

Patrones de Diseño para el Modelado de Redes en Sistemas de Información Geográfica

Jonás A. Montilva
Yajaira Ramos

Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Sistemas, Departamento de Computación
Postgrado en Computación
Mérida, Venezuela 5101
e-mail: jonas@ing.ula.ve

Resumen

Este artículo describe dos patrones de diseño que facilitan el desarrollo de sistemas de información geográfica (SIG) orientados a objetos. El primero de ellos, denominado Objeto Espacial, captura los aspectos estructurales y dinámicos comunes que tienen las entidades espaciales representadas en diversos SIG. El segundo, denominado Grafo Espacial, es un patrón cuyo propósito es proveer una solución reutilizable al problema de la representación, manipulación y visualización de redes de servicios en SIG. La reutilización del patrón Grafo Espacial permite que una red de servicios pueda representarse de una manera muy natural. Cada nodo o enlace de la red es definido mediante un objeto espacial, lo cual agrega realismo a la manipulación y visualización de la red. Ambos patrones simplifican el diseño de aplicaciones SIG proporcionando estructuras de diseño reutilizables en dominios relacionados con el manejo de datos espaciales y redes de servicios.

Palabras claves: Sistemas de información geográfica, Ingeniería de software orientado a objetos, Patrones de diseño.

Abstract

In this article, we describe two software design patterns that can be reused in the design of object-oriented geographical information systems (GIS). The first of them, called Spatial Object, captures the common structure and dynamics of the spatial entities represented in a GIS. The second one, called Spatial Graph, provides a solution to

well known problems in the representation, management, and visualization of service networks in GIS. A more natural representation of a service network is achieved, when the Spatial Graph pattern is reused in the design of a GIS application. Both patterns, contribute to reduce the effort and cost of designing object-oriented GIS by providing reusable solutions to the modeling of spatial entities and service networks.

1. Introducción

Un sistema de información geográfica (SIG) es un tipo particular de sistema de información que permite a sus usuarios capturar, modelar, manipular, representar, analizar y presentar datos geográficamente referenciados [1]. Los datos que manipula un SIG representan las propiedades que tienen las entidades espaciales que conforman el dominio de aplicación del SIG. Ejemplos de este tipo de entidades son los ríos, las ciudades, los límites administrativos, las carreteras y las redes de servicio eléctrico, telefónico o de transporte.

El desarrollo de un SIG requiere el uso de herramientas de software especializadas (p.ej., ARC/INFO% de ESRI, GeoMedia% de Intergraph e IDRISI% de la Clark University). Estas herramientas emplean, para modelar y manejar entidades, dos tipos de modelos de datos espaciales conocidos como modelos vectoriales y modelos teselares o de rejilla. Ambos modelos son ampliamente discutidos en la literatura del área (véase, por ejemplo, [1] – [7]).

En los modelos vectoriales, una red de servicios se representa mediante 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 tienen 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 teselares 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 dos 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 (p.ej., 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. Ello, evidentemente, hace más compleja la representación y manipulación de redes en un SIG.

Recientemente, han surgido nuevos modelos de datos espaciales basados en la Orientación a Objetos que resuelven, en parte, los problemas semánticos antes descritos (véase [2] y [8]). 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, el cual captura las propiedades y comportamiento de la entidad representada.

El modelado orientado a objetos de un SIG consiste, esencialmente, en describir las clases de objetos espaciales y no espaciales relevantes al dominio de aplicación del SIG, así como establecer las relaciones entre estas clases. A diferencia de las clases de objetos no-espaciales, las clases espaciales guardan entre sí muchos elementos estructurales y de comportamiento comunes, que se repiten de una clase a otra y de una aplicación a otra. De igual manera, el modelado de redes de servicios tiene soluciones estructurales que se repiten de una aplicación SIG a otra. Estos aspectos y soluciones comunes en el modelado de redes de servicio motivaron el desarrollo de este trabajo de investigación, cuyo objetivo fue el desarrollo de patrones de diseño que pudiesen ser reutilizados en el desarrollo de diversas aplicaciones SIG, particularmente, aquellas relacionadas con el manejo de redes de servicios. Un patrón de diseño de software es una solución reutilizable a un problema recurrente en el desarrollo de software [9], [10]. Su reutilización reduce el esfuerzo, tiempo y costos empleados durante el diseño de software [11]. Los patrones de diseño capturan la estructura y dinámica de una solución que se repite múltiples veces durante el desarrollo de diferentes aplicaciones, generalmente, en un contexto o dominio determinado [12], [13].

