidades espaciales relacionadas (p.ej., ríos, ciudades, límites administrativos, carreteras, redes de servicio eléctrico, telefónico y de transporte). Para representar las propiedades espaciales de estas entidades, los modelos vectoriales emplean, fundamentalmente, puntos, líneas y polígonos. En estos modelos, las redes de servicios se diseñan usando grafos geométricos cuyos nodos y arcos (o ejes) se representan mediante puntos y líneas, respectivamente. Tanto los puntos como las líneas indican la localización de los nodos y arcos en el espacio. Los grafos geométricos, aún cuando capturan la localización y topología de las entidades en el espacio, tienen muchas limitaciones para representar otras propiedades; pues no capturan, por ejemplo, propiedades geométricas, tales como la forma, dirección y orientación que tienen las entidades de la red en el mundo real.

Por otro lado, los modelos de rejillas, entre los cuales el modelo *raster* es el más conocido, representan los nodos y enlaces de una red de servicios mediante conglomerados y secuencias lineales de celdas, respectivamente. Una celda es un conjunto de *pixels* que tiene una forma poligonal, normalmente rectangular. Este tipo de modelos captura implícitamente la forma y topología de la red, pero la calidad de la representación

está restringida por el tamaño de la celda. Otra deficiencia de los modelos de rejillas es que la distinción entre los nodos y arcos de la red se pierde, lo cual dificulta la caracterización de los objetos que las celdas representan.

Además de estas limitaciones semánticas presentes en estos tipos de modelos, la representación y almacenamiento de los datos de una red se realiza, en ambos casos, mediante la separación de los atributos espaciales (i.e., localización, forma y topología de la red) de aquellos otros atributos no vinculados con el espacio, denominados atributos no espaciales, tales como la capacidad, nombre y usos de una red. Esta separación requiere que los usuarios de un SIG se familiaricen con dos notaciones diferentes: una para manipular los datos espaciales y otra para los no espaciales, lo cual, evidentemente, hace más compleja la representación y manipulación de redes en un SIG.

Recientemente, han surgido nuevos modelos de datos espaciales (véanse, por ejemplo, [2] y [3]). Estos modelos están fundamentados en la Orientación a Objetos [4], lo cual les permite resolver, en parte, los problemas semánticos antes descritos. La principal cualidad de los modelos espaciales orientados a objetos es la naturalidad con que se modela el problema. Cada entidad espacial o no-espacial del dominio de aplicación del SIG se representa mediante un objeto de *software*, el cual captura las propiedades y comportamiento de la entidad representada.

El diseño orientado a objetos de un sistema de información consiste, esencialmente, en elaborar el modelo de objetos del problema o dominio de aplicación del sistema. Un modelo de objetos es una representación de la estructura de un sistema expresada en términos de objetos, atributos, asociaciones y operaciones [5]. Un modelo de objetos está compuesto por un conjunto de clases de objetos, las cuales se relacionan entre sí a través de diferentes tipos de asociaciones, tales como asociaciones funcionales y relaciones de agregación, composición y generalización.

Un aspecto importante de los modelos de objetos es que ellos pueden ser reutilizados de una aplicación a otra, lo cual reduce significativamente el costo y tiempo de desarrollo de un sistema de información.

El modelado de redes de servicios, en particular, tiene soluciones estructurales comunes a todas las aplicaciones que involucran el uso de redes. Estos aspectos y soluciones comunes motivaron el desarrollo de este trabajo de investigación, cuyo objetivo fue el diseño de soluciones genéricas reutilizables que simplificasen el desarrollo de aplicaciones y sistemas de *software* SIG para redes de servicios.

En este artículo, se presenta un modelo genérico de objetos denominado *modelo de grafos espaciales*. El objetivo del modelo es contribuir a resolver los problemas y limitaciones semánticas, anteriormente descritas, y que son comunes a los modelos vectoriales y de rejillas. La utilidad práctica del modelo está en el proceso de diseño de aplicaciones SIG que involucren la representación de redes de servicios. Este modelo proporciona una estructura genérica del problema, la cual puede ser reutilizada para diseñar SIG en dominios relacionados con redes de servicios.

La siguiente sección de este artículo introduce los requerimientos que motivaron el desarrollo del modelo de grafos espaciales. Las tres secciones subsiguientes describen los conceptos de objeto espacial y grafo geométrico, así como la metodología empleada para integrarlos. A continuación se presentan los resultados obtenidos: la noción de grafo espacial y el modelo de objetos correspondiente. En las dos últimas secciones se discuten la aplicabilidad del modelo, su relevancia en el contexto de los SIG, sus usos futuros y las principales conclusiones del trabajo.

