

Restrições de Integridade em Bancos de Dados Geográficos

CLODOVEU AUGUSTO DAVIS JR.¹

KARLA ALBUQUERQUE DE VASCONCELOS BORGES^{1,2}

ALBERTO HENRIQUE FRADE LAENDER²

¹PRODABEL- Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte,

Av. Presidente Carlos Luz, 1275, 31230-000, Belo Horizonte, MG, Brasil

{clodoveu, karla}@pbh.gov.br

²Departamento de Ciência da Computação da UFMG,

Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, 31270-000, Belo Horizonte, MG, Brasil

{kavb, laender}@dcc.ufmg.br

Abstract. An important activity in the design of database applications is the identification of the integrity constraints that must hold on the database, and that are used to detect and evaluate inconsistencies. These constraints are usually identified and recorded at the database design level, and enforced by the database management system itself, during updates and data entry procedures. However, while modeling geographic applications it is possible to perceive that domain and structural constraints, available on most database management systems, are not enough to ensure the integrity of spatial data. Within a geographic context, topological relations and other spatial relationships are fundamentally important in the definition of the particular integrity constraints that must be verified in order to preserve the semantic contents of the spatial database. This paper describes such spatial integrity constraints, showing that they can be deduced from the primitives included in OMT-G, an object-oriented data model for geographic applications. The paper also presents an argument on the necessity of having such constraints implemented by spatial database management products, rather than by client geographic information systems, in the future.

1. Introdução

Diversas restrições de integridade devem ser observadas quando se realiza alguma atualização em um banco de dados, de modo a preservar a semântica e a qualidade dos dados armazenados. Garantir essa integridade é um objetivo bem consolidado em sistemas de gerenciamento de bancos de dados convencionais, em que restrições como as de domínio, de chaves e de relacionamentos são bastante conhecidas e extensivamente documentadas [12].

No entanto, quando se trata de bancos de dados espaciais, ocorrem alguns problemas adicionais, ligados principalmente aos aspectos topológicos e geométricos dos dados [20]. A maioria dos sistemas de informação geográficos (SIG) necessita garantir que certos tipos de restrições não sejam violadas, causando inconsistências tanto semânticas quanto visuais. Essas restrições precisam ser consideradas na construção do esquema da aplicação geográfica, e podem ser deduzidas a partir do modelo conceitual empregado, desde que este modelo seja capaz de explicitar de maneira adequada os relacionamentos espaciais entre objetos geográficos.

Este artigo aborda o relacionamento que existe entre a natureza da informação espacial, relacionamentos espaciais e restrições de integridade espaciais, a partir do modelo OMT-G, inclusive em fases iniciais do projeto. OMT-G é um modelo de dados orientado a objetos para aplicações geográficas, baseado na *Unified Modeling Language* (UML) [3, 4]. Uma vez que essas restrições tenham sido definidas e documentadas como parte integrante da modelagem conceitual, pode-se fazer com que o

sistema de gerenciamento de bancos de dados (SGBD) espacial e a aplicação venham a efetivamente implementá-las e, assim, garantir a integridade do banco de dados geográfico.

Este artigo está estruturado da seguinte maneira. A Seção 2 introduz uma classificação das restrições de integridade espaciais. A Seção 3 apresenta as restrições definidas a partir das primitivas do modelo OMT-G. Um exemplo de aplicação modelado usando OMT-G é apresentado na Seção 4, juntamente com uma listagem das restrições de integridade espaciais decorrentes. Finalmente, a Seção 5 conclui o artigo e apresenta perspectivas para a incorporação das definições apresentadas a ambientes reais.

2. Classificação das Restrições de Integridade Espaciais

As restrições de integridade que ocorrem na modelagem de bancos de dados podem ser classificadas em três grupos: restrições *de domínio*, restrições *estruturais de chaves e relacionamentos*, e restrições *semânticas gerais* [12]. Cockcroft [7] propõe outra classificação, voltada às peculiaridades dos dados espaciais, definindo restrições *topológicas*, *semânticas* e *definidas pelo usuário*. Cada um desses tipos de restrição está descrito a seguir.