En este artículo, se presentan dos patrones de diseño que simplifican el diseño de SIG orientados a objetos. El primero de estos patrones, denominado Objeto Espacial, facilita el modelado de entidades espaciales en aplicaciones SIG. El segundo de ellos, denominado Grafo Espacial, es un patrón cuyo propósito es resolver los problemas semánticos anteriormente mencionados en la representación de redes en SIG. Los patrones fueron elaborados utilizando una simplificación de la conocida forma Gamma [10]. La principal contribución de estos patrones es la de proporcionar soluciones reutilizables que facilitan el diseño de SIG orientados a objetos y, muy particularmente, el modelado de redes de servicios.

Las secciones 2 y 3 describen los conceptos de objeto espacial, grafo geométrico y grafo espacial; conceptos sobre los cuales se fundamentó el desarrollo de los patrones de diseño. La sección 4 discute, muy brevemente, la noción de patrón de diseño empleada en este trabajo. Las secciones 5 y 6 presentan los dos resultados principales, los patrones Objeto Espacial y Grafo Espacial, respectivamente. En ellas se discute, también, la aplicabilidad de los patrones y su relevancia en el contexto de los SIG orientados a objetos. Finalmente, en la última sección, se dan las conclusiones del trabajo.

2. Objetos espaciales

Un objeto espacial O es un objeto que representa la estructura y el comportamiento que tiene una entidad E del mundo real en un espacio e^n dado [14]. De una manera más formal, un objeto espacial se define como sigue:

Definición: Un objeto espacial O es una estructura de software $\langle A, Op \rangle$ en la que A es una tupla $\langle \text{objId}, \text{geo}, v_1, v_2, \dots, v_m \rangle$ de valores de atributos $ID, G_n, A_1, A_2, \dots, A_m$, tales que :

- objId identifica en forma única e inequívoca a O , $\text{objId} \in ID$, ID es el conjunto de todos los identificadores generados por una herramienta SIG;
- geo representa la geometría de O en e^n . $\text{geo} \in G_n$, G_n es un conjunto de puntos en e^n . Así para $n = 2$, el valor geo viene dado por un par de coordenadas $\langle x, y \rangle$ definidas sobre e^2 ;
- v_1, v_2, \dots, v_n representan valores de atributos de O , tales que $v_1 \in A_1, v_2 \in A_2, \dots, v_n \in A_n$;

y Op es un conjunto de operaciones Op1, Op2, ..., Opm que actúan sobre el objeto O accediendo o modificando los valores de los atributos de A.

Los atributos <A1, A2,..., An> 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 geometría de la entidad E. El objeto espacial O representa esta geometría mediante la localización, forma, orientación y dirección que tiene la entidad E para una escala dada. La geometría del objeto O se captura utilizando puntos, líneas, polígonos o volúmenes cuyas coordenadas vienen dadas por un sistema de referencia o proyección determinado (p.ej., UTM, coordenadas geográficas).
- **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. Ejemplos de estos tipos de relaciones, entre dos entidades A y B cualesquiera, se dan a continuación:

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

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

- **Atributos temáticos:** Representan aquellas propiedades de una entidad 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. Algunos ejemplos de estos tipos de relaciones son los siguientes:

R. de comparación	R. funcional	R. de composición	R. temporal
A es_mayor_que B A es_igual_a B	A desemboca_en B A posee_a B A suministra_a B A produce B	A es_parte_de B A está_compuesta_por B,C,...	A ocurre_antes_de B A es_concurrente_con_B

Los objetos espaciales son las unidades básicas de manipulación y almacenamiento de la base de datos de un SIG. Dentro de una base de datos espacial, estos objetos se agrupan y/o son descritos por clases. Las clases de objetos de un SIG pueden ser espaciales o no, dependiendo del tipo de objetos que ellas describan. Una clase espacial describe una colección de objetos espaciales que tienen todos los mismos atributos y comportamiento. Por ejemplo, los ríos Chama, Mucujún, Milla y Albarregas del Estado Mérida, en Venezuela, se representan mediante objetos espaciales o instancias de la clase espacial Ríos. Todos ellos tienen los mismos atributos, pero se diferencian el uno del otro por los valores que tienen estos atributos en un instante dado de tiempo. Una descripción formal del concepto de clase espacial se da en [14].

3. Grafos Geométricos y Grafos Espaciales

Busacker y Saaty [15] definen un grafo geométrico $G(P,C)$ como una estructura geométrica del espacio euclideo n -dimensional e^n , en la cual P es un conjunto de puntos en e^n y C es un conjunto de curvas continuas en e^n que no se intersectan. Cada curva $c, c \in C$, conecta dos puntos x, y ; donde $x, y \in P$.

La Figura 1 presenta, en términos de un diagrama de clases en UML [16], el modelo conceptual de un grafo geométrico obtenido a través de su definición formal. 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 dos objetos de la clase Punto.