La Metodología de Integración

Para diseñar el modelo de grafos espaciales se empleó un método de integración conceptual desarrollado por el autor y descrito en [6] y [7]. Este método permitió la combinación sistemática de la noción matemática de grafo geométrico con el concepto de objeto espacial.

Los grafos geométricos y los objetos espaciales son dos conceptos muy diferentes. El primero de ellos es propio de la Teoría Matemática de Grafos [8]; mientras que el segundo proviene del área de Bases de Datos Espaciales [9].

El método utilizado produce un nuevo modelo de datos a partir de la integración de dos o más modelos existentes. Consta de cuatro fases:

pre-integración, análisis conceptual, comparación conceptual e integración conceptual. Estas fases fueron aplicadas a la construcción del modelo de grafos espaciales de la manera descrita a continuación:

Fase 1: Pre-integración

Esta fase consistió en establecer los requerimientos que justificasen la creación de un nuevo modelo para la representación, manipulación y visualización de redes en SIG.

Fase 2: Análisis conceptual

Para cada una de las dos nociones, grafo geométrico y objeto espacial, se construyó un modelo de objetos que describe los elementos conceptuales y las relaciones más relevantes que caracterizan el concepto. Ambos modelos fueron elaborados usando el lenguaje de modelado orientado por objetos UML [10].

Fase 3: Comparación conceptual

Los modelos producidos en la fase anterior fueron, luego, comparados para establecer sus similitudes y diferencias conceptuales, así como para identificar aquellos posibles conflictos estructurales o semánticos que pudiesen existir entre ambos modelos.

Fase 4: Integración conceptual

Antes de proceder a la integración final de los modelos, se resolvieron los conflictos identificados en la fase anterior y se realizaron los cambios necesarios en cada uno de los dos modelos a integrar. Posteriormente, se procedió a la fusión de modelos. El resultado obtenido de esta fusión fue un nuevo modelo de objetos integrado, al cual denominamos modelo de grafos espaciales.

Los requerimientos de modelado de redes, obtenidos en la Fase 1, se presentan a continuación, mientras que las nociones de objeto espacial, grafo geométrico y grafo espacial, así como sus respectivos modelos de objetos, se explican en las subsiguientes secciones.

Requerimientos de Modelado de Redes de Servicio

Tal como se dejó entrever en la sección de introductoria, el modelado de redes de servicios

impone requerimientos muy particulares al proceso de diseño de un SIG. En esta sección se discuten estos requerimientos, los cuales justifican plenamente la necesidad de crear nuevos modelos o soluciones genéricas para la representación, manipulación y visualización de redes en un SIG.

Existe una gran diversidad de dominios de aplicación de la tecnología SIG en los cuales las entidades principales son redes de servicios. Algunos de estos dominios son los siguientes:

1. **Sistemas de transporte.** Incluyendo carreteras, redes de transporte público, redes ferroviarias, rutas aéreas, etc.
2. **Sistemas de servicios urbanos.** Por ejemplo, redes eléctricas, redes telefónicas, oleoductos, gasductos y acueductos.
3. **Redes de computadores.** Tales como, redes de área local, redes metropolitanas y de redes amplia cobertura (p. ej., Internet).
4. **Diseño de obras civiles.** Incluye instalaciones eléctricas, aguas negras, aguas blancas y fundaciones.
5. **Sistemas hidrográficos.** Conformados por un río, sus vertientes, su cuenca y demás cuerpos de agua relacionados.

En todos estos ejemplos, la entidad principal del sistema modelado es una red; esto es, una entidad espacial compleja que tiene una geometría definida por sus componentes espaciales y una topología definida por las relaciones espaciales que existen entre sus componentes. Los componentes de una red son, también, entidades espaciales (p. ej., los centros poblados conectados por una red vial). Estas entidades se relacionan a través de otras entidades, también, espaciales (p. ej., las carreteras de una red vial).

Una característica fundamental de las entidades que forman una red es que todas ellas tienen propiedades, tanto geométricas (p. ej., localización, forma, dirección y orientación) como topológicas (p. ej., relaciones de adyacencia, conectividad e inclusión).

Un modelo para la representación, manipulación y visualización de redes de servicios debe, por lo tanto, tener la capacidad de representar la red mediante un grafo que satisfaga los siguientes requerimientos:

1. Cada nodo del grafo debe representar una entidad espacial con existencia propia. Cada nodo debe tener asociado la localización, o posición en el espacio, de la entidad que él representa. Así, por ejemplo, los nodos de un grafo asociado a un metro urbano representarían las estaciones o paradas del metro.

