

3 Modelagem conceitual de dados geográficos

Karla A. V. Borges

Clodoveu A. Davis Jr.

Alberto H. F. Laender

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta recursos para a modelagem de dados geográficos, apoiados principalmente no modelo OMT-G. Inicialmente, resume um pouco do histórico dos modelos de dados geográficos e discute os níveis de abstração usuais para aplicações geográficas. Em seguida, descreve o modelo OMT-G, apresenta classes de restrições de integridade espaciais, e introduz um algoritmo de mapeamento de esquemas OMT-G para esquemas físicos, considerando o padrão OpenGIS para representação de objetos. Por fim, apresenta um exemplo de modelagem e tece algumas considerações finais.

Um modelo de dados é um conjunto de conceitos que podem ser usados para descrever a estrutura e as operações em um banco de dados (Elmasri e Navathe, 2004). O modelo busca sistematizar o entendimento que é desenvolvido a respeito de objetos e fenômenos que serão representados em um sistema informatizado. Os objetos e fenômenos reais, no entanto, são complexos demais para permitir uma representação completa, considerando os recursos à disposição dos sistemas gerenciadores de bancos de dados (SGBD) atuais. Desta forma, é necessário construir uma abstração dos objetos e fenômenos do mundo real, de modo a obter uma forma de representação conveniente, embora simplificada, que seja adequada às finalidades das aplicações do banco de dados.

A *abstração* de conceitos e entidades existentes no mundo real é uma parte importante da criação de sistemas de informação. O sucesso de

qualquer implementação em computador de um sistema de informação é dependente da qualidade da transposição de entidades do mundo real e suas interações para um banco de dados informatizado. A abstração funciona como uma ferramenta que nos ajuda a compreender o sistema, dividindo-o em componentes separados. Cada um desses componentes pode ser visualizado em diferentes níveis de complexidade e detalhe, de acordo com a necessidade de compreensão e representação das diversas entidades de interesse do sistema de informação e suas interações.

Os primeiros modelos de dados para as aplicações geográficas eram voltados para as estruturas internas dos SIG. O usuário era forçado a adequar os fenômenos espaciais às estruturas disponíveis no SIG a ser utilizado. Conseqüentemente, o processo de modelagem não oferecia mecanismos para a representação da realidade de forma mais próxima ao modelo mental do usuário. Ficava evidente que a modelagem de aplicações geográficas necessitava de modelos mais adequados, capazes de capturar a semântica dos dados geográficos, oferecendo mecanismos de abstração mais elevados e independência de implementação. Apesar de toda a expressividade oferecida pelas técnicas tradicionais de modelagem, dificuldades surgem devido ao fato de que os dados geográficos possuem aspectos peculiares, particularmente com respeito à codificação da localização espacial e do tempo de observação, bem como em relação ao registro de fatores externos, como sua precisão de obtenção. A modelagem do mundo real é uma atividade complexa porque envolve a *discretização* do espaço como parte do processo de abstração, visando obter representações adequadas aos fenômenos geográficos.

Os fatores envolvidos nesse processo de discretização do espaço são inúmeros. Entre eles citamos:

- **Transcrição da informação geográfica em unidades lógicas de dados** – Para Frank e Goodchild (1990), o esquema de uma aplicação geográfica é uma representação limitada da realidade, tendo em vista a natureza finita e discreta da representação nos computadores. Por maior que seja o nível de abstração utilizado, a realidade é modelada através de conceitos geométricos (Frank, 1992) e, para que esses conceitos sejam implementados em computadores, eles precisam ser formalizados, sendo necessário um maior número de conceitos

abstratos para descrever os dados, e um maior número de operações apropriadas, que podem ser definidas de modo independente da implementação (Mark e Frank, 1990).

- **Forma como as pessoas percebem o espaço** – O aspecto cognitivo na percepção espacial é um dos aspectos que faz com que a modelagem de dados geográficos seja diferente da modelagem tradicional. Dependendo do observador, de sua experiência e de sua necessidade específica, uma mesma entidade geográfica pode ser percebida de diversas formas. Uma escola, por exemplo, poderá ser representada usando um ponto (posicionado de forma aproximada), como uma área (do terreno que ocupa), ou como um conjunto de edificações, dependendo do observador e do que ele pretende obter com essa representação. A escala de representação exige que a mesma entidade geográfica possa ser representada por diferentes formas geométricas, com detalhamento variável. O uso de múltiplas representações para a mesma entidade pode ocorrer simultaneamente, usando-se várias formas geométricas para uma mesma entidade geográfica, ou poderá ser exclusiva, fazendo com que uma representação seja válida para visualização em determinadas circunstâncias, como, por exemplo, uma determinada faixa de escalas.
- **Natureza diversificada dos dados geográficos** – Além de geometria, localização no espaço, informações associadas e características temporais, os dados geográficos ainda podem prover de origens distintas. Dados ambientais, por exemplo, são derivados de dados como topografia, clima e tempo, propriedades do solo, propriedades geológicas, cobertura da terra, uso da terra, e hidrografia. Alguns desses fenômenos, como elevação e propriedades do solo, variam continuamente sobre o espaço (visão de *campos*). Outros, como montanhas e bacias hidrográficas, podem ser individualizados (visão de *objetos*). Alguns podem estar em ambas as categorias, dependendo do nível de detalhe considerado.
- **Existência de relações espaciais (topológicas, métricas, de ordem e fuzzy)** – Essas relações são abstrações que nos ajudam a compreender como no mundo real os objetos se relacionam uns com os outros (Mark e Frank, 1990).

3.2 Modelos de dados geográficos

Modelos de dados semânticos e orientados a objetos, tais como ER (Chen, 1976), OMT (Rumbaugh et al., 1991), IFO (Abiteboul e Hull, 1987), UML (Rational Software Corporation, 1997) e outros, têm sido largamente utilizados para a modelagem de aplicações geográficas. Apesar da grande expressividade desses modelos, eles apresentam limitações para a adequada modelagem de aplicações geográficas, já que não possuem primitivas apropriadas para a representação de dados espaciais.

Modelos de dados para aplicações geográficas têm necessidades adicionais, tanto com relação à abstração de conceitos e entidades, quanto ao tipo de entidades representáveis e seu inter-relacionamento. Diversas propostas existem atualmente, principalmente focalizadas em estender os modelos criados para aplicações convencionais, como GeoOOA (Kösters et al., 1997), MODUL-R (Bédard et al., 1996), GMOD (Oliveira et al., 1997), IFO para aplicações geográficas (Worboys et al., 1990), GISER (Shekhar et al., 1997), OMT-G (Borges et al., 2001), GeoFrame (Lisboa Filho, 1997), MADS (Parent et al., 1999). Todos esses modelos procuram refletir melhor as necessidades de aplicações geográficas. A escolha de um deles pode ser feita observando as necessidades de modelagem quanto à abstração de conceitos geográficos, ao atendimento de requisitos usuais para modelos de dados (como clareza e facilidade de uso) (Borges et al., 2001), e à possibilidade de mapeamento dos esquemas produzidos para a implementação em SGBD espaciais, o que inclui a necessária identificação de restrições de integridade espaciais (Borges et al., 2002) (Davis Jr. et al., 2005).

3.3 Níveis de abstração de dados geográficos

Modelos de dados são classificados de acordo com o nível de abstração empregado. Para aplicações geográficas, são considerados quatro níveis distintos de abstração:

Nível do mundo real – Contém os fenômenos geográficos reais a representar, como rios, ruas e cobertura vegetal.

Nível de representação conceitual – Oferece um conjunto de conceitos formais com os quais as entidades geográficas podem ser modeladas da forma como são percebidas pelo usuário, em um alto nível de abstração. Neste nível são definidas as classes básicas, contínuas ou discretas, que serão criadas no banco de dados. Essas classes estão associadas a classes de representação espacial, que variam de acordo com o grau de percepção que o usuário tem sobre o assunto. Essa preocupação não aparece com frequência nas metodologias tradicionais de modelagem de dados, uma vez que as aplicações convencionais raramente precisam lidar com aspectos relativos à representação espacial (única ou múltipla) de objetos.

Nível de apresentação – Oferece ferramentas com as quais se pode especificar os diferentes aspectos visuais que as entidades geográficas têm de assumir ao longo de seu uso em aplicações.

Nível de implementação – define padrões, formas de armazenamento e estruturas de dados para implementar cada tipo de representação, os relacionamentos entre elas e as necessárias funções e métodos.

O modelo OMT-G, descrito a seguir, atua nos níveis de representação conceitual e apresentação. No nível de implementação, situam-se as linguagens de definição de dados associadas a SGBD espaciais. Apresentaremos mais adiante um algoritmo de mapeamento entre esquemas OMT-G e estruturas físicas, definidas pelo padrão OpenGIS, conforme implementadas no SGBD Oracle Spatial.

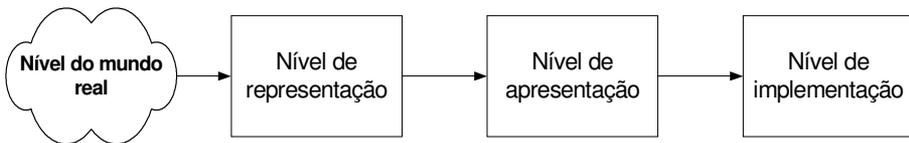


Figura 3.1 – Níveis de abstração de aplicações geográficas. Fonte: adaptado de (Borges et al., 2001).

3.4 Modelo de dados OMT-G

3.4.1 Visão geral do modelo

O modelo OMT-G parte das primitivas definidas para o diagrama de classes da *Unified Modeling Language* (UML) (Rational Software Corporation, 1997), introduzindo primitivas geográficas com o objetivo de aumentar a capacidade de representação semântica daquele modelo e, portanto reduzindo a distância entre o modelo mental do espaço a ser modelado e o modelo de representação usual. Portanto, o modelo OMT-G provê primitivas para modelar a geometria e a topologia dos dados geográficos, oferecendo suporte a estruturas topológicas “todo-parte”, estruturas de rede, múltiplas representações de objetos e relacionamentos espaciais. Além disso, o modelo permite a especificação de atributos alfanuméricos e métodos associados para cada classe. Os principais pontos do modelo são sua expressividade gráfica e sua capacidade de codificação, uma vez que anotações textuais são substituídas pelo desenho de relacionamentos explícitos, que denotam a dinâmica da interação entre os diversos objetos espaciais e não espaciais.

O modelo OMT-G é baseado em três conceitos principais: *classes*, *relacionamentos* e *restrições de integridade espaciais*. Classes e relacionamentos definem as primitivas básicas usadas para criar esquemas estáticos de aplicação. OMT-G propõe o uso de três diferentes diagramas no processo de desenvolvimento de uma aplicação geográfica. O primeiro e mais usual é o *diagrama de classes*, no qual todas as classes são especificadas junto com suas representações e relacionamentos. A partir do diagrama de classes é possível derivar um conjunto de restrições de integridade espaciais, que deve ser observado na implementação. Quando o diagrama de classes especifica múltiplas representações ou a derivação de uma classe a partir de outra, é necessário desenvolver um *diagrama de transformação*. Nele todo o processo de transformação pode ser especificado, permitindo a identificação dos métodos necessários para a implementação. Finalmente, para especificar as alternativas de visualização que cada representação pode assumir, é necessário

desenvolver um *diagrama de apresentação*. As primitivas para cada um desses diagramas são detalhadas nas próximas seções.

A identificação de restrições de integridade espacial é uma atividade importante no projeto de uma aplicação, e consiste na identificação de condições que precisam ser garantidas para que o banco de dados esteja sempre íntegro. Os principais tipos de restrições de integridade, que ocorrem frequentemente na modelagem de banco de dados convencionais, são restrições de *domínio*, de *chave*, de *integridade referencial* e de *integridade semântica* (Elmasri e Navathe, 2004). Cockcroft (1997) estende essa classificação com o objetivo de abranger as peculiaridades dos dados espaciais, incluindo restrições *topológicas*, *semânticas* e *definidas pelo usuário*. Restrições de integridade topológicas consideram as propriedades geométricas e as relações espaciais dos objetos. Existem vários estudos teóricos dos princípios que formalmente definem os relacionamentos espaciais (Egenhofer e Franzosa, 1991). Esses princípios podem ser aplicados entre entidades para prover a base do controle de integridade. As restrições de integridade semânticas dizem respeito ao *significado* implícito às feições geográficas; um exemplo desta restrição é uma regra que impede que edifícios sejam interceptados por trechos de logradouro. As restrições de integridade definidas pelo usuário permitem manter a consistência do banco de dados atuando como “regras de negócio”. Um exemplo do uso desta restrição é na localização de postos de gasolina, os quais, por razão legal, precisam estar a pelo menos 200 metros de distância de qualquer escola. Restrições definidas pelo usuário podem ser armazenadas e garantidas por um repositório ativo.

As primitivas dos diagramas de classe, transformação e apresentação são apresentadas a seguir.

3.4.2 Diagrama de classes

No OMT-G o diagrama de classes é usado para descrever a estrutura e o conteúdo de um banco de dados geográfico. Ele contém elementos específicos da estrutura de um banco de dados, em especial classes de objetos e seus relacionamentos. O diagrama de classes contém apenas regras e descrições que definem conceitualmente como os dados serão estruturados, incluindo a informação do tipo de representação que será

adotada para cada classe. Por esta razão, o diagrama de classe é o produto fundamental do nível de representação conceitual (Figura 3.1). A seguir estão descritas as primitivas do modelo OMT-G que são usadas para criar o diagrama de classes para as aplicações geográficas.

Classes

As classes definidas pelo modelo OMT-G representam os três grandes grupos de dados (contínuos, discretos e não-espaciais) que podem ser encontrados nas aplicações geográficas, proporcionando assim, uma visão integrada do espaço modelado. Suas classes podem ser *georreferenciadas* ou *convencionais*.

A distinção entre classes convencionais e georreferenciadas permite que aplicações diferentes compartilhem dados não espaciais, desta forma facilitando o desenvolvimento de aplicações integradas e a reutilização de dados. A *classe georreferenciada* descreve um conjunto de objetos que possuem representação espacial e estão associados a regiões da superfície da terra (Câmara, 1995), representando a visão de campos e de objetos. A *classe Convencional* descreve um conjunto de objetos com propriedades, comportamento, relacionamentos, e semântica semelhantes, e que possuem alguma relação com os objetos espaciais, mas que não possuem propriedades geométricas.