Restrições de integridade topológicas. Existe bastante pesquisa teórica sobre os princípios da definição formal de relacionamentos espaciais, com destaque para a matriz de nove interseções [10]. Esses princípios podem ser aplicados a entidades e relacionamentos específicos das apli-

cações para formar uma base para o controle de integridade. Subdivisões de áreas são um exemplo desse tipo de restrição. As cidades de um estado devem estar contidas nos limites do território estadual, e não deve existir qualquer parcela do território que pertença a mais de um município ou a nenhum. Existem ainda restrições ligadas à forma geométrica usada para representar objetos simples, tais como aquelas inerentes ao conceito de linha e polígono. Tais restrições são relacionadas aos recursos de codificação das estruturas geométricas no SIG, e em geral garantidas pelos recursos de sua interface durante o processo de entrada de dados [17].

Restrições de integridade semânticas. Essas restrições estão ligadas ao significado das feições geográficas, e se aplicam a estados do banco de dados que são considerados válidos por meio da análise das propriedades dos objetos que precisam ser armazenados. Um exemplo desse tipo de restrição é a regra que define que não se pode ter superposição entre lotes e lagos.

Restrições de integridade definidas pelo usuário. Essas restrições permitem que a consistência do banco de dados seja mantida através do estabelecimento do equivalente às “regras de negócio” de SGBD convencionais. Um exemplo seria a implementação, no SIG, de uma restrição para atender às exigências de uma lei que impede a construção de postos de gasolina a menos de 100 metros de qualquer escola existente.

3. Restrições Definidas a Partir do Modelo OMT-G

De acordo com [12], todo modelo de dados embute um conjunto de restrições associadas às suas construções. No caso do modelo OMT-G [4], é possível deduzir uma série de restrições de integridade espaciais a partir das primitivas usadas para construir os diagramas de classes, transformando-as em regras que precisam ser observadas pelas operações de atualização do banco de dados. Desta forma, são definidos cinco grupos de regras: restrições ligadas a geo-campos, restrições ligadas a relacionamentos, restrições de conectividade, restrições à agregação espacial e restrições geométricas relativas a geo-objetos. Cada um desses grupos de regras será descrito a seguir. No caso específico de relacionamentos, apenas serão definidas formalmente as restrições de natureza espacial, considerando que relacionamentos convencionais, tais como associações simples, generalizações e especializações, têm suas restrições adequadamente tratadas com recursos dos SGBD atualmente disponíveis.

3.1 Restrições Ligadas a Geo-Campos

Este grupo de restrições deriva diretamente das noções de representação que são inerentes às cinco alternativas de representação presentes no modelo OMT-G: isolinhas, tesselação, subdivisão planar, rede triangular irregular e amostras. Em particular, observa-se que, de acordo com o conceito de geo-campos, todas as representações devem corresponder à totalidade do espaço modelado, ou seja,

deve ser possível inferir um valor em qualquer ponto do espaço de interesse a partir da informação contida em uma dessas representações. Este é o *princípio do preenchimento do plano*, inerente à natureza dos fenômenos representados usando geo-campos. Restrições especificamente definidas para as alternativas de representação de geo-campos, bem como uma restrição correspondente ao princípio de preenchimento do plano (e portanto válida para todas as alternativas de representação de geo-campos), estão formalmente descritas a seguir.

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

R2. Isolinhas. Seja F um geo-campo. Sejam v_0, v_1, \dots, v_n $n+1$ pontos no plano. Sejam $a_0 = \overline{v_0v_1}$, $a_1 = \overline{v_1v_2}$, ..., $a_{n-1} = \overline{v_{n-1}v_n}$, n segmentos, conectando os pontos. Esses segmentos formam uma *isolinha* L se, e somente se, (1) a interseção de segmentos adjacentes em L ocorre apenas no ponto extremo compartilhado por eles (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 F em cada ponto P tal que $P \in a_i$, $0 \leq i \leq n-1$, é constante.

R3. Tesselação. Seja F um geo-campo. Seja $C = \{c_0, c_1, c_2, \dots, c_n\}$ um conjunto de células de formato regular (quadrado, hexagonal, retangular) e regularmente espaçadas que cobre F . C é uma tesselação de F se e somente se para cada ponto $P \subset F$, existir exatamente uma célula $c_i \in C$ correspondente e, para cada célula c_i , o valor de F é dado.

R4. Subdivisão Planar. Seja F um geo-campo. Seja $A = \{A_0, A_1, A_2, \dots, A_n\}$ um conjunto de polígonos tal que $A_i \subset F$ para todo i tal que $0 \leq i \leq n-1$. O conjunto A forma uma *subdivisão planar* representando F se e somente se, para cada ponto $P \subset F$, existe exatamente um polígono $A_i \in A$, correspondente, para o qual o valor de F é dado.