2. Cada eje o arco del grafo debe representar una entidad espacial cuya forma geométrica, generalmente lineal, establece una conexión entre dos nodos del grafo. Por ejemplo, en un metro urbano, cada arco del grafo representaría un segmento de la línea o ruta que conecta dos de sus estaciones.

3. Aparte de la localización, cada nodo, eje o arco del grafo puede tener asociado otros *datos espaciales*, tales como la forma de la entidad representada, su orientación y su tamaño. Igualmente, se le pueden asociar uno o más *datos no espaciales*. Por ejemplo, cada nodo que represente una estación del metro tendría asociado, además de los datos espaciales que definen su geometría, otros datos no vinculados al espacio, tales como el nombre de la estación, su capacidad y los servicios disponibles al cliente.

4. Los ejes o arcos que conectan los nodos de un grafo representan, además de la topología del sistema modelado, la geometría que tienen estas conexiones en el sistema; particularmente, sus localizaciones, formas, orientaciones y distancias.

5. La representación visual del grafo utilizando mapas digitales es fundamental. Cada grafo debe dibujarse sobre un mapa topográfico que le dé localización o *geo-referencia* y le permita establecer relaciones geográficas entre los nodos y ejes (o arcos) del grafo con otros objetos espaciales representados en el mapa (p. ej., calles, edificaciones, lugares de interés, etc.).

6. Dependiendo de la escala del mapa utilizado, los nodos y curvas del grafo se deben visualizar usando formas geométricas diferentes. Por ejemplo, a una escala 1:1000 los nodos o estaciones de un metro se deberían visualizar usando polígonos; mientras que a una escala 1:10000 los mismos nodos se deberían visualizar usando puntos. Este problema es conocido como el problema de la *unidad espacial modificable* [1].

En la sección siguiente se introduce el concepto de objeto espacial, el cual es indispensable para modelar los componentes o entidades espaciales de una red de servicios.

Objetos Espaciales

Un objeto espacial O es un *constructo* de modelado de datos que representa la estructura y la dinámica que tiene una entidad E del mundo real en un espacio ε^n dado. De una manera más formal, un objeto espacial O es una estructura de software $\langle A, Op \rangle$ en la que A es una tupla $\langle objId, loc, v1, v2, \dots, vn \rangle$ de valores de atributos $ID, L_n, A1, A2, \dots, An$, tales que:

- *objId* identifica en forma única e inequívoca a O , $objId \in ID$, ID es el conjunto de todos los identificadores generados por el sistema de información geográfica;
- *loc* representa la localización de O en ε^n . $loc \in L_n$, L_n es un conjunto de puntos en ε^n . Así para $n = 2$, el valor *loc* viene dado por un par de coordenadas $\langle x, y \rangle$ definidas sobre ε^2 ;
- $v1, v2, \dots, vn$ representan valores de atributos de O , tales que $v1 \in A1, v2 \in A2, \dots, vn \in An$; y
- Op es un conjunto de operaciones $Op1, Op2, \dots, Opn$ que actúan sobre el objeto O accediendo o modificando los valores de los atributos de A .

Los atributos $\langle A1, A2, \dots, An \rangle$ de A representan aquellas propiedades más relevantes que tiene la entidad E en el dominio de aplicación del SIG. Estos atributos pueden ser espaciales o no espaciales.

Los atributos espaciales se clasifican, a su vez, en:

- **Atributos geométricos:** Permiten representar la forma, orientación y dirección que tiene la entidad E para una escala dada. La forma del objeto O se representa utilizando puntos, líneas, polígonos o volúmenes.
- **Relaciones espaciales:** Capturan las relaciones que se dan en el espacio entre la entidad E representada por O y otras entidades espaciales. Estas relaciones pueden ser de cuatro tipos: de orden espacial, topológicas, difusas y métricas. En la Tabla 1 se dan

ejemplos de estos tipos de relaciones entre dos entidades espaciales A y B .

De igual manera, los atributos no-espaciales se dividen en:

- **Atributos temáticos:** Representan aquellas propiedades de E que no tienen relación con el espacio. Por ejemplo, el nombre, el tipo y el número de canales de una carretera.
- **Relaciones no-espaciales:** Denotan las relaciones no vinculadas al espacio que se dan entre dos entidades. Pueden ser de los siguientes tipos: identidad, comparación, temporalidad, causalidad, oposición, funcionalidad, clasificación y composición. La Tabla 2 muestra diferentes tipos de relaciones no espaciales entre dos entidades cualesquiera A y B .