As classes georreferenciadas são especializadas em classes do tipo *geo-campo* e *geo-objeto*. Classes *geo-campo* representam objetos e fenômenos distribuídos continuamente no espaço, correspondendo a variáveis como tipo de solo, relevo e geologia (Câmara, 1995). Classes *geo-objeto* representam objetos geográficos particulares, individualizáveis, associados a elementos do mundo real, como edifícios, rios e árvores. As classes convencionais são simbolizadas exatamente como na UML. As classes georreferenciadas são simbolizadas no modelo OMT-G de forma semelhante (Figura 3.2a), incluindo no canto superior esquerdo um retângulo que é usado para indicar a forma geométrica da representação. Em ambos os casos, símbolos simplificados podem ser usados. Os objetos podem ou não ter atributos não espaciais associados, listados na seção central da representação completa. Métodos ou operações são especificados na seção inferior do retângulo.

O modelo OMT-G apresenta um conjunto fixo de alternativas de representação geométrica, usando uma simbologia que distingue geo-objetos e geo-campos (Figura 3.3 e Figura 3.4).

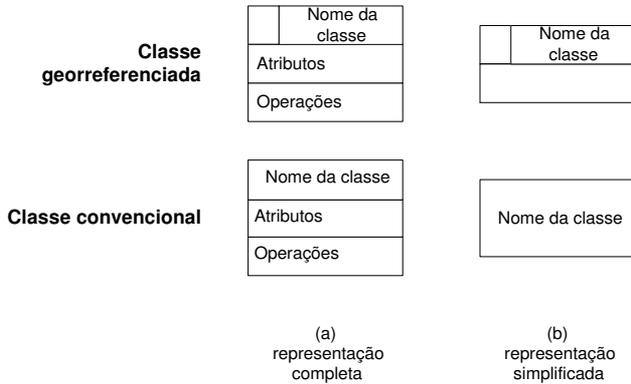


Figura 3.2 – Notação gráfica para as classes do modelo OMT-G.

O modelo OMT-G define cinco classes descendentes de geo-campo: isolinhas, subdivisão planar, tesselação, amostragem e malha triangular (*triangulated irregular network*, TIN) (Figura 3.3), e duas classes descendentes de geo-objeto: geo-objeto com geometria e geo-objeto com geometria e topologia (Figura 3.4).

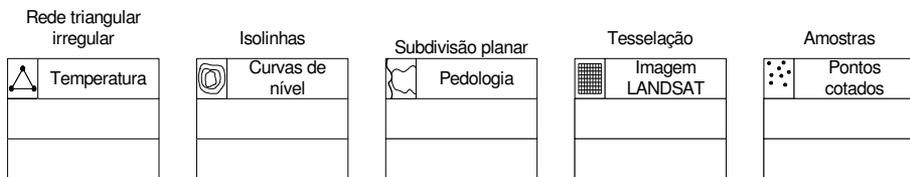


Figura 3.3 – Geo-campos.

A classe geo-objeto com geometria representa objetos que possuem apenas propriedades geométricas, e é especializada em classes: *Ponto*, *Linha* e *Polígono*. Como exemplo citamos, respectivamente, árvore, meio-fio e edificação (Figura 3.4). A classe geo-objeto com geometria e topologia representa objetos que possuem, além das propriedades

geométricas, propriedades de conectividade topológica, sendo especificamente voltadas para a representação de estruturas em rede, tais como sistemas de abastecimento de água ou fornecimento de energia elétrica. Essas propriedades estão presentes em classes descendentes que representam nós e arcos, da forma usualmente adotada na teoria dos grafos. Os arcos podem ser unidirecionais, como em redes de esgoto, ou bidirecionais, como em redes de telecomunicações. Assim, as especializações previstas são denominadas *nó de rede*, *arco unidirecional* e *arco bidirecional*. Os segmentos orientados traduzem o sentido do fluxo da rede, se unidirecional ou bidirecional, dando mais semântica à representação. O foco do modelo OMT-G com respeito a redes não está concentrado na implementação do relacionamento entre seus elementos, mas sim na semântica da conexão entre elementos de rede, que é um fator relevante para o estabelecimento de regras que garantam a integridade do banco de dados. Nas aplicações de rede os relacionamentos do tipo *conectividade* e *adjacência* são fundamentais. Alguns SIG oferecem suporte ao armazenamento desses tipos de relacionamentos.

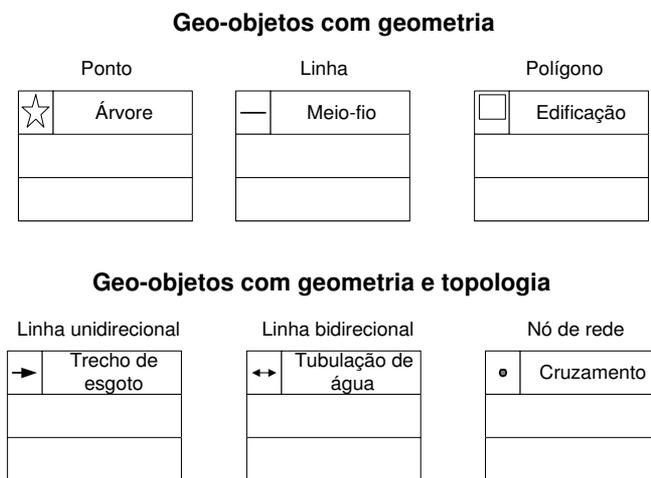


Figura 3.4 – Geo-objetos.

Relacionamentos

Um problema existente na maioria dos modelos de dados é o fato deles ignorarem a possibilidade de modelagem dos relacionamentos entre fenômenos do mundo real (Oliveira et al., 1997). Considerando a importância das relações espaciais e não espaciais na compreensão do espaço modelado, o modelo OMT-G representa três tipos de relacionamentos entre suas classes: associações simples, relacionamentos topológicos em rede e relacionamentos espaciais. A discriminação de tais relacionamentos tem o objetivo de definir explicitamente o tipo de interação que ocorre entre as classes.

Associações simples representam relacionamentos estruturais entre objetos de classes diferentes, convencionais ou georreferenciadas. *Relacionamentos espaciais* representam relações topológicas, métricas, de ordem e *fuzzy*. Algumas relações podem ser derivadas automaticamente, a partir da forma geométrica do objeto, no momento da entrada de dados ou da execução de alguma análise espacial. Relacionamentos topológicos são um exemplo dessa possibilidade. Outras relações no entanto, precisam ser especificadas explicitamente pelo usuário, para permitir que o sistema armazene e mantenha atualizada aquela informação. Estas relações são chamadas de *explícitas* (Peuquet, 1984).

No modelo OMT-G, associações simples são indicadas por linhas contínuas, enquanto relacionamentos espaciais são indicados por linhas pontilhadas (Figura 3.5a/b). Isso torna fácil a distinção visual entre relacionamentos baseados em atributos alfanuméricos e baseados na localização e forma geométrica dos objetos. O nome do relacionamento é anotado sobre a linha, e uma seta usada para deixar clara a direção de leitura (por exemplo, na Figura 3.5b, lê-se “lote contém edificação”).

Os relacionamentos de rede são relacionamentos entre objetos que estão conectados uns com os outros. Relacionamentos de rede são indicados por duas linhas pontilhadas paralelas, entre as quais o nome do relacionamento é anotado (Figura 3.5c). Os relacionamentos são em geral especificados entre uma classe de nós e uma classe de arcos, mas estruturas de redes sem nós podem ser definidas, especificando um relacionamento recursivo sobre uma classe de arcos (Figura 3.5d).

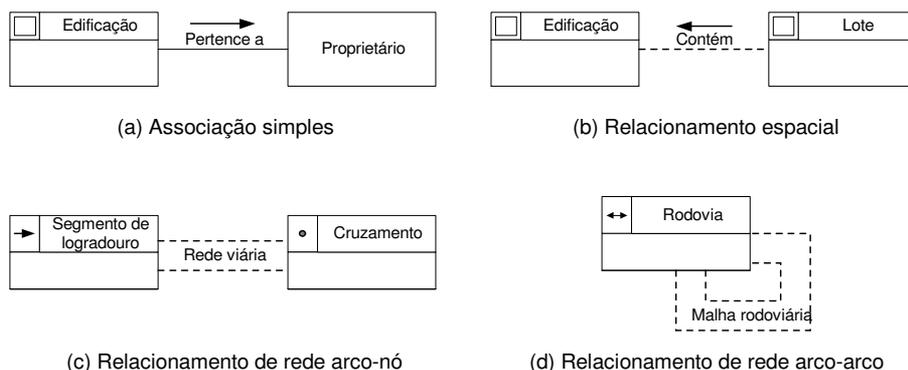


Figura 3.5 – Relacionamentos.

Com base em trabalhos anteriores (Câmara, 1995) (Egenhofer e Franzosa, 1991) (Egenhofer e Herring, 1990), o modelo OMT-G considera um conjunto de relacionamentos espaciais entre classes georreferenciadas. Em (Clementini et al., 1993), um conjunto mínimo de relacionamentos espaciais é identificado, compreendendo somente cinco relacionamentos espaciais, a partir dos quais todos os outros podem ser especificados: *toca*, *em*, *cruza*, *sobreposição* e *disjunto*. Relacionamentos definidos com base nas matrizes de 4 interseções (Egenhofer e Franzosa, 1991) e de 9 interseções (Egenhofer, 1993) têm sido adotados de forma crescente pelos SIG e SGBD espaciais comerciais. Entretanto, consideramos que, eventualmente, um conjunto maior de relacionamentos é necessário devido a fatores culturais ou semânticos que são familiares para os usuários, incluindo relacionamentos de significado “difuso”, tais como *perto de*, ou *ao norte de* (Goyal, 2000).

Alguns relacionamentos só são possíveis entre determinadas classes, pois são dependentes da representação geométrica. Por exemplo, o relacionamento *contém* pressupõe que uma das classes envolvidas seja um polígono. Neste aspecto, as aplicações tradicionais diferem das geográficas, onde as associações entre classes convencionais podem ser feitas livremente, sendo independente de fatores como comportamento geométrico. O conjunto de conceitos que o usuário tem sobre cada objeto do mundo real sugere uma determinada representação porque existe uma interdependência entre a representação, o tipo de interpretação e a finalidade que será dada a cada entidade geográfica. No modelo OMT-G

isto é considerado para que sejam estabelecidas as relações que envolvem classes georreferenciadas.

Cardinalidade

Os relacionamentos são caracterizados por sua cardinalidade. A cardinalidade representa o número de instâncias de uma classe que podem estar associadas a instâncias da outra classe. A notação de cardinalidade adotada pelo modelo OMT-G (Figura 3.6) é a mesma usada na UML (Rational Software Corporation, 1997).

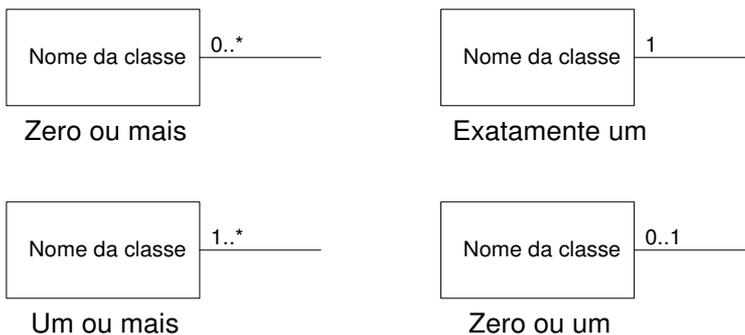


Figura 3.6 – Cardinalidade.

Generalização e especialização

Generalização é o processo de definição de classes mais genéricas (superclasses) a partir de classes com características semelhantes (subclasses) (Elmasri e Navathe, 2004) (Laender e Flynn, 1994). A especialização é o processo inverso, no qual classes mais específicas são detalhadas a partir de classes genéricas, adicionando novas propriedades na forma de atributos. Cada subclasse herda atributos, operações e associações da superclasse.

No modelo OMT-G, as abstrações de generalização e especialização se aplicam tanto a classes georreferenciadas quanto a classes convencionais, seguindo as definições e a notação propostas na UML, em que um triângulo conecta a superclasse a suas subclasses. (Figura 3.7). Cada generalização pode ter um *discriminador* associado, que indica qual

propriedade ou característica está sendo abstraída pelo relacionamento de generalização.

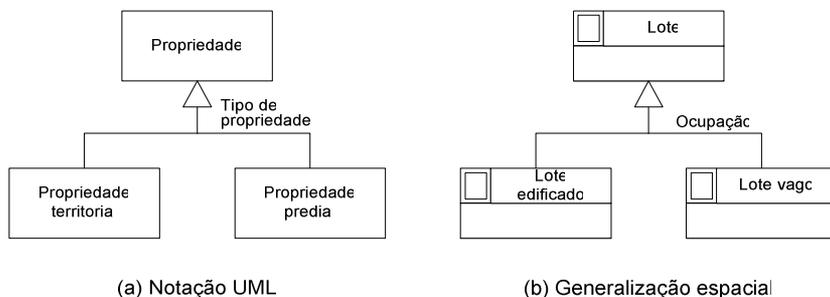


Figura 3.7 - Generalização/especialização.

Uma generalização (espacial ou não) pode ser especificada como *total* ou *parcial* (Laender e Flynn, 1994; Rational Software Corporation, 1997). Uma generalização é total quando a união de todas as instâncias das subclasses equivale ao conjunto completo de instâncias da superclasse. A UML representa a totalidade através do uso dos elementos de restrição predefinidos como *completo* e *incompleto*, mas no modelo OMT-G foi adotada a notação introduzida em (Laender e Flynn, 1994), na qual um ponto é colocado no ápice do triângulo para denotar a totalidade (Figura 3.8). Além disso, o modelo OMT-G também adota a notação OMT (Rumbaugh et al., 1991) para os elementos de restrição predefinidos como *disjunto* e *sobreposto* da UML, ou seja, em uma generalização disjunta o triângulo é deixado em branco e em uma generalização sobreposta o triângulo é preenchido. Portanto, a combinação de disjunção e totalidade gera quatro tipos de restrições aplicáveis a generalização/especialização. A Figura 3.8 apresenta exemplos de cada combinação.