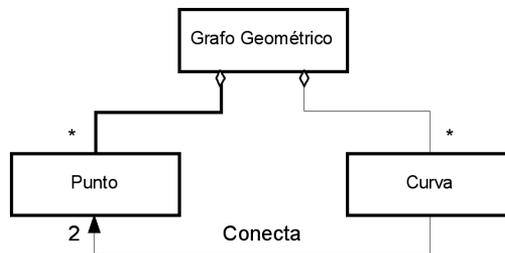


Figura 1. Modelo conceptual de un grafo geométrico

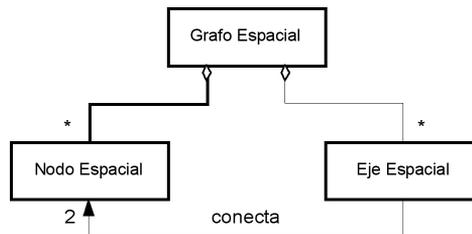


Figura 2. Modelo conceptual de un grafo espacial Los grafos geométricos permiten modelar una red en e^2 o en e^3 . Una red vial, por ejemplo, se puede modelar como un grafo geométrico cuyos puntos representan las intersecciones viales, mientras que las curvas representan los segmentos o tramos de carretera entre dos intersecciones.

Pese a su capacidad para representar propiedades espaciales, tales como la localización y la relación topológica de conectividad, los grafos geométricos tienen, sin embargo, una limitación 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 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 objetos espaciales, esto es, mediante la noción de grafo espacial [14] y [17], la cual definimos como sigue: Definición: Sea O el conjunto de todos los objetos espaciales. Un grafo espacial en e^n es un grafo $G(N, E)$ en el cual $N \subseteq O$ y $E \subseteq O$. N es un conjunto finito $\{n_j\}$ 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 establece una conexión de 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 conceptual de un grafo espacial se ilustra en la figura 2. Tanto `Nodo_Espacial` como `Eje_Espacial` son clases compuestas de la clase `Grafo_Espacial` y son, a su vez, especializaciones de la clase `Objeto_Espacial`, la cual no se muestra en la figura 2.

Las definiciones de objeto espacial y grafo espacial, presentadas en esta sección, constituyeron la base conceptual y formal sobre la cual se fundamentó la formulación de los patrones de diseño discutidos en las siguientes secciones.

4. Patrones de diseño de software

Un patrón de diseño es una solución reutilizable a un problema recurrente que ocurre durante el diseño de software [9]. De acuerdo a Bruegge y Dutoit, un patrón de diseño está compuesto por un conjunto de clases que, mediante la delegación y herencia, proporcionan una solución robusta y modificable a un problema común o recurrente. Estas clases son reutilizadas en el diseño de nuevas aplicaciones; para lo cual se requiere su adaptación o refinamiento en base a los requerimientos de la aplicación [11].

El conocido libro de Gamma, et al [10] describe un total de 23 patrones agrupados en tres categorías: patrones de creación, relacionados con la construcción y gestión de objetos; patrones estructurales, los cuales definen relaciones estáticas entre objetos; y patrones de comportamiento, los cuales caracterizan los aspectos dinámicos de la interacción entre objetos. Estos patrones son de dominio general, pues pueden ser reutilizados en diversos dominios de aplicación. Durante los últimos años, han surgido patrones orientados a dominios específicos, los cuales proveen soluciones al diseño de aplicaciones en dominio particulares [12].

Los patrones estructurales guardan mucha relación con las estructuras de datos. Soukup [13] discute esta analogía y concluye que “cualquier estructura de datos es, también, un patrón”. Basado, en esta analogía, se propone en las secciones siguientes dos patrones estructurales de dominio específico, orientados a la solución de problemas comunes y recurrentes en el diseño de aplicaciones SIG, especialmente, en aquellas que requieran el modelado y manipulación de redes de servicios.

5. El Patrón Objeto Espacial

El concepto de objeto espacial, tal como se describió en la Sección 3, provee la base conceptual necesaria para formular un patrón de diseño que facilite el modelado de entidades espaciales en SIG orientados a objetos. Esta sección describe el patrón Objeto Espacial usando una simplificación del formato propuesto por Gamma, et al [10] para documentar patrones de diseño.

Nombre y alcance del patrón: El patrón Objeto Espacial permite representar entidades espaciales geo-referenciadas, es decir entidades que existen en un espacio e^n y cuya geometría está determinada por un sistema de geo-referencia o proyección dado.

Intención: El patrón Objeto Espacial captura la estructura y comportamiento común a todas las entidades espaciales en dominios geográficos, esto es, en aquellos dominios donde los SIG tienen aplicación. Su propósito es facilitar el modelado de este tipo de entidades mediante su reutilización.

Motivación: La representación orientada a objetos de entidades espaciales tiene muchos aspectos comunes que se repiten de una aplicación SIG a otra. Así, por ejemplo, la geometría de las entidades espaciales está determinada básicamente por cuatro atributos: localización, forma, dirección y orientación. La forma del objeto puede ser puntual, lineal o poligonal dependiendo de la escala utilizada. Cuando la forma del objeto es geo-referenciada, su referencia determina, también, la localización del objeto, su dirección y su orientación. La figura 3 muestra tres clases que representan la estructura y comportamiento de tres tipos de entidades espaciales con formas puntual, lineal y poligonal.