Los objetos espaciales son las unidades básicas de manipulación y almacenamiento de la base de datos espacial (BDE) de un SIG orientado a objetos. Estos objetos se agrupan en clases. Una clase agrupa a una colección de objetos que tienen todos los mismos atributos. Por ejemplo, los ríos Chama, Mucujún, Milla y Albarregas forman la clase *Ríos de Mérida*. Todos ellos tienen los mismos atributos, pero se diferencian el uno del otro por los valores que estos atributos toman en un instante dado de tiempo.

Además de agrupar objetos similares, la clase define la estructura y el comportamiento de cada uno de ellos. La estructura describe cada uno de los atributos de los objetos de la clase, mientras que el comportamiento describe cada una de las operaciones que actúan sobre los objetos de la clase.

Las clases se relacionan entre sí. Tres tipos de relaciones típicas entre clases son la generalización, la agregación y la asociación. La generalización establece una relación jerárquica superclase-subclase en la que la subclase S hereda de la superclase C todos los atributos y operaciones definidas en C . La agregación establece una relación de composición entre una clase de objetos compuestos y una o más clases de objetos componentes. El tercer tipo de relación, denominado asociación, permite definir enlaces bidireccionales entre los objetos de dos clases. Las relaciones funcionales indicadas en la Tabla 2 se definen explícitamente mediante asociaciones.

Tabla 1
Relaciones espaciales típicas

Tipo de relación	Ejemplos
De orden espacial	A está_frente_a B A está_detrás_de B A está_a_la_derecha_de B
Topológicas	A intersecciona_a B A es_adyacente_a B A está_dentro_de B A se_solapa_con B A es_cubierta_por B
Difusas	A está_cerca_de B A está_lejos_de B
Métricas	A está_al_Norte_de B A está_a_X-mts_de B

El proceso de diseño de una BDE consiste en establecer las clases de objetos, espaciales o no, que representan las entidades del dominio de aplicación del SIG, así como los atributos (estructura) y operaciones (comportamiento) de cada clase y las relaciones que se dan entre ellas. El resultado de este proceso se denomina *esquema conceptual de la base de datos espacial (BDE)*.

El esquema conceptual de una BDE se describe gráficamente mediante un modelo de objetos elaborado usando notaciones o lenguajes de modelado, tales como el estándar UML [10].

La estructura y el comportamiento comunes a todas las clases de un modelo de objetos son definidos por dos superclases, proporcionadas por el SIG, denominadas *Objeto* y *Objeto_Espacial* (Figura 1).

La clase *Objeto* proporciona una identificación única a cada objeto de una BDE, representada mediante el atributo *objID*. Esta clase provee, además, las operaciones necesarias para asegurar la persistencia de los objetos, esto es, el almacenamiento y recuperación de objetos en la BDE.

Los objetos espaciales son un tipo particular de objetos, que se definen a través de una subclase de *Objeto* denominada *Objeto_Espacial*, cuya estructura, comportamiento y relaciones con otras clases se muestran en los diagramas de clases de las Figuras 1 y 2. El atributo *loc* representa la localización del objeto en el espacio. En objetos con geometría puntual, esta localización

Tabla 2
Relaciones no espaciales típicas

Tipos de relación	Ejemplos
Comparación	A es_mayor_que B A es_igual_a B
Funcional	A desemboca_en B A posee_a B A suministra_a B A produce B
Clasificación	A es_miembro_de B A pertenece_a_la_clase B
Composición	A es_parte_de B A está_compuesta_por B,C,...
Temporal	A ocurre_antes_de B A es_concurrente_con_B

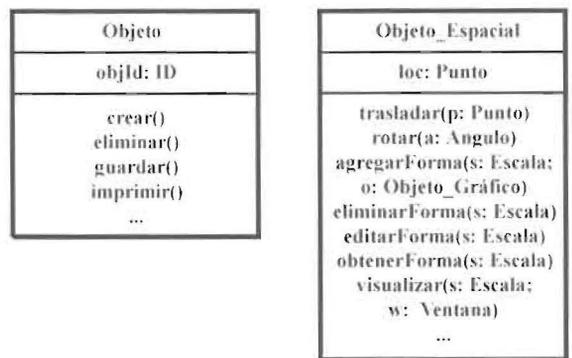


Figura 1. Las clases básicas de los objetos espaciales.