Agregação

A agregação é uma forma especial de associação entre objetos, onde se considera que um deles é formado a partir de outros. A notação gráfica usada no modelo OMT-G segue a empregada na UML (Figura 3.9). Uma agregação pode ocorrer entre classes convencionais, entre classes

georreferenciadas ou entre uma classe convencional e uma classe georreferenciada (Figura 3.10). Quando a agregação ocorre entre classes georreferenciadas, é necessário usar a *agregação espacial*.

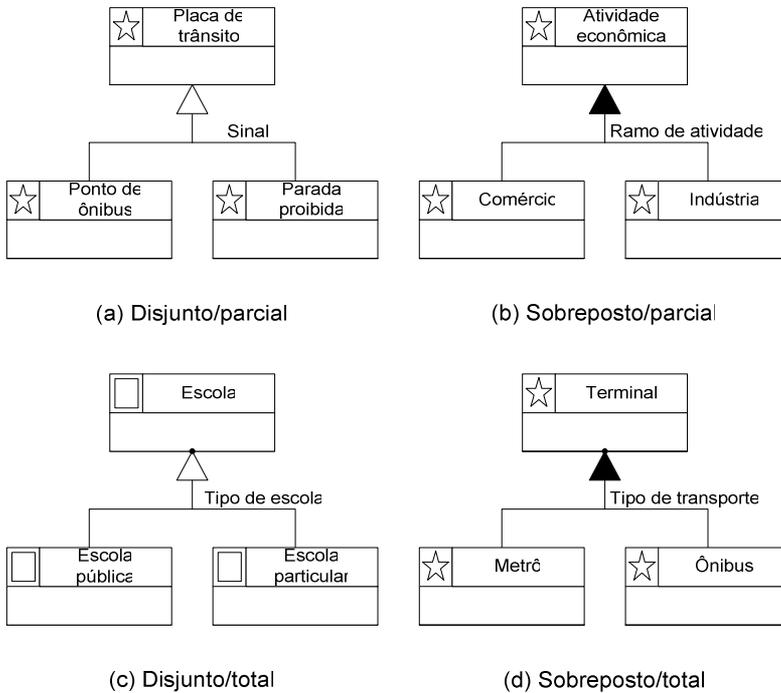


Figura 3.8 – Exemplos de generalização espacial.

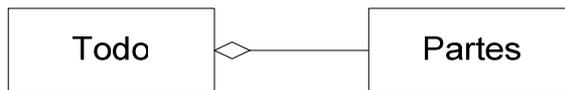


Figura 3.9 – Agregação na notação UML.



Figura 3.10 – Agregação entre uma classe convencional e uma georreferenciada.

A *agregação espacial* é um caso especial de agregação na qual são explicitados relacionamentos topológicos “todo-parte” (Abrantes e Carapuça, 1994) (Kösters et al., 1997). A utilização desse tipo de agregação impõe restrições de integridade espacial no que diz respeito à existência do objeto agregado e dos sub-objetos. Além de o modelo ganhar mais clareza e expressividade, a observação dessas regras contribui para a manutenção da integridade semântica do banco de dados geográfico. Muitos erros no processo de entrada de dados podem ser evitados, se procedimentos baseados nessas restrições forem implementados.

A agregação espacial indica que a geometria de cada parte deve estar contida na geometria do todo. Não é permitida a superposição entre geometria das partes, a geometria do todo deve ser totalmente coberta pela geometria das partes, configurando assim, uma *partição do plano* ou *subdivisão planar* (Davis Jr., 2000) (Preparata e Shamos, 1985). A notação para essa primitiva é apresentada na Figura 3.11, onde mostra uma situação em que quadras são compostas de lotes, ou seja, as quadras são geometricamente equivalentes à união dos lotes contidos nelas.

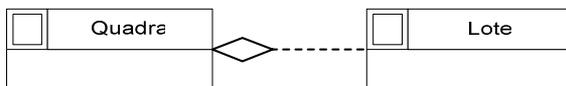


Figura 3.11 – Agregação espacial (“todo-parte”).

Generalização conceitual

A *generalização*¹, no sentido cartográfico, pode ser definida como uma série de transformações que são realizadas sobre a representação da informação espacial, cujo objetivo é melhorar a legibilidade e aumentar a facilidade de compreensão dos dados por parte do usuário do mapa. Por exemplo, um objeto do mundo real pode ser diversas representações espaciais, de acordo com a escala de visualização. Uma cidade pode ser

¹ Não se deve confundir a generalização cartográfica com a generalização utilizada como um tipo de abstração usado nos modelos de dados semânticos e orientados a objetos ELMASRI, R.; NAVATHE, S. **Fundamentals of Database Systems**. Pearson Education, 2004..

representada em um mapa de escala pequena por um ponto, e como um polígono em um mapa de escala maior (Davis Jr. e Laender, 1999). Neste sentido, o termo *representação* é usado no sentido de representação da forma geométrica do objeto geográfico.

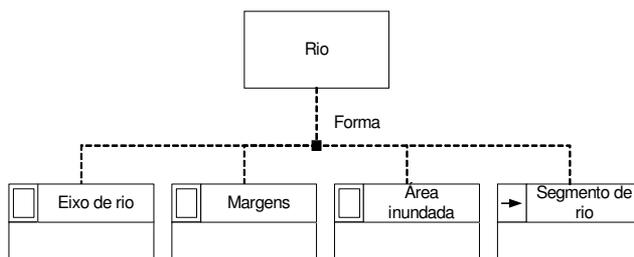
Definir se a representação deve ser simples ou mais elaborada depende da percepção que o usuário tem do objeto correspondente no mundo real, e como essa representação afeta os relacionamentos espaciais que podem ser estabelecidos com outros objetos modelados. Considerando a necessidade de tais relacionamentos, pode haver a demanda para mais de uma representação para um dado objeto. Isso acontece, por exemplo, quando a informação geográfica precisa ser compartilhada entre diversas aplicações em um ambiente corporativo (ou cooperativo).

Portanto, no desenvolvimento de aplicações geográficas, existem situações em que duas ou mais representações para um objeto do mundo real precisam coexistir. Isso significa que, dependendo da visão do usuário, é necessário ter formas geométricas distintas para representar o mesmo objeto geográfico, com a mesma resolução e ao mesmo tempo. Além disso, é freqüente a necessidade de se representar o mesmo objeto com graus variáveis de resolução e detalhamento, configurando representações adequadas para diferentes faixas de escalas.

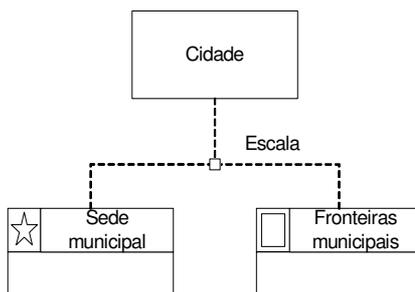
A primitiva de *generalização conceitual* foi incluída no modelo OMT-G para registrar a necessidade de representações diferentes para um mesmo objeto. Nesse tipo de relacionamento, a superclasse não tem uma representação específica, já que poderá ser percebida de maneiras diferentes, conforme especificado nas subclasses. Essas são representadas por formas geométricas distintas, podendo herdar os atributos alfanuméricos da superclasse e ainda possuir atributos próprios. O objetivo é permitir a especificação de relacionamentos independentes envolvendo cada alternativa de representação considerada.

A generalização conceitual pode ocorrer em duas variações: de acordo com a *forma geométrica* (Figura 3.12a) ou de acordo com a *escala* (Figura 3.12b). A *variação de acordo com a forma* é utilizada para registrar a existência de múltiplas representações para uma classe, independente de escala. A descrição geométrica da superclasse é deduzida a partir do uso

das subclasses. Por exemplo, um rio pode ser percebido como um espaço entre suas margens, como um polígono de água ou como um fluxo (linha direcionada), formando a rede hidrográfica (Figura 3.12a). A *variação de acordo com a escala* é usada na representação de diferentes aspectos geométricos de uma classe, cada aspecto corresponde a uma faixa de escalas. Uma cidade pode ser representada por suas fronteiras políticas (um polígono) em uma escala maior, e por um símbolo (um ponto) em uma escala menor (Figura 3.12b).



(a) Variação de acordo com a forma (sobreposto)



(b) Variação de acordo com a escala (disjunto)

Figura 3.12 - Generalização conceitual.

Uma estrutura como a apresentada na Figura 3.12 é rara em esquemas de aplicações geográficas, porque as decisões quanto à modelagem de são freqüentemente (e erroneamente) tomadas já pensando na apresentação final, conforme exigido pela aplicação que está sendo modelada. Ou seja, o esquema é muitas vezes concebido visando

um tipo específico de visualização, antecipando uma exigência da aplicação. Esta tendência acaba por inibir usos que exijam representações alternativas, ou aplicações que compartilhem dados geográficos (Davis Jr., 2000).

3.4.3 Diagrama de transformação

O diagrama de transformação, proposto para o modelo OMT-G em (Davis Jr. e Laender, 1999), adota uma notação semelhante à proposta na UML para os diagramas de estados e de atividades (Rational Software Corporation, 1997), e é usado para especificar transformações entre classes. Como tanto a origem quanto o resultado das transformações são sempre as representações de cada classe, o diagrama de transformação também está no nível conceitual de representação. Observe que o diagrama de transformação não pretende descrever aspectos dinâmicos da aplicação, como a interface com o usuário e a execução de consultas, restringindo-se à manipulação de representações.

Os diagramas de transformação são baseados nas primitivas de classe, conforme definidas para os diagramas de classes. As classes que estão envolvidas em algum tipo de transformação são conectadas por meio de linhas contínuas, com setas que indicam a direção da transformação. Os operadores de transformação (TR) envolvidos e seus parâmetros, quando houver, são indicados por meio de texto sobre a linha que indica a transformação.

No diagrama de transformação, pode-se indicar se o resultado da transformação precisa ou não ser materializado. Classes resultantes muito simples, ou que são passos intermediários em uma transformação mais complexa, freqüentemente não precisam ser materializadas, e podem ser armazenadas apenas temporariamente. Tais classes temporárias são indicadas usando linhas tracejadas em seu contorno. As classes que são resultantes de alguma transformação e que precisam ser materializadas (devido à complexidade do processo ou às necessidades específicas da aplicação) são denotadas com linhas contínuas, exatamente como no diagrama de classes.

As transformações indicadas no diagrama de classes podem relacionar qualquer número de classes originais, bem como qualquer número de classes resultantes, dependendo da natureza da operação de

transformação. Cadeias de transformações também podem ser definidas, permitindo, dessa forma, a especificação de processos complexos de análise espacial.

Um operador de transformação adequado para o diagrama de transformação pode ser basicamente qualquer algoritmo que manipula e modifica a representação de um objeto. Algumas operações podem ser melhor caracterizadas como operações TR quando existe apenas uma classe de origem e uma classe resultante, e a classe resultante é ou (1) de natureza diferente da classe original (ou seja, pertence a uma classe georreferenciada diferente), ou (2) menos detalhada que a classe original, mantendo a natureza da representação (Davis Jr. e Laender, 1999).

A especificação de transformações no diagrama de transformação é em geral exigida quando as primitivas de generalização conceitual e de agregação espacial são usadas no diagrama de classes. Essas duas primitivas são indicativas da possibilidade de produzir uma representação a partir de outras.

Um estudo das possíveis transformações entre representações de geo-objetos e geo-campos pode ser visto em (Davis Jr., 2000) (Davis Jr. e Laender, 1999). Os operadores aplicados para cada transformação são baseados em algoritmos definidos nas áreas de geometria computacional, generalização cartográfica e análise espacial. A Seção 3.7 traz um exemplo do uso de diagramas de transformação.

3.4.4 Diagrama de apresentação

O diagrama de apresentação para o modelo OMT-G pertence ao nível de apresentação. Em contraste com o conceito de representação, o termo apresentação é usado no sentido de determinar o aspecto visual ou gráfico (envolvendo parâmetros como cor, tipo de linha, espessura da linha e padrão de hachura), de geo-objetos e geo-campos, no papel ou na tela do computador.

No diagrama de apresentação estão reunidos os requisitos definidos pelo usuário quanto às alternativas de apresentação e saída para cada objeto geográfico. Essas alternativas podem incluir apresentações criadas especificamente para visualização em tela, para impressão na forma de

mapas ou cartas, para interpretação visual em um processo de análise, e outras.

Cada apresentação é definida a partir de uma representação contida no diagrama de classes ou no diagrama de transformação do nível de representação. Operações de transformação para apresentação (TA) são especificadas, permitindo obter o aspecto visual desejado a partir da simples forma geométrica, definida para a representação. Observe-se que a operação TA não modifica a alternativa de representação definida previamente, nem muda o detalhamento definido no nível de representação. Se isso for necessário, uma nova representação tem de ser criada a partir de uma representação existente, usando as ferramentas de especificação de múltiplas representações (como a primitiva de generalização conceitual) e registrando essa demanda nos diagramas de classes e de transformação.

O diagrama de apresentação necessita de apenas três primitivas. A primeira é a própria primitiva de classes, definida para os diagramas de classes e de transformação. A segunda é usada para indicar a operação TA, de maneira semelhante à usada para denotar as transformações no diagrama de transformação. É composta de uma linha tracejada simples, com uma seta que indica o sentido da operação, sobre a qual é especificado o operador a ser usado. No processo de especificação dessa expressão de transformação, quaisquer características geométricas ou atributos alfanuméricos que foram definidos no nível de representação para a classe podem ser usadas como parâmetros. As linhas indicando operações TA são tracejadas para distingui-las visualmente das operações TR, especificadas no diagrama de transformação com linhas contínuas. A terceira primitiva serve para especificar uma apresentação, e contém duas seções. A seção superior indica o nome da classe, o nome da apresentação, e a aplicação na qual é usada. Nessa seção pode-se especificar uma faixa de escalas onde a apresentação será usada. A segunda é dividida em duas partes: à esquerda, um pictograma indica o aspecto visual dos objetos após a transformação e à direita são lançadas especificações mais precisas quanto aos atributos gráficos, incluindo cor da linha, tipo e espessura de linha, padrão de preenchimento, cor de preenchimento, e nome do símbolo (Figura 3.13). A especificação dos atributos gráficos pode ser feita já considerando a codificação de símbolos

usada pelo sistema de informação geográfica subjacente. Pode existir qualquer número de pictogramas na seção esquerda da primitiva de especificação de apresentações, cada qual associada a um valor ou faixa de valores obtidos a partir das características de cada objeto. Nesse caso, a seção da direita deve detalhar os atributos gráficos de cada apresentação gerada. Atributos comuns podem ser especificados apenas uma vez, enquanto atributos variáveis são especificados como listas de valores individuais. Como no caso do diagrama de transformação, os resultados das transformações (ou seja, as apresentações) são indicados com linhas tracejadas quando não precisam ser materializados no banco de dados e com linhas contínuas no caso contrário.