R5. Rede Triangular Irregular. Seja F um geo-campo. Seja $T = \{T_0, T_1, T_2, \dots, T_n\}$ um conjunto de triângulos tal que $T_i \subset F$ para todo i tal que $0 \leq i \leq n-1$. T forma uma *rede triangular irregular* que representa F se e somente se, para cada ponto $P \subset F$, existe exatamente um triângulo $T_i \in T$ correspondente, e o valor de F é conhecido em todos os vértices de T_i .

3.2 Restrições Ligadas a Relacionamentos

Considerando a importância dos relacionamentos espaciais e não-espaciais para a compreensão do espaço modelado, o modelo OMT-G prevê três tipos de relacionamentos que podem ocorrer entre classes: *associações simples*, *relacionamentos espaciais* e *relacionamentos topológicos em rede*. Os primeiros correspondem aos

relacionamentos estruturais entre objetos de diferentes classes, independente de serem convencionais ou georreferenciados. Sua implementação leva a restrições de integridade convencionais, que não serão abordadas aqui. Os relacionamentos espaciais e de rede, por outro lado, ensinam uma série de restrições de integridade, baseadas em sua semântica (restrições semânticas, conforme a Seção 2), e na necessidade de se manter íntegras as estruturas de dados que as suportam (restrições topológicas, também de acordo com a Seção 2).

3.2.1 Relacionamentos espaciais

Com base em trabalhos anteriores [5, 6, 10, 11, 19], o modelo OMT-G adota um conjunto mínimo de operadores de relacionamento espacial, a partir do qual qualquer outro tipo de relacionamento espacial pode ser especificado: *toca*, *em*, *cruza*, *sobrepõe* e *disjunto*. No entanto, é importante notar que aplicações reais por vezes requerem um conjunto maior de operadores, devido à necessidade de se considerar conceitos culturais ou semânticos que são familiares aos usuários. Esses operadores adicionais incluem relações tais como *adjacente a*, *coincide*, *contém* e *próximo*, que podem ser definidos formalmente a partir dos cinco operadores básicos citados acima.

As restrições de integridade espaciais relativas aos cinco operadores básicos são apresentadas a seguir. Os quatro operadores adicionais propostos são também definidos, como um exemplo da possibilidade de formalização mencionada. Outros operadores usuais em aplicações, e que poderiam ser incluídos nesta lista são operadores direcionais ou indicativos de direções relativas, tais como *ao norte de*, *à esquerda de*, *em frente a* ou *acima de* [14]. Observe-se que alguns relacionamentos são apenas permitidos entre classes específicas, pois dependem da representação geométrica adotada para cada uma delas.

As regras são formuladas usando uma notação usual em geometria computacional, na qual objetos são indicados por letras maiúsculas em itálico (*A*, *B*), suas fronteiras são denotadas como ∂A , e seus interiores como A° (observe-se que $A^\circ = A - \partial A$). A fronteira de um ponto é convencionalmente definida como vazia (portanto o ponto é equivalente ao seu interior), e a fronteira de uma linha é composta de seus dois pontos extremos. Uma função, denominada *dim*, é usada para retornar a dimensão espacial de um objeto, ou seja, retorna 0 se o objeto for um ponto, 1 se for uma linha, ou 2 se for um polígono. Também são usadas as letras V e F para denotar os valores booleanos “verdadeiro” e “falso”.

Relacionamentos espaciais básicos

R6. Toca. Sejam *A*, *B* dois geo-objetos, sendo que nem *A* nem *B* são instâncias da classe **Ponto**. Então $(A \text{ toca } B) = V \Leftrightarrow (A^\circ \cap B^\circ = \emptyset) \wedge (A \cap B \neq \emptyset)$.

R7. Em. Sejam *A*, *B* dois geo-objetos. Então $(A \text{ em } B) = V \Leftrightarrow (A \cap B = A) \wedge (A^\circ \cap B^\circ \neq \emptyset)$.

R8. Cruza. Seja *A* um geo-objeto da classe **Linha**, e seja *B* um geo-objeto da classe **Linha** ou da classe **Polígono**. Então $(A \text{ cruza } B) = V \Leftrightarrow \dim(A^\circ \cap B^\circ) = ((\max(\dim(A^\circ), \dim(B^\circ)) - 1) \wedge (A \cap B \neq A) \wedge (A \cap B \neq B))$

R9. Sobrepõe. Sejam *A*, *B* dois geo-objetos, ambos instâncias da classe **Linha** ou da classe **Polígono**. Então $(A \text{ sobrepõe } B) = V \Leftrightarrow \dim(A^\circ) = \dim(B^\circ) = \dim(A^\circ \cap B^\circ) \wedge (A \cap B \neq A) \wedge (A \cap B \neq B)$.