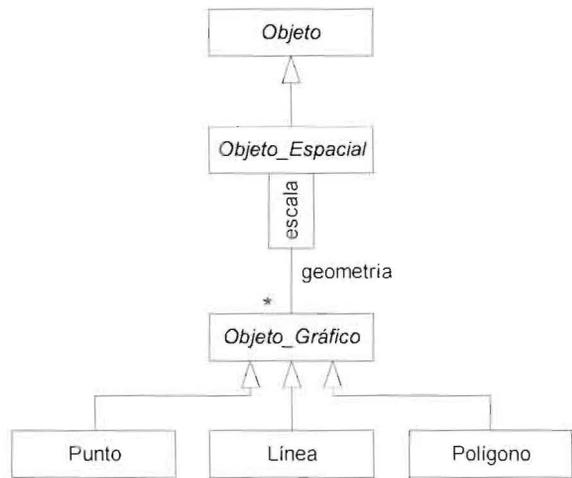


Figura 2. Modelo de objetos espaciales.

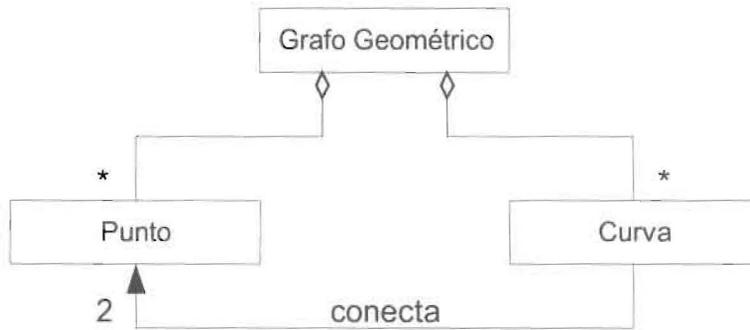


Figura 3. Modelo de objetos para grafos geométricos.

viene dada por las coordenadas del punto; mientras que en objetos lineales o poligonales, la localización es determinada por el *centroide* de su forma geométrica o por uno de los extremos del mínimo rectángulo que enmarca totalmente a la forma geométrica del objeto (véase [2]).

Partiendo del concepto de objeto espacial definido anteriormente y del modelo de datos espaciales de S. Roberts, *et al.* [9], se elaboró, siguiendo la metodología de integración antes descrita, el modelo de objetos espaciales contenido en la Figura 2. Un aspecto importante de este modelo, es su solución al problema de la unidad espacial modificable. Esto es, el modelo permite representar múltiples formas de un mismo objeto en función de las diferentes escalas que utiliza el SIG. Un centro poblado, por ejemplo, se modelaría usando geometría poligonal a una escala de 1:20.000; mientras que a una escala 1:100.000 su forma sería de tipo puntual.

Nótese que la forma geométrica (geometría) que tiene un objeto espacial está determinada por uno o más objetos gráficos. Ello permite asociarle a un mismo objeto espacial, y a una misma escala, varias figuras geométricas que determinan su forma. Así, por ejemplo, un río y sus vertientes se modelarían como un conjunto de líneas que representan los riachuelos, las cuales se unen a lo largo de una línea principal que representa el cauce del río.

Grafos Geométricos

Busacker y Saaty [8] definen un grafo geométrico $G(P,C)$ como una estructura geométrica del espacio euclideo n -dimensional ϵ^n , en la cual P es un conjunto de puntos en ϵ^n y C es un conjunto de curvas continuas en ϵ^n que no se in-

terceptan. Cada curva c , $c \in C$, conecta dos puntos x, y ; donde $x, y \in P$.

La Figura 3 presenta, en términos del lenguaje UML, el modelo de objetos de un grafo geométrico, el cual fue obtenido a través de la fase 2 (Análisis Conceptual) de la metodología de integración utilizada.

De acuerdo a este modelo, un grafo geométrico es un objeto compuesto por cero, uno o más objetos de la clase *Punto* y cero, uno o más objetos de la clase *Curva*. Cada objeto de la clase *Curva* conecta exactamente dos objetos de la clase *Punto*.

Los grafos geométricos permiten modelar una red en ϵ^2 o en ϵ^3 . Una red vial, por ejemplo, se puede modelar como un grafo geométrico cuyos puntos representan las intersecciones viales y las curvas los segmentos de carretera entre dos intersecciones.