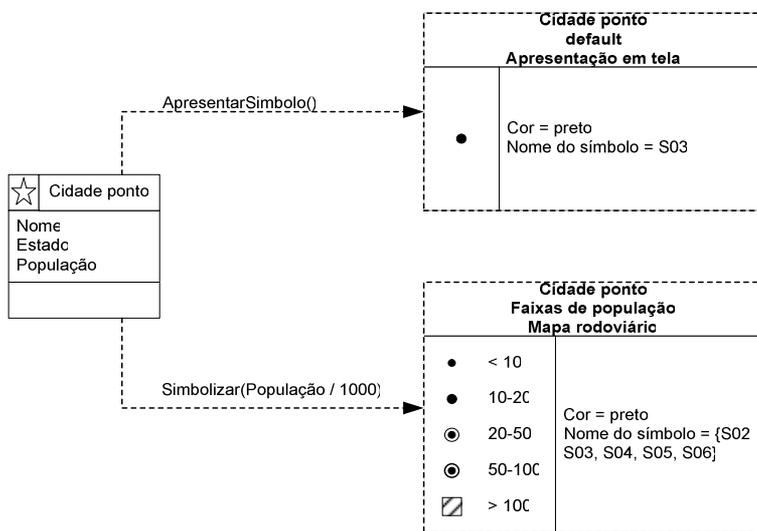


Figura 3.13 – Diagrama de apresentação para a classe cidade ponto.

Cada classe georreferenciada especificada no diagrama de classes precisa ter pelo menos uma apresentação correspondente especificada no diagrama de apresentação. Caso exista mais de uma apresentação para uma dada representação, uma delas deve ser identificada como a *default*. Alternativamente, cada usuário ou aplicação pode eleger sua apresentação *default*.

As operações TA mais comuns envolvem a simples definição de atributos gráficos. No entanto, outros operadores mais sofisticados, muitos dos quais derivados de operações da cartografia temática (classificação, simbolização, exagero, deslocamento, destaque) também podem ser empregados. Uma descrição detalhada dos operadores TA pode ser encontrada em (Davis Jr., 2000) (Davis Jr. e Laender, 1999). A Seção 3.7 exemplifica o uso deste diagrama.

3.5 Restrições de integridade espaciais

No modelo OMT-G, existem diversas restrições de integridade que são implícitas às primitivas do modelo ou que podem ser deduzidas a partir da análise dos diagramas. Assim, restrições de integridade topológica são definidas através de regras para geo-campos (Seção 3.5.1), relacionamentos espaciais (Seção 3.5.2), relacionamentos em rede (Seção 3.5.3) e para agregação espacial (Seção 3.5.4). Da mesma forma, restrições de integridade semântica são definidas através de regras associadas a relacionamentos espaciais. Já as restrições de integridade definidas pelo usuário podem ser modeladas como métodos associados a cada classe. Não estão incluídas aqui restrições de integridade referentes às formas geométricas vetoriais básicas (pontos, linhas e polígonos), fundamentais em SIG e SGBD espaciais, pois consideramos que são inerentes à sua implementação em qualquer produto.

Listamos a seguir as restrições de integridade inerentes às demais primitivas e conceitos do modelo OMT-G, baseadas em trabalhos anteriores (Borges et al., 1999) (Davis Jr. et al., 2001, 2005).

3.5.1 Restrições de integridade para geo-campos

As restrições de integridade R1 a R5 são decorrentes do conceito de geo-campo e de da semântica inerente a cada uma das representações suportada pelo modelo OMT-G.

R1 – Restrição de Preenchimento do Plano. Seja C um geo-campo e seja P um ponto tal que $P \subset C$. Então o valor $V(P) = f(P, C)$, i.e., o valor de C em P , pode ser univocamente determinado.

R2 – Isolinhas. Seja C um geo-campo. Sejam v_0, v_1, \dots, v_n $n+1$ pontos no plano. Sejam $a_0 = \overline{v_0 v_1}, a_1 = \overline{v_1 v_2}, \dots, a_{n-1} = \overline{v_{n-1} v_n}$ n segmentos,

conectando os pontos. Esses segmentos formam uma *isolinha* L se, e somente se, (1) a interseção dos segmentos adjacentes em L ocorre apenas no ponto extremo compartilhado pelos segmentos (*i. e.*, $a_i \cap a_{i+1} = v_{i+1}$), (2) segmentos não adjacentes não se interceptam (ou seja, $a_i \cap a_j = \emptyset$ para todo i, j tais que $j \neq i+1$), e (3) o valor de C em cada ponto P tal que $P \in a_i$, $0 \leq i \leq n-1$, é constante.

R3 – Tesselação. Seja C um geo-campo. Seja $T = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_n\}$ um conjunto de células de forma regular que cobrem C . T é uma *tesselação* de C se, e somente se, para qualquer ponto $P \in F$, existe exatamente uma célula correspondente $t_i \in T$ e, para cada célula t_i , o valor de C é determinado.

R4 – Subdivisão Planar. Seja C um geo-campo. Seja $A = \{A_0, A_1, A_2, \dots, A_n\}$ um conjunto de polígonos tais que $A_i \subset F$ para todo i , sendo $0 \leq i \leq n-1$. A forma uma *subdivisão planar* que representa C se, e somente se, para qualquer ponto $P \in F$ existir exatamente um polígono A_i correspondente, $A_i \in A$, para o qual o valor de C é determinado (ou seja, os polígonos não se sobrepõem e cobrem C completamente).

R5 – Malha Triangular. Seja C um geo-campo. Seja $T = \{T_0, T_1, T_2, \dots, T_n\}$ um conjunto de triângulos tais que $T_i \subset F$ para todo i , sendo $0 \leq i \leq n-1$. T forma uma *malha triangular* que representa C se, e somente se, para qualquer ponto $P \in F$, existir exatamente um triângulo T_i correspondente, $T_i \in T$, e o valor de C é determinado em todos os vértices de T_i .

3.5.2 Restrições de integridade referentes a relacionamentos topológicos

Restrições referentes a relacionamentos espaciais foram originalmente propostas para o modelo OMT-G baseadas em (Clementini et al., 1993), conforme apresentado em (Borges et al., 2002). Uma descrição detalhada destes relacionamentos está apresentada na Seção 2.9 deste livro.

3.5.3 Restrições de integridade para estruturas em rede

Estruturas em rede, ou seja, formadas por arcos e nós (unidirecionados ou bidirecionados) estão sujeitas às restrições usuais impostas a grafos, enquanto estruturas de dados. Como o modelo OMT-G considera

também o caso de redes formadas apenas por arcos, são apresentados a seguir duas restrições de integridade correspondentes a esses casos.

R6 – Redes arco-nó. Seja $G = \{N, A\}$ uma estrutura de rede, composta de um conjunto de nós $N = \{n_0, n_1, \dots, n_p\}$ e um conjunto de arcos $A = \{a_0, a_1, \dots, a_q\}$. Membros de N e membros de A são relacionados de acordo com as seguintes restrições: (1) para cada nó $n_i \in N$ deve existir pelo menos um arco $a_k \in A$; (2) para cada arco $a_k \in A$ devem existir exatamente dois nós $n_i, n_j \in N$.

R7 – Redes arco-arco. Seja $G = \{A\}$ uma estrutura de rede, composta de um conjunto de arcos $A = \{a_0, a_1, \dots, a_q\}$. A seguinte restrição se aplica: Cada arco $a_k \in A$ deve estar relacionado a pelo menos um outro arco $a_i \in A$, sendo $k \neq i$.

3.5.4 Restrições de integridade referentes à agregação espacial

A restrição a seguir é necessária para garantir a correta semântica de relacionamentos todo-parte no banco de dados.

R8 – Agregação espacial. Seja $P = \{P_0, P_1, \dots, P_n\}$ um conjunto de geo-objetos. P forma outro objeto, W , por agregação espacial se, e somente se (1) $P_i \cap W = P_i$ para todo i tal que $0 \leq i \leq n$, e (2) $\left(W \cap \bigcup_{i=0}^n P_i\right) = W$, e ainda (3) $((P_i \text{ toca } P_j) \vee (P_i \text{ disjunto } P_j)) = \text{VERDADEIRO}$ para todo i, j tais que $i \neq j$.

3.6 Mapeamento para esquemas de implementação

Apresentamos a seguir uma proposta de mapeamento de esquemas OMT-G no nível de representação conceitual para esquemas de implementação. Em seguida, faremos algumas considerações sobre alternativas de estruturação física para corresponder a classes georreferenciadas.

3.6.1 Mapeamento de esquemas conceituais OMT-G para esquemas de implementação

Na fase de mapeamento, é necessário o conhecimento de qual SGBD será usado na aplicação. No caso deste capítulo, a fim de simplificar a explicação, consideramos por enquanto um SGBD espacial objeto-relacional genérico, em que os dados alfanuméricos e geográficos estão codificados num mesmo registro, e os dados geográficos são codificados de acordo com as especificações do OpenGIS Consortium (1999). Como veremos na próxima seção, é possível optar entre algumas organizações físicas diferentes; esta opção pode ser feita após a conclusão do mapeamento, ou em uma etapa posterior de *tuning* do banco de dados.

Inicialmente, faremos um mapeamento das classes de objetos presentes no diagrama de classes do OMT-G para estruturas objeto-relacionais adequadas. Em seguida, cuidaremos da escolha de estruturas de dados para a implementação das alternativas de representação previstas no modelo OMT-G. Por fim, faremos o mapeamento dos relacionamentos necessários. Observe que relacionamentos espaciais em geral não precisam ser materializados no esquema de implementação, uma vez que a associação entre os objetos envolvidos pode ser feita por meio de algoritmos geométricos (vide Capítulo 2 deste livro).

A Tabela 3.1 é uma adaptação da tabela de correspondência entre os modelos ER e relacional apresentada em (Elmasri e Navathe, 2004), e resume uma correspondência básica entre os construtores dos modelos OMT-G e objeto-relacional.

Tabela 3.1 - Mapeamento entre primitivas OMT-G e objeto-relacionais

Modelo OMT-G	Modelo Objeto-relacional
Classe Georreferenciada	Relação “entidade” com representação geométrica associada (vide Seção 3.6.2); se do tipo geo-campo, restrições de integridade referentes à representação adotada (R1 a R5)
Classe Convencional	Relação “entidade”

Associação simples com cardinalidade 1:1 ou 1: N	Par chave estrangeira-chave primária
Associação simples com cardinalidade N : M	Relação “relacionamento” e dois pares chave estrangeira-chave primária
Relacionamento espacial topológico	Restrição de integridade relativa ao tipo de relacionamento espacial (R6 a R12)
Relacionamento em rede arco-nó	Dois pares chave estrangeira-chave primária entre a relação arco e a relação nó (nó anterior e nó posterior); restrição de integridade espacial adequada (R13)
Relacionamento em rede arco-arco	Dois pares chave estrangeira-chave primária em auto-relacionamento sobre a relação arco; restrição de integridade espacial adequada (R14)
Agregação	Par chave estrangeira-chave primária entre a classe “parte” e a classe “todo”
Agregação espacial	Restrição de integridade relativa a agregação espacial (R15)
Generalização / especialização	Restrições de integridade entre subclasses e superclasse (Elmasri e Navathe, 2004 Cap. 7)
Atributo simples	Atributo simples (coluna)
Atributo composto	Conjunto de atributos simples componentes
Atributo multivalorado	Relação e chave estrangeira
Atributo-chave	Chave primária (ou candidata)
Métodos ou operações	<i>Triggers</i> ou programas associados

Detalhamos a seguir os quatro principais passos do mapeamento de esquemas conceituais OMT-G para esquemas de implementação, nos quais a correspondência expressa na Tabela 3.1 é empregada.

Passo 1: Mapeamento de classes georreferenciadas e convencionais. Para cada classe convencional presente no diagrama, criar uma tabela, sendo que cada atributo alfanumérico da classe é transformado em uma coluna da tabela. Escolher um dos atributos-chave para ser a chave primária da tabela; caso nenhum atributo atenda aos requisitos de não-duplicidade e inexistência de valores nulos, um novo atributo precisa ser criado para essa finalidade.

O mesmo procedimento se aplica a classes georreferenciadas, decidindo-se adicionalmente a alternativa de representação segundo os tipos geométricos disponíveis no banco de dados escolhido. A Tabela 3.2 apresenta uma correspondência entre os tipos geométricos básicos do modelo OMT-G e os propostos pelo Consórcio OpenGIS (1999). Naturalmente, as representações de geo-campos exigem mais do que apenas a codificação geométrica: atributos devem ser incluídos de modo a armazenar o valor do geo-campo associado a cada elemento da representação.

Tabela 3.2 – Tipos Geométricos

<i>Representação OMT-G</i>		<i>Representação OpenGIS (Simple Features Specification)</i>
Geo-objeto	Ponto	Point
Geo-objeto	Linha	LineString
Geo-objeto	Polígono	Polygon
Geo-objeto	Nó de rede	Point
Geo-objeto	Arco unidirecionado	LineString
Geo-objeto	Arco bidirecionado	LineString
Geo-campo	Amostras	Point
Geo-campo	Isolinhas	LineString e/ou Polygon
Geo-campo	Subdivisão planar	Polygon
Geo-campo	Triangulação	Point (vértices) e Polygon (triângulos)
Geo-campo	Tesselação	GeoRaster, campo binário longo

Observe-se que tesselações no OMT-G podem corresponder a dois tipos de representação física sutilmente diferentes: imagens digitais e grades regulares. Assim, caso a representação conceitual seja uma tesselação, pode-se optar entre uma representação matricial própria do SGBD (como a GeoRaster do OracleTM Spatial) ou um campo binário longo, contendo dados binários em um determinado formato de imagem ou grade. Em ambos os casos, é necessário ter recursos para recuperar o valor de uma determinada célula individualmente.