El nombre, la escala, el sistema de geo-referencia y la geometría son atributos comunes a todas los tipos de entidades espaciales independientemente de su forma. Por otro lado, existen también atributos comunes en todos aquellos tipos de entidades que tienen un mismo tipo de forma. Igual conclusión se puede extraer al analizar las operaciones que definen el comportamiento de estas clases.

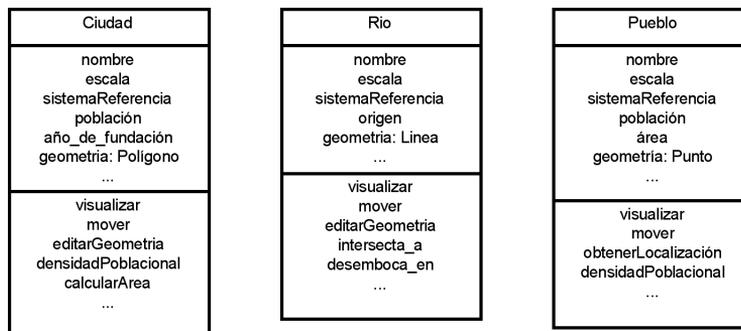


Figura 3. Clases espaciales con diferente geometría

Estructura de la solución: La estructura y comportamiento común a todos los tipos de entidades espaciales es capturado por el patrón Objeto Espacial de la manera descrita en la figura 4. La solución es representada usando diagramas de clase expresados en el lenguaje UML [16].

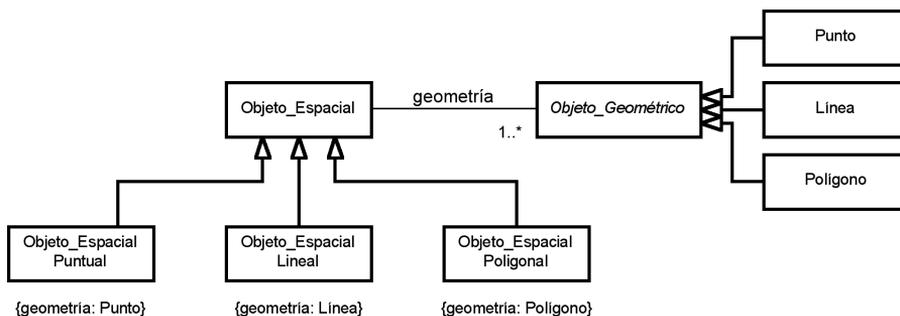


Figura 4. Estructura del patrón Objeto Espacial

Clases Participantes: Objeto_Espacial es la clase central del patrón. La figura 5 presenta los atributos y métodos genéricos de esta clase. Los atributos relEspacial_i y relNoEspacial_j corresponden, respectivamente, a las relaciones espaciales y no espaciales descritas en la sección 2.

Objeto_Geométrico es una clase abstracta que generaliza la estructura y comportamiento común de las clases Punto, Línea y Polígono, las cuales definen la geometría de las instancias de Objeto_Espacial. Las coordenadas x, y y z de la clase Punto están geo-referenciadas por el sistema indicado por el atributo sistemaReferencia en la clase Objeto_Espacial. Cada instancia de Línea tiene asociado un conjunto ordenado de instancias de Punto que determinan su forma. Similarmente, cada instancia de Polígono tiene asociado un conjunto ordenado y secuencial de líneas que determinan el borde del polígono. Los atributos izquierda y derecha de la clase Línea son usados para establecer las relaciones topológicas de las instancias de Línea y Polígono. Las clases Objeto_Espacial_Puntual, Objeto_Espacial_Lineal y Objeto_Espacial_Poligonal son especializaciones de la clase Objeto_Espacial que restringen la geometría de sus instancias a un punto, una línea o un polígono, respectivamente.

Los atributos y operaciones genéricas de las clases del patrón se ilustran en la figura 5.