Grafos Espaciales

Pese a su capacidad para representar la localización y la relación topológica de conectividad, los grafos geométricos tienen, sin embargo, una limitación muy importante y es que no permiten representar otras propiedades espaciales de los nodos y arcos, tales como la forma, orientación, tamaño, relaciones topológicas de inclusión y adyacencia, etc. Esta limitación semántica se traduce en: (a) un bajo grado de realismo durante la visualización en pantalla de una red en dos o tres dimensiones y (b) una baja capacidad de manipulación espacial de los objetos que componen la red.

Estas deficiencias se superan mediante la integración de los grafos geométricos con los ob-

jetos espaciales, esto es, mediante la noción de grafo espacial, la cual definimos como sigue:

Definición: Sea O el conjunto de todos los objetos espaciales. Un *grafo espacial* en ε^n es un grafo $G(N, E)$ en el cual $N \subset O$ y $E \subset O$. N es un conjunto finito $\{n_i\}$ de objetos espaciales con forma geométrica puntual o poligonal denominados *nodos espaciales*. E es un conjunto finito $\{e_k\}$ de objetos espaciales con forma geométrica lineal denominados *ejes espaciales*. La forma geométrica de cada e_k que pertenece a E conecta en ε^n las formas geométricas que tienen dos nodos espaciales n_i y n_j donde $n_i, n_j \in N$.

Nótese que tanto los nodos como los ejes del grafo espacial son definidos como objetos espaciales. Ello significa que además de representar la localización y conectividad de los objetos que componen una red, el grafo espacial permite capturar la forma, orientación y demás propiedades geométricas y topológicas de tales objetos. Por otro lado, el conjunto de operaciones, tanto propias como heredadas, de los nodos y ejes espaciales que componen un grafo espacial aseguran su manipulación y le imprimen un mayor grado de realismo a su visualización en dos o tres dimensiones.

El Modelo de Grafos Espaciales

Siguiendo las fases 3 y 4 de la metodología de integración conceptual se obtuvo el modelo de objetos de la Figura 4, el cual representa el concepto de grafo espacial que emergió a partir de la integración de los modelos de objetos correspondientes a las nociones de objeto espacial y grafo geométrico (Figuras 2 y 3).

El modelo obtenido muestra las clases básicas que integran un grafo espacial. Este modelo se interpreta como sigue: un grafo espacial es un objeto compuesto por un conjunto de nodos espaciales y un conjunto de ejes espaciales. Un eje espacial enlaza o conecta exactamente dos nodos espaciales. Tanto los nodos espaciales como los ejes espaciales son objetos espaciales. De esta manera, cada uno de los nodos y ejes del grafo tienen una forma geométrica propia la cual permite que la visualización del grafo, a una escala dada, sea lo más realista posible.

Nótese que los nodos espaciales deben tener una forma geométrica puntual o poligonal;

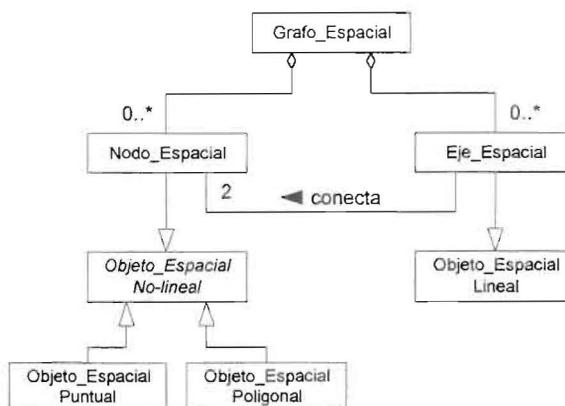


Figura 4: Modelo de objetos de los grafos espaciales.

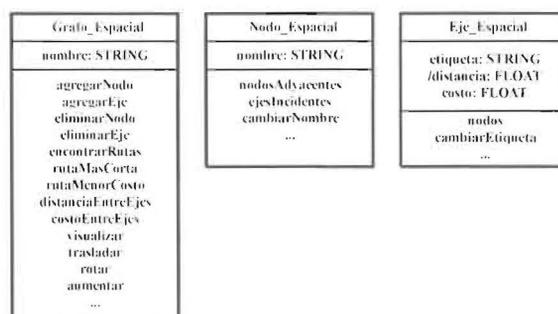


Figura 5. Las clases básicas del modelo.

mientras que los ejes espaciales están restringidos a tener una forma geométrica lineal. Estas dos últimas restricciones se implementan en el modelo a través de las subclases *Objeto Espacial Lineal* y *Objeto Espacial No Lineal*, las cuales son especializaciones de la clase *Objeto Espacial*.