Passo 2: Mapeamento das associações simples. Para cada relacionamento por associação simples entre classes, de cardinalidade 1:1, escolher uma das classes e incluir nela a chave primária da outra, no papel de chave estrangeira. Para associações de cardinalidade 1:N, incluir na tabela correspondente à classe do lado N, como chave estrangeira, a

chave primária da tabela correspondente à classe do lado 1. No caso de associações de cardinalidade N:M, criar uma tabela intermediária, contendo as chaves primárias de ambas as tabelas envolvidas, no papel de chaves estrangeiras de suas respectivas tabelas, e formando, juntas, a chave primária da nova tabela. O tratamento de associações simples independe da existência ou não de representação geométrica na tabela. Tratar desta forma também os relacionamentos de agregação convencionais.

Passo 3: Mapeamento de relacionamentos espaciais. Na maioria dos casos, relacionamentos espaciais explicitados em diagramas de classe OMT-G (incluindo agregações espaciais) não são materializados no esquema físico. Por outro lado, constituem declarações do relacionamento esperado entre instâncias das classes envolvidas, e freqüentemente denotam restrições de integridade espaciais.

Assim, o mapeamento ideal de relacionamentos espaciais não causa alterações diretamente nas tabelas construídas até este passo, mas requer a implementação de controles dinâmicos (*triggers*) ou estáticos (verificações *offline* de consistência).

Passo 4: Mapeamento de generalizações e especializações. Em esquemas OMT-G, tanto a superclasse quanto as subclasses recebem, se forem georreferenciadas, o mesmo tipo de representação geométrica. Assim, o mapeamento de generalizações e especializações é o mesmo para classes convencionais e georreferenciadas, e pode ainda ser estendido para generalizações conceituais. Subclasses especializadas constituem subconjuntos das instâncias das superclasses, contendo eventualmente atributos próprios. Nesses casos é conveniente que as subclasses sejam tabelas distintas por motivos de gerenciamento da informação geográfica e de visualização. Apesar de estarmos considerando o uso de um banco de dados objeto-relacional deve-se ter em mente que a visualização e a facilidade de manipulação das tabelas deve sempre nortear o modelo lógico e físico de um banco de dados geográfico. O mapeamento pode ser feito de acordo com uma das seguintes opções:

Opção 1. Criar uma tabela para a superclasse, contendo todos os seus atributos e sua chave primária. Criar uma tabela para cada subclasse,

usando a mesma chave primária da superclasse, e também estabelecendo-a como chave estrangeira em relação à tabela correspondente à superclasse. Neste caso, a representação geográfica deverá ficar nas subclasses. Esta abordagem é conveniente para subclasses que necessitam sempre serem visualizadas de forma distinta como por exemplo, com simbologia diferente ou tipo de traço diferente. Também é conveniente para que visualização seja automática não precisando depender de nenhum comando específico para que isto aconteça. Quando as subclasses herdam todos os atributos da superclasse e não possuem atributos específicos, ou quando recebem alguma numeração seqüencial essa opção deve ser usada. Um exemplo do uso de numeração seqüencial é o caso dos nós da rede de esgoto, onde cada nó recebe uma numeração de cadastro independente do seu tipo.

Opção 2. Criar uma tabela para cada subclasse, contendo todos os seus atributos e também todos os atributos herdados da superclasse, inclusive a chave primária. Não criar tabela para a superclasse. Essa abordagem é conveniente para subclasses que contenham atributos próprios e visualização distinta.

Opção 3. Criar uma única tabela contendo todos os atributos da superclasse, inclusive a chave primária, e todos os atributos de cada subclasse. Acrescentar dois atributos (discriminador), um para indicar o tipo da subclasse e outro para indicar a qual subclasse pertence cada linha da tabela. Apesar desta opção ser usada em projetos físicos de banco de dados relacionais, ela não é adequada a aplicações geográficas por requerer outros tipos de controle para acesso e visualização correta dos dados.

A alternativa 1 é mais conveniente para especialização/generalização total e disjunta, quando as subclasses possuem alguma identificação única gerenciada pela superclasse. Já a alternativa 2 é mais conveniente para especialização/generalização total e disjunta, onde as subclasses possuem atributos próprios. No caso de sobreposição, a alternativa 1 é mais conveniente, uma vez que os atributos em comum ficam na tabela da superclasse. Normalmente, em casos de sobreposição, existe um conjunto de atributos que são comuns.

3.6.2 Alternativas de estruturação de tabelas

Para efetivar adequadamente um mapeamento entre um esquema lógico e um esquema físico dentro das definições do OpenGIS Consortium, é necessário discutir algumas alternativas de implementação. O *Simple Features Specifications* (SFS) do OGC (1999) se restringe à codificação da forma geométrica dos objetos, incluindo as coordenadas geográficas de seus vértices e a definição do sistema de coordenadas. Não faz parte das especificações do OGC a organização física das tabelas, sendo deixada para o projetista a tarefa de decidir qual é a melhor alternativa para receber os componentes espaciais e alfanuméricos de cada classe de objetos constante do esquema conceitual.

Dependendo do volume relativo de dados e da intensidade do uso, o projetista pode optar por deixar a representação geométrica integrada ou separada dos atributos convencionais. Vamos aqui assumir que a representação geométrica possa ser armazenada em uma coluna de uma tabela, através de um mecanismo objeto-relacional, uma extensão especial, ou mesmo um campo binário longo. Com isso, configuram-se três alternativas:

1. Armazenamento de todas as representações geométricas de todos os objetos de todas as classes em uma única tabela, relacionando esta tabela por meio de uma chave estrangeira com diversas outras tabelas, cada qual contendo os atributos alfanuméricos de uma classe específica (Figura 3.14).
2. Armazenamento da representação geométrica em uma coluna de uma tabela, relacionada com outra tabela contendo os atributos alfanuméricos da classe de objetos através de uma chave estrangeira (Figura 3.15);
3. Armazenamento da representação geométrica e dos atributos alfanuméricos de uma classe de objetos como colunas da mesma tabela (Figura 3.16);

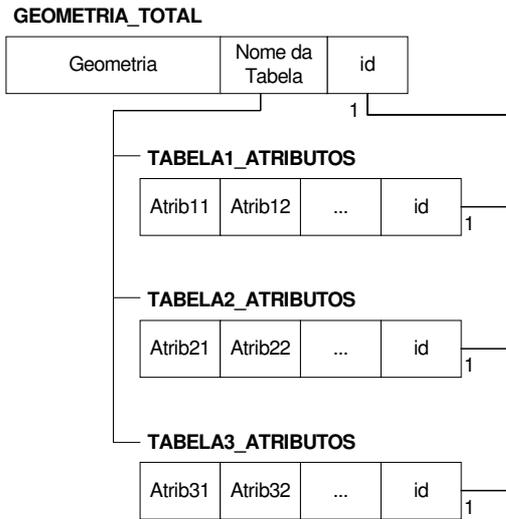


Figura 3.14 – Alternativa 1: geometrias concentradas em uma única tabela (Fonte: (Davis Jr. e Oliveira, 2002)).

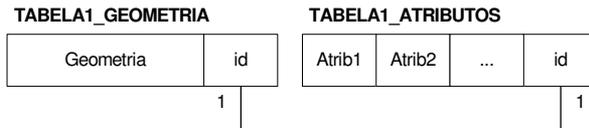


Figura 3.15 – Alternativa 2: um par de tabelas para cada classe georreferenciada (Fonte: (Davis Jr. e Oliveira, 2002)).

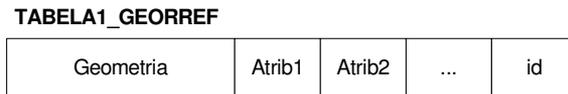


Figura 3.16 – Alternativa 3: geometria e atributos na mesma tabela (Fonte: (Davis Jr. e Oliveira, 2002)).

A alternativa 1 tende a introduzir um desequilíbrio no SGBD, fazendo com que todas as consultas e operações envolvendo dados geométricos passem pela única tabela que os armazena. Em um banco de dados dotado de um volume razoavelmente grande de dados geográficos, essa tabela pode rapidamente se tornar um gargalo para todo o sistema.

Por outro lado, pode-se imaginar que a indexação espacial e as operações topológicas entre classes de objetos sejam eventualmente beneficiadas pela integração das representações geométricas em uma única tabela. É também possível imaginar vantagens quanto ao acesso às tabelas de atributos alfanuméricos, que se tornam menos volumosas pela separação das representações geométricas. Esse esquema foi adotado por alguns SIG no passado, com relativo sucesso.

A alternativa 2 destaca-se por sua flexibilidade, apesar de exigir a navegação entre tabelas ou a realização de operações de junção para que se possa resgatar a estrutura completa de cada objeto geográfico. A separação dos atributos alfanuméricos em uma tabela independente facilita a integração com aplicações convencionais. A implementação da restrição de integridade referencial entre as duas tabelas é, no entanto, indispensável – o que pode se constituir em um problema para a implementação de aplicações exclusivamente alfanuméricas e que pretendam operar sobre esses dados.

A terceira alternativa é a que mais se assemelha à concepção de objetos geográficos adotada pelo modelo OMT-G. Cada tupla de cada tabela passa a corresponder, aproximadamente, a uma instância de um objeto, sendo que a tabela contém todas as instâncias de uma determinada classe. Com isso, não são necessárias junções para acessar dados geométricos e atributos, o que pode beneficiar aplicações de análise espacial ou mapeamento temático, em particular aquelas que não exigem muitos dados alfanuméricos. Esta alternativa corresponde ao mapeamento mais simples de se executar e à opção mais conservadora quanto ao desempenho, considerando uma igual incidência de operações alfanuméricas e espaciais.

Observe-se que esquemas baseados na primeira alternativa podem ser facilmente mapeados para a segunda, dividindo a grande tabela de dados geométricos em várias (o que pode ser feito usando o mecanismo de visões). Também podem ser mapeados para a terceira, pela realização de uma junção após a separação da tabela geométrica em várias, o que também pode ser feito usando visões. O mesmo raciocínio pode ser empregado para implementar um mapeamento entre a alternativa 2 e a alternativa 3, ou vice-versa.

Uma alternativa adicional consiste na implementação de uma terceira tabela para viabilizar um relacionamento $n:m$ entre representações geométricas e atributos alfanuméricos, dando ao usuário a possibilidade de combinar esses aspectos de acordo com a sua necessidade (Figura 3.17). Essa terceira tabela deve manter duas chaves estrangeiras, uma chave da tabela de representações geométricas com outra da tabela que contém os atributos, que juntas compõem sua chave primária. Com isso é possível, por exemplo, manter simultaneamente uma representação cartográfica e uma representação esquemática de uma rede de distribuição de energia. A situação oposta (várias tuplas de atributos relacionadas a uma única representação geométrica) também é útil. Existem diversas aplicações que armazenam séries temporais de dados, por exemplo na área de meteorologia: cada tupla alfanumérica conteria dados meteorológicos obtidos em uma localidade em um determinado dia e horário, a tupla geométrica traria a localização da estação meteorológica, e a chave composta seria formada pelo identificador da estação meteorológica e pela data e hora da medição.

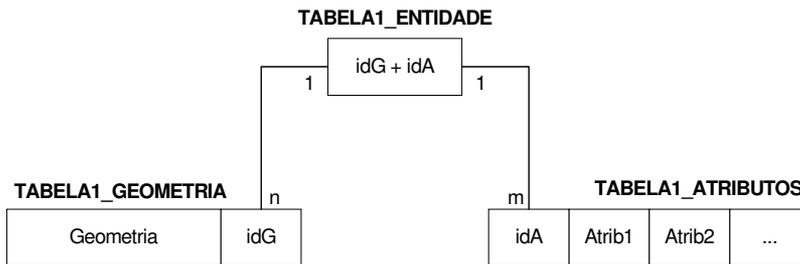


Figura 3.17 – Alternativa 4: múltiplas representações e/ou múltiplos conjuntos de atributos.

No entanto, a opção de manter mais de uma geometria em uma mesma tabela pode ser implementada usando os bancos de dados espaciais atuais. Nesse caso, seria utilizada em tabelas que contenham sempre um ou mais tipos de representação, como por exemplo a frente principal de um lote e o contorno do lote. É importante que, em tabelas desse tipo, as instâncias disponham sempre das representações

consideradas no esquema conceitual, viabilizando a implementação das restrições de integridade espaciais.

3.7 Discussão de um exemplo

Para exemplificar o uso das principais primitivas do modelo OMT-G, apresentamos nesta Seção um exemplo de modelagem, apresentado originalmente em (Davis Jr., 2000). A aplicação proposta combina aspectos de interesse em três diferentes contextos:

- cadastro técnico municipal (CTM), em que os usuários estão interessados na estruturação da ocupação do solo urbano em quadras, lotes e vias públicas;
- gerenciamento de transportes e trânsito, em que o interesse está na estruturação do sistema viário;
- mapeamento em escala regional, em que os usuários se interessam apenas pelos principais aspectos de ocupação do território e acessos, em especial a malha rodoviária.

Alguns objetos do ambiente urbano são necessários nos três contextos, como por exemplo o sistema viário. No entanto, cada um deles percebe esses objetos de uma maneira diferente, gerando a necessidade de mais de uma representação.

Para os usuários da área de cadastro técnico municipal, os principais objetos são as quadras e lotes da cidade. Particularmente no caso dos lotes, adotamos três diferentes alternativas para representação. A primeira e mais simples delas é utilizando pontos. No caso de Belo Horizonte, esta forma de representação foi adotada no início da construção do banco de dados geográfico para o cadastro, a partir de uma metodologia que envolvia uma rápida referência visual à planta cadastral convencional, transformada em imagem e colocada no *background* (Davis Jr., 1993). Essa representação é suficiente para que se possa localizar cada lote, porém não permite que se verifique topologicamente as relações de vizinhança e de inclusão em uma quadra. A segunda alternativa de representação consiste em traçar apenas a testada do lote, usando uma poligonal. Esta alternativa é quase tão simples quanto a primeira quanto ao esforço de conversão de dados, porém permite que se realize alguns

tipos adicionais de análise, como a de vizinhança, e fornece um dado geométrico, que é a largura do lote no segmento frontal. Por fim, a terceira alternativa de representação usa polígonos que definem todas as fronteiras entre o lote e seus vizinhos. É a representação ideal, pois permite verificar todas as confrontações e ainda fornecer parâmetros geométricos básicos, como a área do lote. No entanto, é a mais custosa em termos de conversão de dados. A convivência das três formas de representação de lotes em um mesmo banco de dados se justifica do ponto de vista da formação incremental dos componentes do cadastro urbano. O relacionamento dos lotes e quadras com o sistema de endereçamento da cidade, através da malha viária, é também desejável, para que seja possível simplificar a tarefa de localizá-los em campo e também para facilitar a comunicação com os proprietários e outros cidadãos.