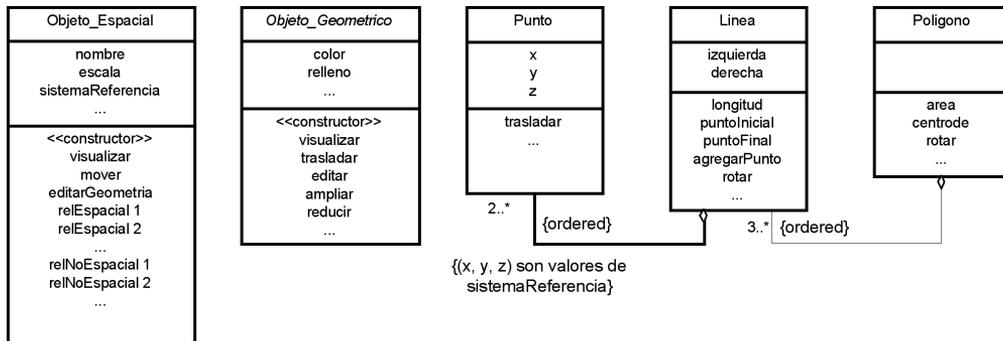


Figura 5. Atributos y operaciones de las clases del patrón Objeto Espacial

Aplicabilidad: La principal aplicación de este patrón es en el modelado de sistemas de información geográfica y bases de datos espaciales. Las entidades espaciales del dominio de aplicación de un SIG pueden ser modeladas usando el patrón Objeto Espacial.

Consecuencias (uso): El uso del patrón simplifica significativamente el proceso de modelado de clases en el diseño de un SIG o de una base de datos espacial. El patrón provee una estructura y comportamiento común que puede ser adaptado a las necesidades de sus usuarios.

El patrón puede ser reutilizado, en el diseño de aplicaciones SIG, mediante el reemplazo textual de sus elementos descriptivos. Es decir, la estructura del patrón es utilizada como un modelo o plantilla para crear las clases de la aplicación SIG. Al igual que con cualquier patrón, el usuario debe adaptar el patrón a los requerimientos de su aplicación, lo cual implica que el usuario puede agregar nuevos atributos y operaciones, tanto espaciales como no-espaciales. El usuario puede, también, reemplazar o modificar los atributos y operaciones de las clases del patrón.

Aspectos de la implementación: El patrón Objeto Espacial es independiente de su implementación. Esta independencia se alcanza a través del uso del patrón Puente (Bridge) [4, 5], el cual permite aislar la implementación de una clase mediante el uso de interfaces, tal como se ilustra en la figura 6. Las clases Punto, Línea y Polígono son definidas como interfaces que describen los

servicios u operaciones requeridas para manejar la geometría del objeto. Estas operaciones son implementadas separadamente por las clases Punto_Implementación, Línea_Implementación y Polígono_Implementación, cuya especialización permite implementar la geometría del objeto en cualquiera de las dos representaciones comúnmente usadas para almacenar y manipular datos espaciales en un SIG: representación vectorial y representación raster.

Usos potenciales: La generalidad del patrón permite su aplicación en una gran diversidad de aplicaciones geográficas. Cualquier tipo de entidad que tenga asociada una ubicación en el espacio puede ser modelada usando el patrón. En el marco de este trabajo, su principal aplicación es en la definición de patrón Grafo Espacial, el cual se describe en la siguiente sección. El patrón tiene, además, un uso potencial grande en el desarrollo de componentes SIG reutilizables. La independencia que tiene el patrón con respecto a su implementación, permite que un componente de software, diseñado a partir del patrón, pueda ser reutilizado en aplicaciones construidas usando tanto herramientas SIG vectoriales como raster.

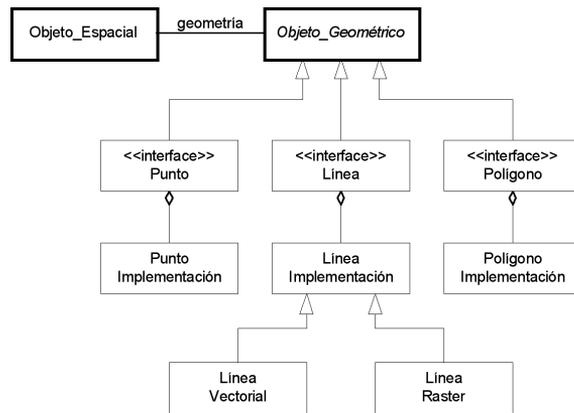


Figura 6. Implementación de la geometría del patrón Objeto Espacial

Patrones relacionados: El patrón Puente (Bridge), descrito en [9] y [10], es utilizado para implementar el patrón Objeto Espacial. El patrón Puente permite separar la implementación de la geometría de Objeto Espacial, lo cual garantiza la adaptabilidad de las clases, generadas a partir del patrón, a diferentes plataformas de implementación del SIG.

6. El patrón Grafo Espacial

Basado en los conceptos de objeto espacial, grafo geométrico y grafo espacial, se propone en esta sección un patrón de diseño denominado Grafo Espacial. Este patrón captura todos aquellos aspectos comunes o recurrentes en el diseño de redes de servicio. La forma simplificada Gamma [10] es de nuevo utilizada aquí para describir el patrón. Una descripción detallada de este patrón, y de sus aplicaciones en Ingeniería y Arquitectura, es dada por Ramos [17].