La estructura y el comportamiento de las clases principales que integran el modelo de grafos espaciales se resumen en la Figura 5. Los atributos y operaciones heredadas de las superclases no se muestran en esta figura.

Un tipo particular de grafo espacial es aquel en el cual el par de vértices o nodos espaciales que integran un eje espacial es ordenado, esto es, tiene una dirección que va del primer nodo del par al segundo. Este tipo de grafo se denomina *grafo espacial dirigido* o *dígrafo espacial*. Su eje espacial tiene un nodo de inicio y un nodo de terminación que indican la dirección del eje, al cual denominamos arco espacial. Los dígrafos tienen una aplicación directa en el modelado de redes de flujos, tales como gasductos, oleoductos, acueductos, redes viales u otras redes de transporte.

Usos del Modelo de Grafos Espaciales

El modelo de grafos espaciales, descrito anteriormente, constituye una base conceptual necesaria e indispensable para crear aplicaciones y herramientas de *software* SIG para el modelado, manipulación y visualización en dos y tres dimensiones de redes de servicios.

La generalidad del modelo permite su aplicación en el diseño de una gran variedad de sistemas de información geográfica en los que se requieran el uso de redes de servicios. El modelo de grafos espaciales puede ser utilizado en el diseño de un SIG orientado a objetos de dos maneras diferentes:

1. *Mediante la reutilización directa de sus clases.* - En este caso, el diseñador modela una red de servicios usando directamente las clases del modelo, es decir, tal como se proporcionan en las Figuras 4 y 5.
2. *Mediante el refinamiento de sus clases.* - Bajo esta modalidad, el diseñador reutiliza el modelo para refinar y adaptar una o más de sus clases genéricas a las necesidades particulares del sistema que él o ella está desarrollando. Los mecanismos de herencia y especialización de clases son utilizados por el diseñador para crear sus propias subclases. Por ejemplo, una red de vialidad urbana puede ser modelada, mediante especialización, en la forma en que se ilustra en la Figura 6.

En el ejemplo de la Figura 6, la red vial y sus componentes se representan como subclases que especializan las clases básicas del modelo. Estas subclases deben ser, luego, extendidas y adaptadas por el diseñador mediante la incorporación de nuevos atributos y operaciones o la modificación de los atributos y operaciones heredadas.

La aplicabilidad del modelo va, sin embargo, más allá del diseño de aplicaciones. Su uso ha sido demostrado en el desarrollo de herramientas de *software* reutilizables en una gran variedad de dominios de la tecnología SIG. En concreto, el modelo se ha aplicado en el desarrollo de los siguientes activos o componentes de *software* reutilizables:

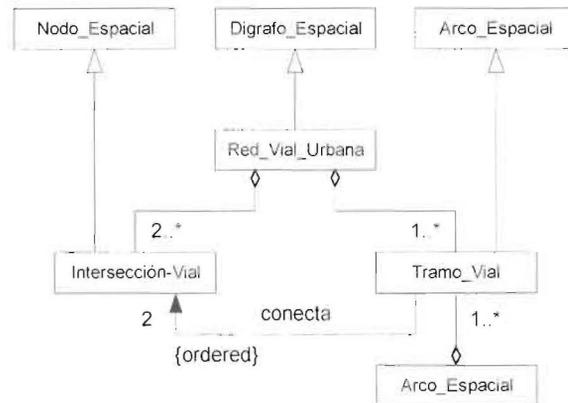


Figura 6. Esquema de una red de vialidad urbana.

1. Una colección de patrones de diseño de *software* para el modelado de redes en Ingeniería y Arquitectura [11, 12]. Estos patrones describen en detalle la manera en que los modelos de objetos espaciales y grafos espaciales pueden ser reutilizados en la solución de problemas de diseño de *software* para la gestión de redes de servicios.
2. Una librería de clases implementadas en el lenguaje Java y reutilizables en el desarrollo de SIG orientados a objetos [12]. Una versión preliminar de esta librería fue desarrollada inicialmente en el lenguaje C++ [13].
3. Un modelo de datos para hipergrafos espaciales [14], el cual es una extensión del modelo de grafos espaciales descrito anteriormente. Este nuevo modelo incorpora mecanismos que facilitan el modelado de redes complejas, formadas por una colección de sub-grafos, cada uno de los cuales es representado y manipulado a un nivel de abstracción definido por la escala utilizada.

El modelo de grafos espaciales sirve, actualmente, como un soporte al desarrollo de una base de componentes de *software* reutilizables en el dominio de sistemas espacio-temporales integrados [15].