Para que se possa trabalhar com transportes e trânsito, é fundamental poder contar com todas as informações relevantes quanto à malha viária, incluindo a localização de cada logradouro e cada cruzamento entre logradouros. Na presente aplicação, a malha viária básica está representada por uma rede, em que arcos bidirecionais representam os segmentos de logradouro entre cruzamentos, que por sua vez constituem os nós. Observe-se que, por simplicidade, optou-se por não modelar a malha de circulação viária, composta por arcos unidirecionais e que atendem a todas as restrições da legislação de trânsito quanto ao sentido de fluxo. Cada trecho de logradouro recebe uma classificação de acordo com o *Plano de Classificação Viária*, um componente do Plano Diretor do município que define vias de ligação regional, arteriais, coletoras e locais. Essa classificação depende basicamente do volume de tráfego e da função primária de cada trecho de logradouro. Observe-se que a classificação é um atributo do trecho e não do logradouro inteiro, pois existem situações em que parte do logradouro recebe tráfego intenso e parte tem características de via local. Considerando apenas as vias mais importantes para a circulação, concebe-se uma nova rede, esta adequada para o planejamento da circulação de veículos entre regiões da cidade.

Por fim, os responsáveis pelo mapeamento regional estão interessados em obter os limites da área urbanizada da cidade, usualmente denominados “mancha urbana”, além das ligações da cidade a outras por

meio de rodovias e outros meios de transporte de cargas. As ferrovias foram deixadas de fora do problema por simplicidade, mas as rodovias que atravessam a cidade fazem parte da malha viária concebida para a aplicação de transportes e trânsito. Além disso, considerando as escalas em que se pretende construir o mapeamento regional, é interessante poder contar com (1) uma representação simplificada do polígono que compõe os limites entre a cidade e suas vizinhas, e (2) uma representação da cidade como ponto, para a geração de mapas temáticos sobre transportes rodoviários.

Considerando as necessidades descritas, foi construído o diagrama de classes para a aplicação (Figura 3.18). No diagrama, a primitiva de generalização conceitual do modelo OMT-G foi usada duas vezes, uma para a classe *Município*, que pode ter representações pontuais ou poligonais, em subdivisão planar (esta em dois diferentes níveis de detalhamento), e outra para a classe *Lote CTM*, que podem ser representados usando pontos, linhas ou polígonos. Existe também uma primitiva de agregação, que indica que as instâncias da classe *Quadra CTM* serão criadas pela agregação de instâncias de *Lote CTM*.

A classe *Rodovia* está relacionada à classe de vias principais, assumindo a regra de que todos os trechos de rodovia são classificados como vias de ligação regional. A classe *Via principal*, por sua vez, é um subconjunto da classe *Trecho*, pois nem todo trecho de logradouro pertence à malha viária principal. Com isso, nem todos os nós de cruzamento constituem interseções na malha viária principal. O diagrama de classes indica, assim, que existe uma superposição parcial entre a malha de logradouros e a malha viária principal, mas não determina a forma de estruturação do banco de dados geográfico quanto a esse aspecto.

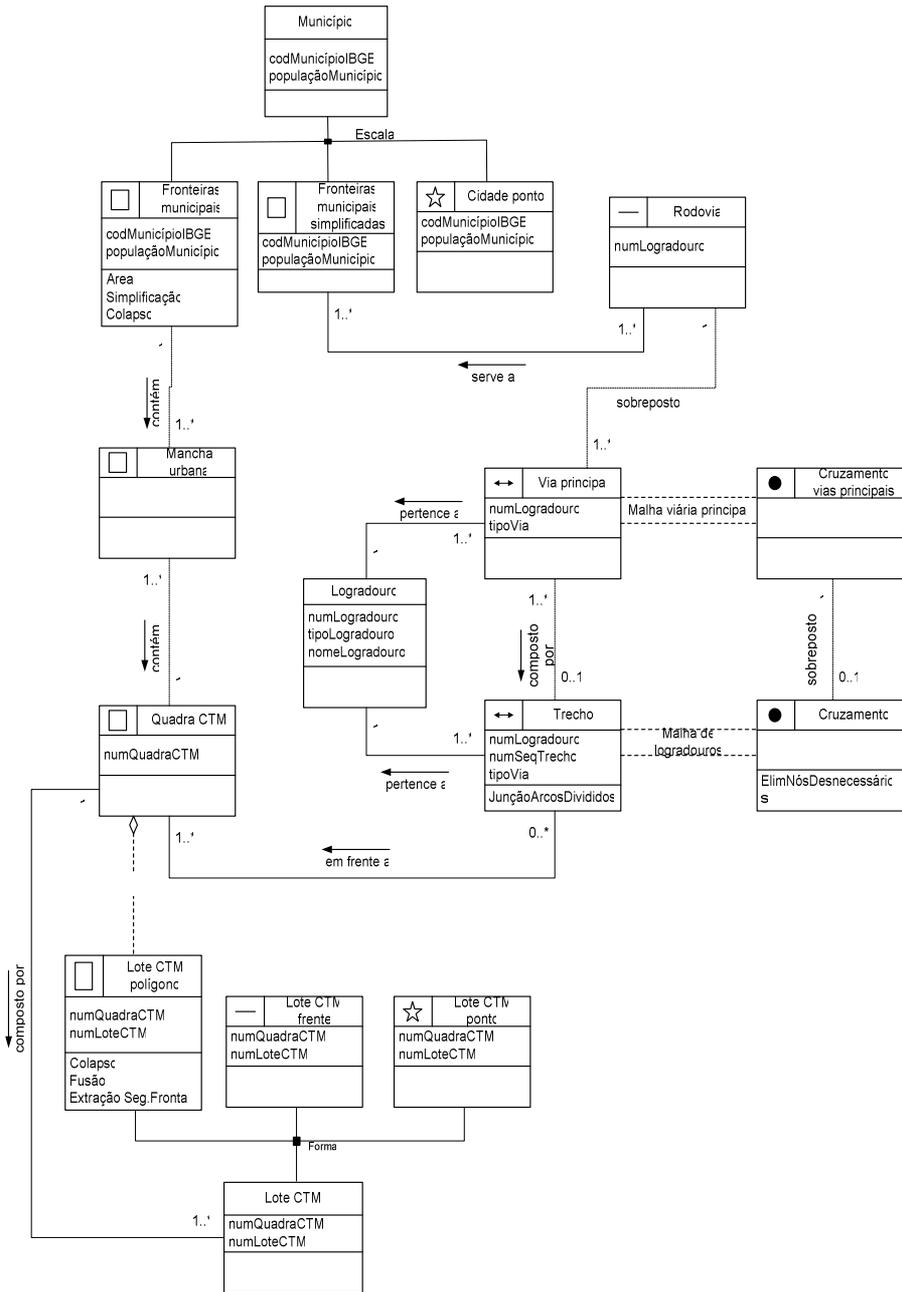


Figura 3.18 – Diagrama de classes.

O diagrama de transformação correspondente ao diagrama de classes da Figura 3.18 pode ser criado em blocos, cada qual correspondendo a um grupo de transformações demandado pela aplicação.

O primeiro desses blocos diz respeito à agregação de *Lote CTM* para formar *Quadra CTM*, e à relação contém entre *Quadra CTM* e *Mancha Urbana* (Figura 3.19). No caso da agregação, optou-se por usar o operador de generalização cartográfica denominado *Fusão*, com tolerância de espaçamento igual a zero. Isso faz com que o seu comportamento seja idêntico ao de um operador de união de polígonos, conforme definido na área de geometria computacional. A opção pela implementação do operador *Fusão* pode ser feita considerando que seu uso já é necessário na aplicação, para a transformação que leva à criação da mancha urbana, desta vez considerando uma tolerância de 15 metros. Esse valor de tolerância faz com que desapareçam da mancha urbana todas as ruas cuja largura seja inferior a 30 metros, caso da maioria das vias locais e mesmo algumas avenidas de menor porte. Apenas logradouros mais largos permanecerão visíveis após a aplicação do operador. A Figura 3.20 apresenta um exemplo de aplicação desse operador a um grupo de quadras.

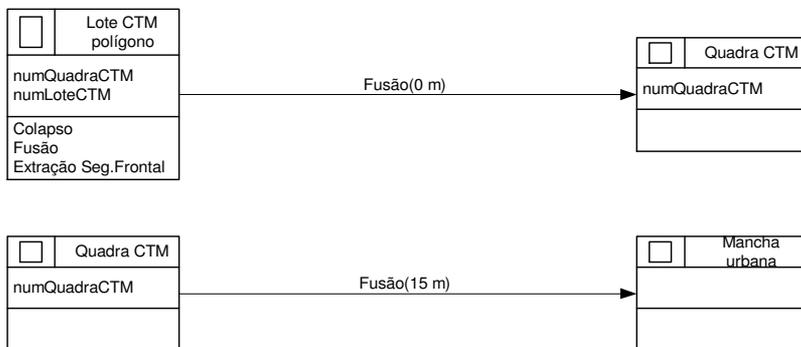


Figura 3.19 – Diagrama de transformação – 1º. bloco.

O segundo bloco de transformações dinâmicas refere-se à criação da malha viária principal a partir da malha de logradouros (Figura 3.21). Como a malha de logradouros é mais detalhada e precisa ser mantida

atualizada para benefício das aplicações de transportes e cadastro, seus arcos e nós são considerados representações primárias, a partir das quais as representações secundárias correspondentes à malha viária principal são criadas. O processo consiste em, inicialmente, selecionar as instâncias de *Trecho* classificadas como vias de ligação regional ou arteriais, ou seja, componentes do sistema viário principal, e em duplicar toda a classe *Cruzamento*. Em seguida, os nós que são desnecessários para a malha viária principal são eliminados, gerando a classe *Cruzamento vias principais*, e juntando os segmentos de arcos onde os nós foram eliminados, produzindo a classe *Via principal*. A eliminação é feita sempre que um nó for encontrado com exatamente zero ou dois arcos conectados: no primeiro caso, o nó não cumpre função alguma na rede, e no segundo ele não configura mais um cruzamento entre vias.

O terceiro bloco de transformações corresponde à generalização conceitual sobre as classes *Município* e *Lote CTM* (Figura 3.22). No primeiro caso, admite-se que a classe *Fronteiras municipais* seja a mais genérica e a mais detalhada, e portanto a partir dela pode-se produzir a classe *Fronteiras municipais simplificadas*, usando um operador de simplificação de polígonos com tolerância de 10 metros, e a classe *Município ponto*, usando o operador *colapso*. A tolerância foi escolhida a partir da definição da escala de trabalho para o mapeamento regional pretendido, no caso equivalente a 1:50.000. A tolerância corresponde a metade da largura de uma linha traçada com pena 0,4mm. Esse valor foi escolhido considerando a dedução do tamanho do menor objeto visível (*smallest visible object*, ou SVO) (Li e Openshaw, 1992). Naturalmente, o tamanho do SVO é expresso nas unidades de medida da tela ou do mapa, e portanto pode ser traduzido em medidas reais através da aplicação do fator de escala.

Como no caso da classe *Fronteiras municipais*, a classe *Lote CTM* polígono foi escolhida como representação primária. A partir dela pode-se gerar a classe *Lote CTM ponto*, usando o operador *Colapso*, e a classe *Lote CTM frente*, usando um operador especial que determina qual é o segmento frontal de cada lote poligonal – no caso, segmentos frontais são aqueles que não são compartilhados pelos lotes adjacentes. Observe-se que as representações produzidas pelo operador *colapso* não precisam ser materializadas, uma vez que seu processamento é bastante rápido.

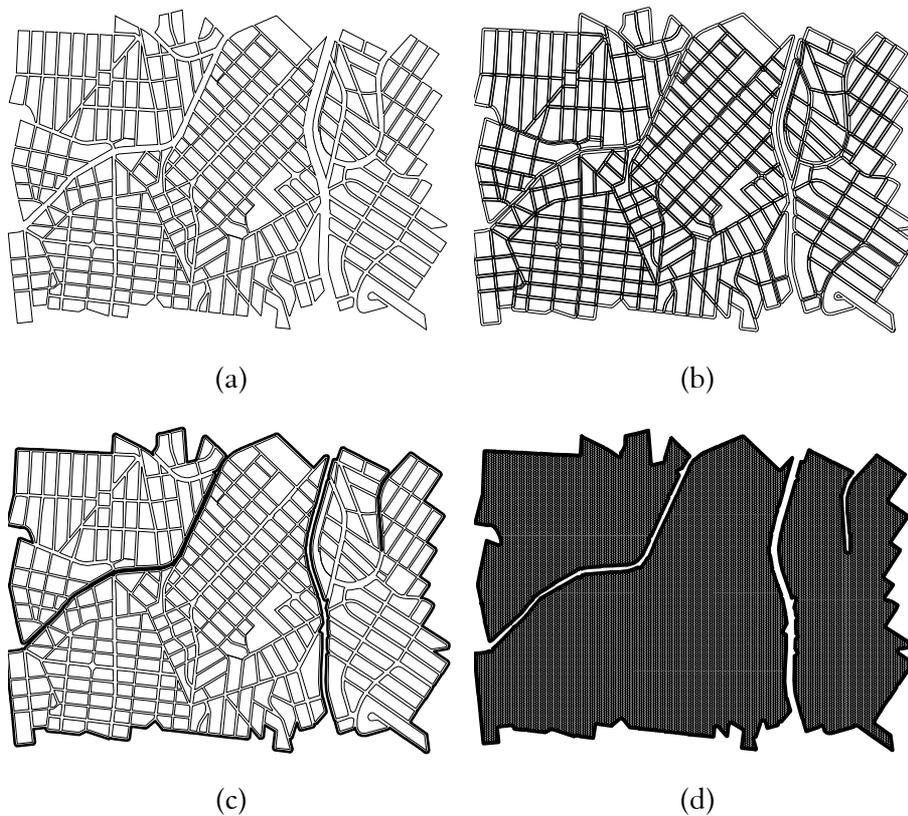


Figura 3.20 – Fusão.