Nombre y alcance del patrón: El patrón Grafo Espacial permite representar redes de servicios en el espacio e^n . La geometría de una red es definida, por el patrón, como una colección de objetos espaciales puntuales o poligonales que se relacionan entre sí mediante objetos espaciales lineales, formando una estructura de grafo geo-referenciada.

Intención: El propósito del patrón Grafo Espacial es facilitar la representación, manipulación y visualización de redes de servicios en los dominios de los SIG.

Motivación: Los grafos han sido tradicionalmente usados para la representación de redes de servicio. Los grafos no sólo permiten modelar la estructura de la red; ellos pueden, también, proporcionar información acerca de rutas óptimas, existencia de ciclos, puntos críticos, dirección del flujo, etc. Una red de servicios está, normalmente, compuesta por un conjunto de entidades (p.ej., las estaciones de un metro urbano). Estas entidades se relacionan a través de otras entidades, tales como las secciones o tramos de cada línea de un metro urbano. Una primera característica fundamental de una red de servicio es que sus entidades son espaciales; tienen, por consiguiente, propiedades espaciales, tanto geométricas (p.ej., localización, forma, dirección y orientación) como topológicas (p.ej., relaciones de adyacencia, conectividad e inclusión). La segunda característica de estas redes es que su estructura puede ser definida mediante un grafo.

Los grafos convencionales, tales como los grafos geométricos o los grafos planares [15], tienen limitaciones para capturar o representar las propiedades y el comportamiento espacial de las entidades de una red. El concepto de grafo espacial, descrito en la sección 3, provee una solución mucho más completa que la proporcionada por un grafo geométrico o un grafo planar. La habilidad del grafo espacial para representar las propiedades espaciales y no espaciales de sus nodos y ejes le agrega mayor realismo a la representación de la red y facilita su manipulación o manejo en una aplicación SIG.

Estructura de la solución: La representación, manipulación y visualización de una red de servicios se puede simplificar mediante la estructura que ilustra la figura 7.

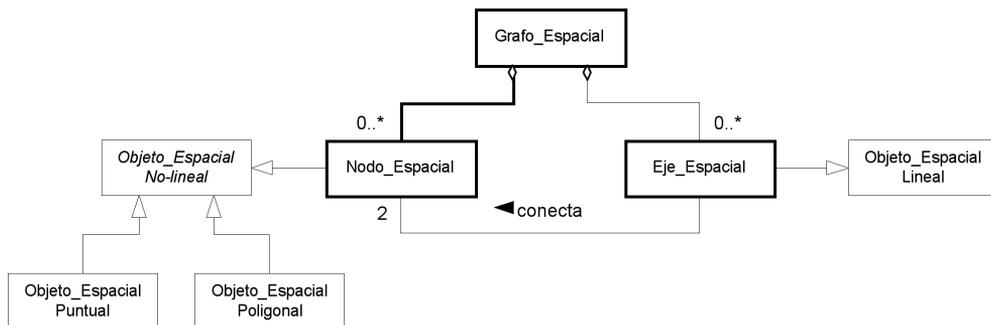


Figura 7. Estructura del patrón Grafo Espacial

Clases participantes: La clase Grafo_Espacial describe la estructura y comportamiento común a todas las redes de servicios. Sus operaciones genéricas permiten agregar, modificar y eliminar los componentes de una red. Tal como se muestra en la figura 8, esta clase incluye, también, operaciones para la determinación de rutas posibles y rutas óptimas, así como la determinación de los arcos o ejes que convergen en un nodo. Grafo_Espacial es una clase de agregación que comprende las clases Nodo_Espacial y Eje_Espacial. La clase Nodo_Espacial es una especialización de la clase abstracta Objeto_Espacial_NoLineal, la cual es usada para restringir la geometría de los nodos de una red a puntos o polígonos solamente. La clase Eje_Espacial es una especialización de Objeto_Espacial_Lineal del patrón Objeto Espacial. La asociación conecta indica que cada instancia de Eje_Espacial establece una conexión física o abstracta entre exactamente dos instancias de la clase Nodo_Espacial.

La estructura y el comportamiento de las clases del patrón se presentan en la Figura 8. Los atributos y operaciones heredadas de las superclases no son mostradas en esta figura, por razones de espacio.

Aplicabilidad: El patrón Grafo Espacial puede ser aplicado en el diseño y modelado de una amplia variedad de SIG, pues la mayoría de estas aplicaciones contempla la representación, manejo y visualización de uno o más tipos de redes.

Consecuencias (uso): El reuso del patrón Grafo Espacial se logra de dos maneras: (a) mediante el reemplazo textual de los nombres de la clases Grafo_Espacial, Nodo_Espacial y Eje_Espacia9 y (b) mediante la especialización de las clases del patrón.