Otros posibles usos que se intentarán realizar en el futuro inmediato son los siguientes:

1. Desarrollo de herramientas SIG especializadas para la creación, actualización, manipulación y visualización de grafos espaciales.

2. Interfases gráficas para la extensión de las capacidades de una herramienta SIG existente.

Conclusiones

En este artículo se ha introducido un nuevo modelo conceptual para el diseño de redes de servicios en una amplia variedad de sistemas de información geográfica. Este modelo es el resultado de aplicar una metodología de integración conceptual elaborada por el autor, la cual facilitó significativamente la integración de conceptos disímiles provenientes de disciplinas muy diferentes, tales como la teoría de grafos y las bases de datos espaciales.

La principal contribución del modelo está en la solución de los problemas y limitaciones semánticas, para el tratamiento automatizado de redes, que presentan los modelos espaciales tradicionales. El modelo permite representar, manipular y visualizar redes de servicio de una manera mucho más natural, elegante y simple que aquellas empleadas por los modelos vectoriales y de rejillas, usados en la mayoría de herramientas de *software* SIG existentes.

La aplicabilidad del modelo ha sido ampliamente demostrada a través de su uso en el desarrollo de activos o componentes de *software* reutilizables, los cuales reducen significativamente el tiempo y esfuerzo empleados en el desarrollo de aplicaciones y herramientas de *software* para SIG.

Agradecimientos

El autor agradece el financiamiento proporcionado por los siguientes organismos venezolanos: Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes (bajo el Proyecto No. I-405-A-93) y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas CONICIT (bajo el proyecto No. G-97000824).

Referencias Bibliográficas

1. Bosque Sendra, J.: "Sistemas de Información Geográfica", Ediciones RIALP, Madrid, 1992.
2. Worboys, M. F.: "GIS: A Computing Perspective". Taylor & Francis, London, 1995.
3. Wackowicz, M.: "Object-Oriented Design for Temporal GIS". Taylor&Francis, London, 1999.
4. Khosafian, S. and Abnous, R.: "Object Orientation - Concepts, Languages, Databases, User Interfaces", John Wiley & Sons, New York, 1990.
5. Bruegge, B. and Dutoit, A.H.: "Object-Oriented Software Engineering", Prentice Hall, New Jersey, 2000.
6. Montilva J. A.: "An integration method applied to the design of a data/knowledge model for multimedia and spatial applications". Ph.D. thesis, University of Leeds, School of Computer Studies, Leeds, UK, 1993.
7. Montilva, J. A.: "A methodology for the design of specific-purpose data models applied to multimedia and geographical information systems". Proc. of the 5th Int. Symp. on Systems Research, Informatics and Cybernetics - ISAS'95, Baden-Baden, Alemania (1995), 121-125.
8. Busacker, R.G. and Saaty, T.L.: "Finite Graphs and Networks: An Introduction with Applications", McGraw-Hill, 1965.
9. Roberts, S.A., Gahegan, M.N., Hogg, J., and Hoyle, B.: "Application of object-oriented databases to geographic information systems", Information and Software Technology, Vol. 33, No. 1 (1991), 38-46.
10. Booch, G., Jacobson, I., and Rumbaugh, J.: "The Unified Modeling Language User Guide". Addison-Wesley, Reading, MA, 1998.
11. Montilva, J y Ramos, Y.: "Patrones de diseño para el modelado de redes en SIG". Actas del XXIV Congreso Latinoamericano de Informática (CLEI'2000), Ciudad de México, México, (2000).
12. Ramos, Y.: "Patrones de diseño para el modelado y manipulación de redes en Ingeniería y Arquitectura". Tesis de postgrado. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Postgrado en Computación, Mérida, Venezuela, 2000.
13. Montilva, J.A. y Granados, G.: "Modelado y Manipulación de Redes de Servicio usando Grafos Espaciales en C++". Actas de la Pri-

- mera Conferencia Internacional sobre Métodos Numéricos en Ingeniería. Mérida, Venezuela, (1996).
14. Granados, G. "Un modelo de hipergrafos espaciales para el manejo de redes de servicios". Tesis de postgrado. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Postgrado en Computación, Mérida, Venezuela, 1998.
 15. CONICIT Proyecto No. G-97000824. "Integración de tecnologías y sistemas de software heterogéneo para aplicaciones espacio-temporales". ULA-LUZ, 1998-2002. (<http://www.centauro.ing.ula.ve/itsh/>)

Recibido el 2 de febrero de 1998

En forma revisada el 14 de Septiembre de 1999