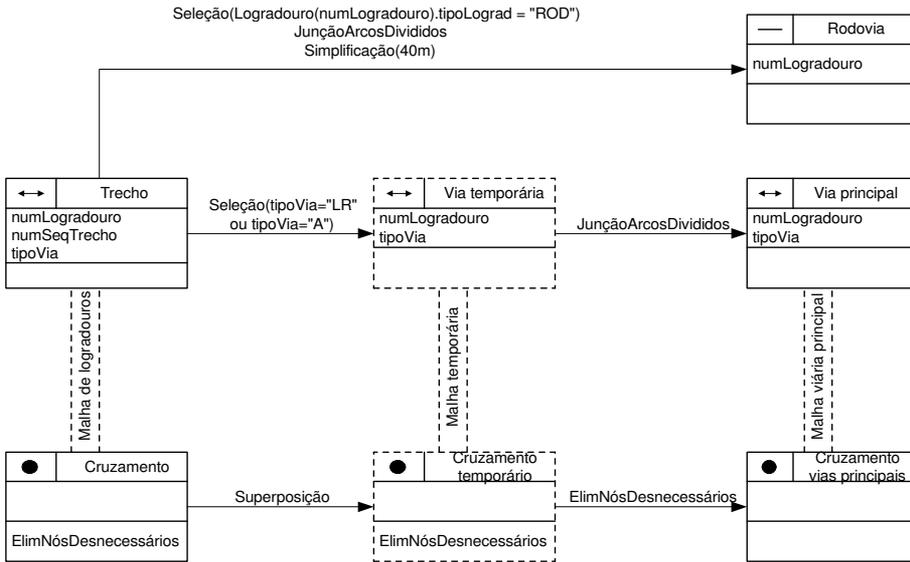


Figura 3.21 – Diagrama de transformação – 2º. bloco.

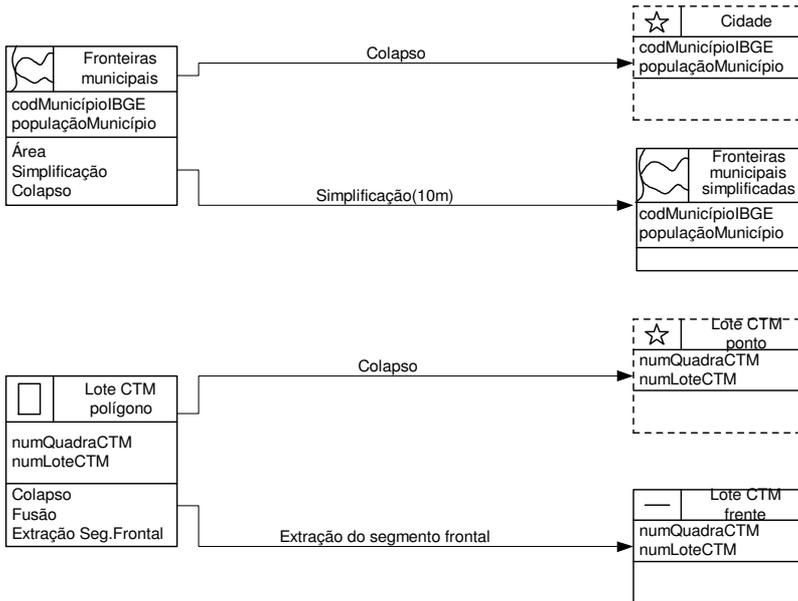


Figura 3.22 – Diagrama de transformação – 3º. bloco.

Cada uma das classes que compõem os diagramas de classes e de transformação precisam ter pelo menos uma apresentação definida no diagrama de apresentação. Além dessa apresentação *default*, cada classe pode ter um número indeterminado de apresentações alternativas, de acordo com as necessidades da aplicação. É possível ter, por exemplo, uma apresentação voltada para visualização em tela e outra voltada para a saída plotada em um mapa.

As classes *Fronteiras municipais* e *Cidade ponto* são associadas a duas apresentações cada, uma para visualização em tela e outra para usos específicos (Figura 3.23). As apresentações em tela estabelecem um limiar de escala, de modo que em escalas até 1:25.000 as fronteiras entre municípios serão visualizadas, entre 1:25.000 e 1:50.000 serão apresentadas as fronteiras simplificadas, e em escalas menores, a partir de 1:50.000, serão apresentados os símbolos.

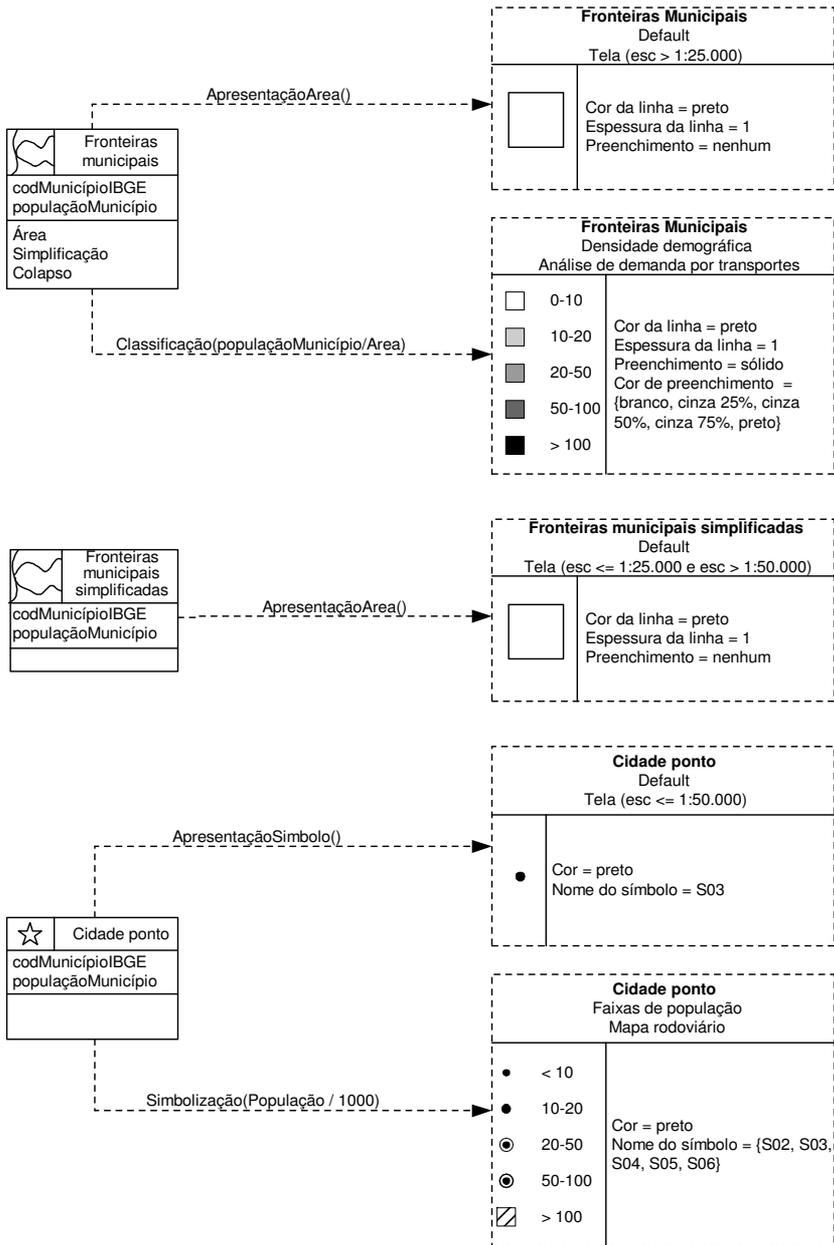


Figura 3.23 – Diagrama de apresentação- 1º. bloco.

Para a classe Rodovia, foi definida apenas uma apresentação, em que estradas de terra são distinguidas visualmente de estradas asfaltadas. Também a classe Mancha urbana conta com apenas uma apresentação, que procura distinguir levemente a área urbanizada da área rural (Figura 3.24).

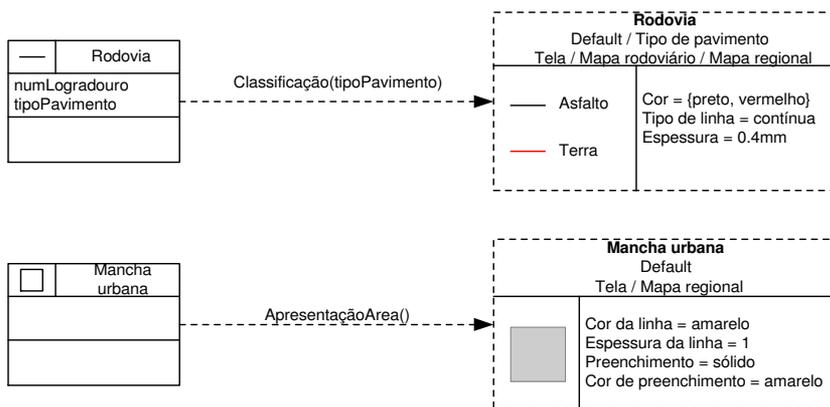


Figura 3.24 – Diagrama de apresentação – 2º. bloco.

Em seguida, as classes que compõem a malha de vias principais têm sua apresentação definida. A classe *Via principal* conta com duas apresentações, sendo que na primeira as vias de ligação regional e arteriais, mais importantes na hierarquia de classificação viária, são diferenciadas usando a espessura da linha, e na segunda apenas as vias de ligação regional são destacadas. A apresentação correspondente à classe *Cruzamento vias principais* usa um símbolo muito pequeno, o que faz com que suas instâncias efetivamente desapareçam na tela. O usuário poderá perceber os cruzamentos de vias visualmente, sem a necessidade de um símbolo mais evidente, o que traria apenas poluição visual (Figura 3.25).

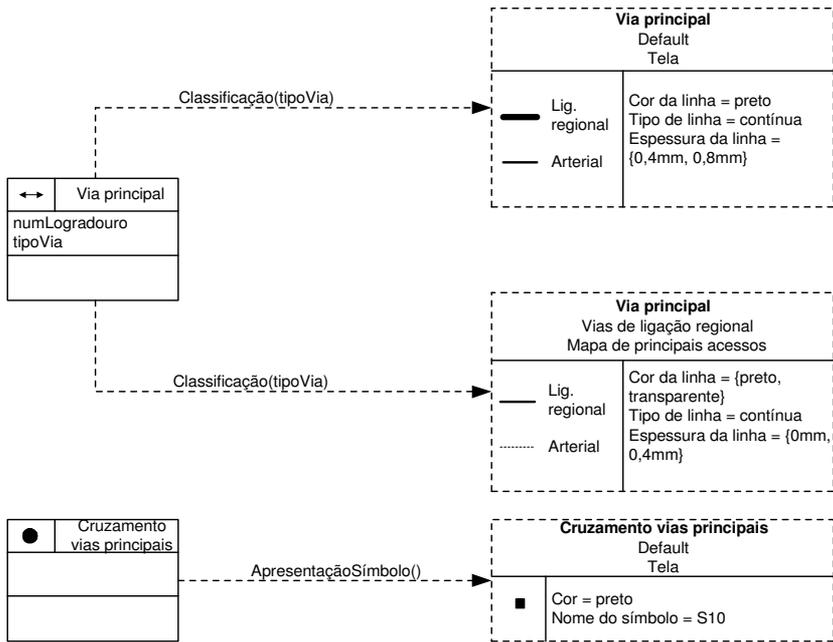


Figura 3.25 – Diagrama de apresentação -3º. bloco.

Para a classe *Trecho* são definidas duas variações de apresentação. A primeira define uma classificação com base na hierarquização do sistema viário. A classe *Cruzamento*, que com *Trecho* compõe a malha de logradouros, é apresentada usando um símbolo circular simples, porém visível. Em ambos os casos, a visualização só é permitida em escalas superiores a 1:5000, pois fora dessa faixa a densidade de elementos na tela seria excessivamente alta (Figura 3.26).

Por fim, todas as demais classes anteriormente definidas recebem uma apresentação correspondente. Pelo menos uma apresentação tem que estar definida para cada classe, e na Figura 3.27 isso foi feito para as classes *Quadra CTM*, *Lote CTM polígono*, *Lote CTM frente* e *Lote CTM ponto*. Observe-se a definição da simbologia para a classe *Lote CTM frente*, em que é utilizado um recurso comum em SIG e cartografia: o lançamento de símbolos ao longo de linhas. No caso, foi inserido um símbolo no início da linha, para estabelecer um marco visual que a separe da frente do lote vizinho. O intervalo entre símbolos foi

especificado usando um valor intencionalmente muito alto, para garantir que o símbolo não venha a ser usado mais de uma vez na frente do mesmo lote. É importante destacar que a especificação dos parâmetros de cada apresentação pode ser baseada nos recursos conhecidos do SIG onde a aplicação será implementada.

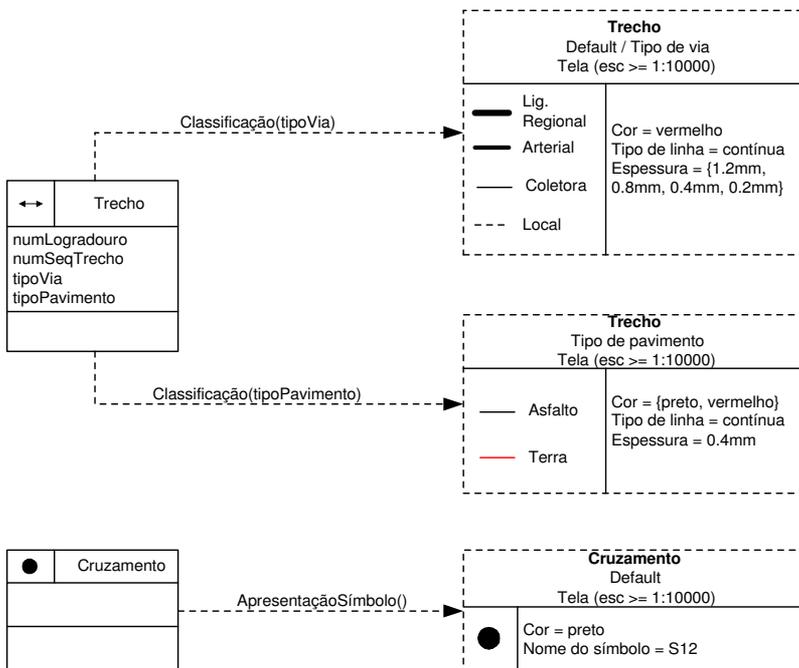


Figura 3.26 – Diagrama de apresentação – 4º bloco.