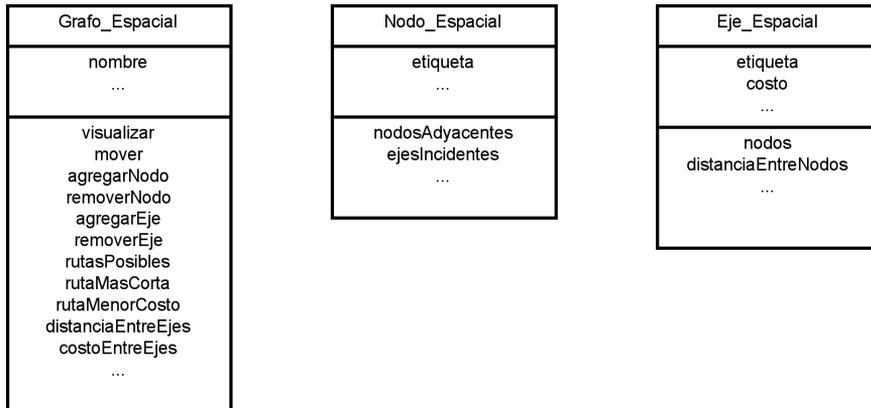


Figura 8. Estructura y comportamiento de las clases del patrón Grafo Espacial

La figura 9 ejemplifica la reutilización del patrón en el modelado de una red de transporte público, en este caso, un metro urbano. Otras aplicaciones diferentes se discuten en [17].

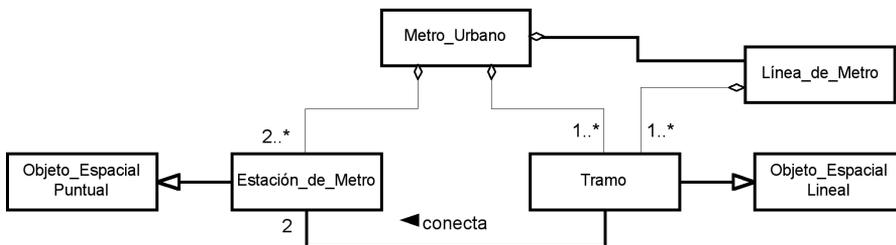


Figura 9. Una aplicación del patrón Grafo Espacial

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 digrafo 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 digrafos tienen una aplicación directa en el modelado de redes de flujos, tales como gasductos, oleoductos, acueductos, redes viales u otras redes de transporte. Esta variante del patrón Grafo Espacial se presenta en la figura 10.

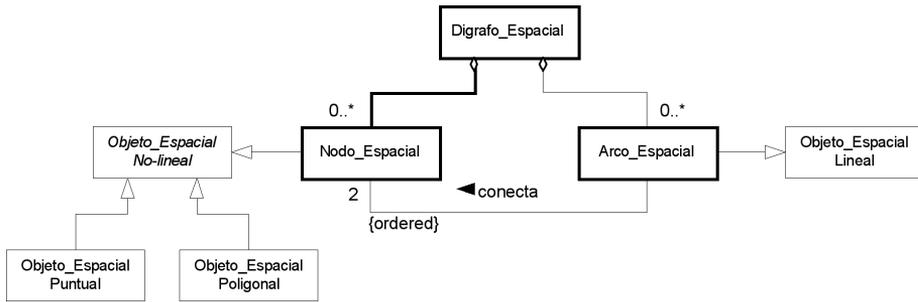


Figura 10. Digrafo Espacial, una variante del patrón

Aspectos de la implementación: La implementación del patrón Grafo Espacial y su variante, Digrafo Espacial, depende de la implementación del patrón Objeto Espacial, la cual fue discutida en la sección 5.

Usos potenciales: El patrón Grafo Espacial tiene una amplia aplicabilidad en el diseño de SIG orientados a objetos, por cuanto la mayoría de estos sistemas contemplan la representación, manipulación y visualización de una o más redes de objetos espaciales. Algunas de las redes de servicios que pueden ser diseñadas usando el patrón se listan a continuación:

- Redes de computadores (LAN, WAN, Internet, WWW)
- Redes telefónicas, eléctricas
- Redes de carreteras y transporte (p.ej., transporte aéreo, colectivo o privado)
- Acueductos, oleoductos, refinerías
- Redes eléctricas

La figura 11 muestra la aplicación del patrón Digrafo Espacial en el modelado de redes viales.

Patrones relacionados: El patrón Objeto Espacial es utilizado por Grafo Espacial para permitir el modelado y manipulación espacial de los componentes de una red.