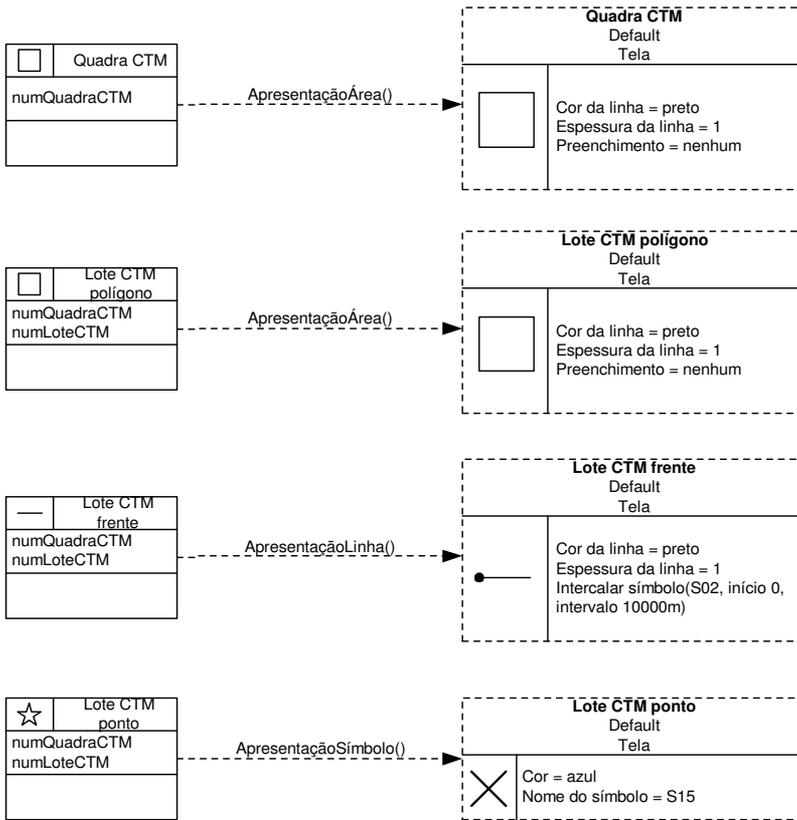


Figura 3.27 – Diagrama de apresentação – 5º. bloco.

3.8 Leituras suplementares

Neste capítulo, apresentamos o OMT-G, um modelo de dados orientado a objetos para modelagem de aplicações geográficas, e técnicas para transformar esquemas OMT-G em esquemas de implementação, supondo um SGBD objeto-relacional compatível com o padrão OGC. O modelo OMT-G oferece primitivas para modelar a geometria e topologia dos dados geográficos. Devido ao uso de pictogramas representando a geometria dos objetos, o esquema resultante é mais compacto, intuitivo e de fácil compreensão. Além do mais a combinação de diagramas de classes, transformação, apresentação faz com que a distância entre a modelagem conceitual e a implementação de aplicações geográficas seja

reduzida, permitindo uma definição mais precisa dos objetos requisitados, suas operações, seus parâmetros de visualização.

Aos leitores interessados em um maior aprofundamento neste tema, recomendamos uma revisão das referências mais citadas ao longo do capítulo. Para obter uma visão mais detalhada de operações de transformação, veja (Davis Jr., 2000) (Davis Jr. e Laender, 1999). Exemplos adicionais de modelagem usando OMT-G podem ser encontrados em numerosos trabalhos, dentre os quais (Bertini e César Neto, 2004) (Davis Jr. et al., 2003) (Martins Netto, 2003) (Preto, 1999) (Souza et al., 2004) (Voll, 2002). Comparações entre modelos de dados para aplicações geográficas podem ser encontrados em (Borges, 1997) (Borges et al., 2001) (Lisboa Filho, 1997). Lembramos ainda aos leitores que o modelo OMT-G foi inicialmente chamado de GeoOMT (Borges, 1997), e que existem algumas publicações que se referem a ele por este nome.

O uso de ontologias no projeto e construção de sistemas de informação geográficos, algo que não foi abordado neste capítulo, mas que parece estar um passo adiante das atuais técnicas de modelagem conceitual, é apresentado e discutido em (Fonseca, 2001) (Fonseca et al., 2000) (Fonseca et al., 2002). Uma discussão a respeito da conexão que existe entre modelagem conceitual e ontologias pode ser encontrada em (Fonseca et al., 2002).

Referências

- ABITEBOUL, S.; HULL, R. IFO: a formal semantic database model. **ACM Transactions on Database Systems**, v. 12, n.4, p. 525-565, 1987.
- ABRANTES, G.; CARAPUÇA, R. Explicit representation of data that depend on topological relationships and control over data consistency. In: Fifth European Conference and Exhibition on Geographical Information Systems - EGIS/MARI'94. 1994. p.
- BÉDARD, Y.; CARON, C.; MAAMAR, Z.; MOULIN, B.; VALLIÈRE, D. Adapting data models for the design of spatio-temporal databases. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 20, n.1, p. 19-41, 1996.
- BERTINI, G. C.; CÉZAR NETO, J. Uma modelagem orientada a objeto para o Mapa Urbano Básico de Belo Horizonte. **Informática Pública**, v. 6, n.1, p. 33-51, 2004.
- BORGES, K. A. V. **Modelagem de dados geográficos - uma extensão do modelo OMT para aplicações geográficas**. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 1997. Dissertação de mestrado, Escola de Governo, 1997.
- BORGES, K. A. V.; DAVIS JR., C. A.; LAENDER, A. H. F. OMT-G: an object-oriented data model for geographic applications. **GeoInformatica**, v. 5, n.3, p. 221-260, 2001.
- BORGES, K. A. V.; DAVIS JR., C. A.; LAENDER, A. H. F., 2002. Integrity constraints in spatial databases. In: DOORN, J. H.; RIVERO, L. C., eds., **Database Integrity: Challenges and Solutions**: Hershey (PA), Idea Group Publishing, p. 144-171.
- BORGES, K. A. V.; LAENDER, A. H. F.; DAVIS JR., C. A. Spatial data integrity constraints in object oriented geographic data modeling. In: 7th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS'99). Kansas City, 1999. p. 1-6.
- CÂMARA, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. São José dos Campos: INPE, 1995. Tese de doutorado, 1995.
- CHEN, P. The entity-relationship model - toward a unified view of data. **ACM Transactions on Database Systems**, v. 1, n.1, p. 9-36, 1976.
- CLEMENTINI, E.; DIFELICE, P.; VAN OOSTEROM, P. A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction. In: 3rd Symposium on Spatial Database Systems. 1993. p. 277-295.

- COCKROFT, S. A taxonomy of spatial data integrity constraints. **GeoInformatica**, v. 1, n.4, p. 327-343, 1997.
- DAVIS JR., C. A. Address base creation using raster-vector integration. In: URISA Annual Conference. Atlanta (GA), 1993. p. 45-54.
- DAVIS JR., C. A. **Múltiplas representações em sistemas de informação geográficos**. Belo Horizonte (MG): UFMG, 2000. Departamento de Ciência da Computação, 2000.
- DAVIS JR., C. A.; BORGES, K. A. V.; LAENDER, A. H. F. Restrições de integridade em bancos de dados geográficos. In: III Workshop Brasileiro de GeoInformática (GeoInfo 2001). Rio de Janeiro (RJ), 2001. p. 63-70.
- DAVIS JR., C. A.; BORGES, K. A. V.; LAENDER, A. H. F., 2005. Deriving spatial integrity constraints from geographic application schemas. In: RIVERO, L. C.; DOORN, J. H.; FERRAGINE, V. E., eds., **Encyclopedia of Database Technologies and Applications**: Hershey (PA), Idea Group Publishing.
- DAVIS JR., C. A.; FONSECA, F.; BORGES, K. A. V. A flexible addressing system for approximate urban geocoding. In: V Simpósio Brasileiro de GeoInformática (GeoInfo 2003). Campos do Jordão (SP), 2003. p. em CD-ROM.
- DAVIS JR., C. A.; LAENDER, A. H. F. Multiple representations in GIS: materialization through geometric, map generalization, and spatial analysis operations. In: 7th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS'99). Kansas City, 1999. p. 60-65.
- DAVIS JR., C. A.; OLIVEIRA, P. A. SIG interoperável e distribuído para administrações municipais de grande porte. **Informática Pública**, v. 4, n.1, p. 121-141, 2002.
- EGENHOFER, M. A Model for Detailed Binary Topological Relationships. **Geomatica**, v. 47, n.3 & 4, p. 261-273, 1993.
- EGENHOFER, M. J.; FRANZOSA, R. D. Point-set topological spatial relations. **International Journal of Geographic Information Systems**, v. 5, n.2, p. 161-174, 1991.
- EGENHOFER, M. J.; HERRING, J. A mathematical framework for the definition of topological relationships. In: 4th International Symposium on Spatial Data Handling. 1990. p. 803-813.
- ELMASRI, R.; NAVATHE, S. **Fundamentals of Database Systems**. Pearson Education, 2004.

- FONSECA, F. **Ontology-Driven Geographic Information Systems**.Orono: University of Maine, 2001.Ph.D. Thesis, Dept of Spatial Information Science and Engineering, 2001.
- FONSECA, F.; EGENHOFER, M.; DAVIS, C.; BORGES, K. Ontologies and Knowledge Sharing in Urban GIS. **Computer, Environment and Urban Systems**, v. 24, n.3, p. 232-251, 2000.
- FONSECA, F.; EGENHOFER, M.; DAVIS, C.; CÂMARA, G. Semantic Granularity in Ontology-Driven Geographic Information Systems. **AMAI Annals of Mathematics and Artificial Intelligence - Special Issue on Spatial and Temporal Granularity**, v. 36, n.1-2, p. 121-151, 2002.
- FRANK, A. U. Spatial concepts, geometric data models, and geometric data structures. **Computers & Geosciences**, v. 18, n.4, p. 409-417, 1992.
- FRANK, A. U.; GOODCHILD, M. F., 1990, Two perspectives on geographical data modeling, Santa Barbara (CA), National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA).
- GOYAL, R. K. **Similarity assessment for cardinal directions between extended spatial objects**. Orono, Maine: University of Maine, 2000.PhD Thesis, 2000.
- KÖSTERS, G.; PAGEL, B.; SIX, H. GIS application development with GeoOOA. **International Journal of Geographic Information Science**, v. 11, n.4, p. 307-335, 1997.
- LAENDER, A. H. F.; FLYNN, D. J., 1994. A semantic comparison of modelling capabilities of the ER and NIAM models. In: ELMASRI, R.; KOURAMAJIAN, V.; THALHEIM, B., eds., **Entity-Relationship Approach - ER'93**, Springer-Verlag, p. 242-256.
- LI, Z.; OPENSHAW, S. Algorithms for automated line generalization based on a natural principle of objective generalization. **International Journal of Geographic Information Systems**, v. 6, n.5, p. 373-389, 1992.
- LISBOA FILHO, J., 1997, Modelos de dados conceituais para sistemas de informação geográfica, Porto Alegre, UFRGS.
- MARK, D. M.; FRANK, A. U., 1990, Language issues for geographical information systems, National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA).
- MARTINS NETTO, V. **Proposta de esquema conceitual para um banco de dados de limpeza urbana no município de Belo Horizonte**.Belo Horizonte: PRODABEL, 2003.Monografia de especialização, Curso de Especialização em Informática Pública, 2003.

- OLIVEIRA, J. L.; PIRES, F.; MEDEIROS, C. M. B. An environment for modeling and design of geographic applications. **GeoInformatica**, v. 1, n.1, p. 29-58, 1997.
- OPEN GIS CONSORTIUM, 1999, OpenGIS Simple Features Specification for SQL - Revision 1.1.
- PARENT, C.; SPACCAPIETRA, S.; ZIMANYI, E. Spatio-temporal conceptual models: data structures + space + time. In: 7th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS'99). Kansas City, 1999. p. 26-33.
- PEUQUET, D. J. A conceptual framework and comparison of spatial data models. **Cartographica**, v. 21, p. 66-113, 1984.
- PREPARATA, F. P.; SHAMOS, M. I. **Computational geometry: an introduction**. New York: Springer-Verlag, 1985.
- PRETO, A. G. **MetaSIG: ambiente de metadados para aplicações de sistemas de informações geográficos**. Rio de Janeiro (RJ): Instituto Militar de Engenharia, 1999. Dissertação de mestrado, 1999.
- RATIONAL SOFTWARE CORPORATION, 1997, The Unified Modeling Language: notation guide, version 1.1.
- RUMBAUGH, J.; BLAHA, M.; PREMERLANI, W.; EDDY, F.; LORENSEN, W. **Object-oriented Modeling and Design**. Prentice-Hall, 1991.
- SHEKHAR, S.; COYLE, M.; GOYAL, B.; LIU, D.; SARKAR, S. Data models in geographic information systems. **Communications of the ACM**, v. 40, n.4, p. 103-111, 1997.
- SOUZA, L. A.; DELBONI, T.; BORGES, K. A. V.; DAVIS JR., C. A.; LAENDER, A. H. F. Locus: um localizador espacial urbano. In: VI Simpósio Brasileiro de GeoInformática (GeoInfo 2004). Sociedade Brasileira de Computação (SBC), Campos do Jordão (SP), 2004. p. 467-478.
- VOLL, V. L. **Utilização de SIG na análise de aspectos sociais do garimpo de diamantes em Coromandel, MG**. Belo Horizonte: UFMG, 2002. Monografia de especialização, Curso de Especialização em Geoprocessamento, 2002.
- WORBOYS, M. F.; HEARNshaw, H. M.; MAGUIRE, D. J. Object-oriented data modelling for spatial databases. **International Journal of Geographic Information Systems**, v. 4, n.4, p. 369-383, 1990.