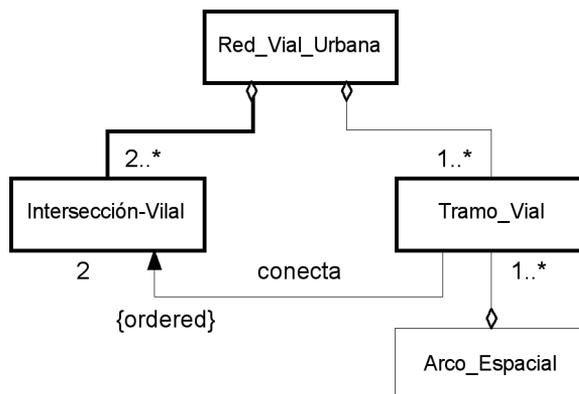


Figura 11. Reuso del patrón Digrafo Espacial

7. Conclusiones

Los dos patrones de diseño, descritos en este artículo, representan dos activos de software reutilizable importantes en el diseño de aplicaciones SIG. El primero de ellos, Objeto Espacial, captura las propiedades y comportamiento esencial de las entidades geográficas. Mientras que, el Grafo Espacial, es un mecanismo de reutilización que facilita el modelado, manipulación y visualización en dos y tres dimensiones de redes de servicio. Este último patrón permite modelar redes de una manera más natural, elegante y simple que aquella empleada en la mayoría de herramientas SIG existentes, las cuales utilizan, por lo general, las representaciones vectorial o raster para la implementación de redes.

Más allá de su aplicación en el diseño conceptual de SIG y bases de datos espaciales, ambos patrones tienen utilidad en el desarrollo de componentes SIG reutilizables. En este sentido, los patrones aquí descritos han sido aplicados en la creación de marcos de aplicación (application frameworks) dirigidos a facilitar la implementación de aplicaciones SIG orientadas a objetos. Ramos [17] describe un conjunto de marcos de aplicación elaborados en el lenguaje Java, los cuales fueron desarrollados a partir de los patrones Objeto Espacial y Grafo Espacial.

Otras aplicaciones posibles de estos patrones, que serán exploradas en trabajos futuros, son el desarrollo de una librería de componentes reutilizables para apoyar el desarrollo de SIG orientados a objetos y el desarrollo de interfaces gráficas orientadas a objetos para extender las capacidades de la herramienta de software ARC/INFO⁺ para manejar redes de servicios usando grafos espaciales.

Se plantea, también, la ampliación futura de la capacidad semántica del patrón Grafo Espacial a fin de modelar eventos dinámicos que permitan representar, por ejemplo, situaciones variables entre dos nodos, tales como el flujo a través de diámetros diferentes en un ducto.

Agradecimiento

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto G-9700824 (<http://www.centauro.ing.ula.ve/itsh>) financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) de Venezuela. Los autores agradecen el apoyo brindado por este organismo, así como los valiosos comentarios hechos por los evaluadores, los cuales ayudaron a mejorar la calidad del artículo.

Bibliografía

- [1] M. F. Worboys. GIS: A Computing Perspective. Taylor&Francis, London, 1995.
- [2] J. Bosque Sendra. Sistemas de Información Geográfica. Ediciones RIALP, Madrid, 1992.
- [3] R. Laurini and D. Thompson. Fundamentals of Spatial Information Systems. Academic Press, London, 1992.
- [4] J.Gutiérrez Puebla y M. Gould. SIG: Sistemas de Información Geográfica. Editorial Síntesis, Madrid, 1995.
- [5] National Center for Geographical Information Analysis. The NCGIA Core Curriculum. <http://www.ncgia.ucsb.edu/>, Octubre, 2000.

- [6] ESRI. Portal GIS. <http://www.gis.com>, Octubre, 2000.
- [7] Open GIS Consortium Home Page. <http://www.opengis.org>, Octubre, 2000.
- [8] M.Wackowicz. Object-Oriented Design for Temporal GIS. Taylor&Francis, London, 1999.
- [9] M. Grand. Patterns in Java. Volume 1, John Wiley & Sons, New York,1998.
- [10] E Gamma; R. Helm; R. Johnson and J. Vlissides. Design patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Addison-Wesley, Reading, 1995.
- [11] B. Brugge and A.H. Dutoit. Object-Oriented Software Engineering. Prentice Hall, New Jersey, 2000.
- [12] M. Fowler. Software Patterns. En S. Zamir (ED.) Handbook of Object Technology. CRC Press, Florida, 1999, pags. 36.1-36.8
- [13] J. Soukup. Pattern Template Library. In S. Zamir (ed.), Handbook of Object Technology, CRC Press, Florida, 1999, pags. 37.1-37.18.
- [14] J.A. Montilva. 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.
- [15] R.G. Busacker and T.L. Saaty. Finite Graphs and Networks: An Introduction with Applications. McGraw-Hill, 1965.
- [16] G. Booch; I. Jacobson and J. Rumbaugh. The Unified Modeling Language User Guide. Addison-Wesley, Reading 1998.
- [17] Y. Ramos. Patrones de Diseño para Redes en Ingeniería y Arquitectura Basados en Grafos Espaciales. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Postgrado en Computación. Mérida, Venezuela, 2000.