R10. Disjunto. Sejam *A*, *B* dois geo-objetos. Então $(A \text{ disjunto } B) = V \Leftrightarrow A \cap B = \emptyset$.

Relacionamentos espaciais adicionais

R11. Adjacente a. Seja *A* um geo-objeto da classe **Polígono** e seja *B* um geo-objeto da classe **Linha** ou da classe **Polígono**. Então $(A \text{ adjacente a } B) = V \Leftrightarrow (A \text{ toca } B) \wedge \dim(A \cap B) = 1$.

R12.. Coincide. Sejam *A*, *B* dois geo-objetos. Então $(A \text{ coincide } B) = V \Leftrightarrow A \cap B = A = B$.

R13. Contém. Sejam *A*, *B* dois geo-objetos, onde *A* é uma instância da classe **Polígono**. Então $(A \text{ contém } B) = V \Leftrightarrow ((B \text{ em } A) = V) \wedge ((A \text{ coincide } B) = F)$.

R14. Próximo(*dist*). Sejam *A*, *B* dois geo-objetos. Seja *C* um *buffer*, criado a uma distância *dist* ao redor de *A*. Então $(A \text{ próximo}(\textit{dist}) B) = V \Leftrightarrow (B \text{ disjunto } C) = F$.

A regra *disjunto* é muito importante para manter a integridade dos dados armazenados no banco de dados geográfico, e precisa ser usada em diversas situações para verificar a validade da entrada de dados. Por exemplo, se as classes Trecho de Logradouro e Edificação são disjuntas, isso significa que não pode existir um segmento de logradouro interceptando uma edificação. Se for necessário desenhar um trecho de logradouro sobre uma edificação, torna-se necessário primeiro excluir a edificação. Métodos de criação de objetos associados às classes podem garantir a aplicação desta regra.

A regra *próximo* é a única, dentre as apresentadas acima, que exige um parâmetro. Uma vez que a noção de proximidade varia de acordo com a situação, um valor de distância (ou outra medida qualquer de proximidade, como o tempo de deslocamento) precisa ser fornecido de modo a permitir a avaliação correta do relacionamento. Como exemplo, considere-se as classes Endereço e Ponto de ônibus. Para estabelecer um relacionamento entre instâncias dessas classes, a máxima distância em que um ponto de ônibus pode ainda ser considerado próximo a um endereço deve ser definida, por exemplo em 500 metros.

3.2.2 Relacionamentos em rede

No modelo OMT-G, relacionamentos em rede são relacionamentos entre objetos conectados uns aos outros. Um relacionamento de rede apenas estabelece a necessidade de uma conexão lógica, não exigindo a implementação de qualquer estrutura de dados em particular. Em geral, os relacionamentos deste tipo envolvem uma classe de nós de rede e uma classe de arcos unidirecionais ou bidirecionais. No entanto, estruturas de rede também podem ser construídas sem nós, através de um relacionamento recursivo sobre uma classe de arcos.

Sobre este tipo de relacionamento, as regras a seguir se aplicam.

R15. Estrutura 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 $A = \{a_0, a_1, \dots, a_q\}$. Instâncias de N e instâncias de A são relacionadas de acordo com as seguintes restrições:

1. Para cada nó $n_i \in N$ deve haver pelo menos um arco $a_k \in A$.
2. Para cada arco $a_k \in A$ deve haver exatamente dois nós $n_i, n_j \in N$.

R16. Estrutura 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:

3. Cada arco $a_k \in A$ deve estar ligado a pelo menos um outro arco $a_i \in A$, onde $k \neq i$.

Exemplificando o uso dessas regras, considere-se uma rede de esgotos, representada como uma estrutura arco-nó. Os nós são usados para representar elementos de conexão na rede, tais como poços de visita, estações de tratamento e pontos de descarga, enquanto os arcos são usados para representar os trechos de tubulação. É exigido que o sistema garanta a conexão entre todos os tipos de nós e de segmentos. Os relacionamentos de rede necessários podem ser mantidos pelo SIG usando estruturas de dados especiais, em que a correspondência entre cada arco e seus dois nós é fixada. Este tipo de restrição é, em geral, garantida pelo próprio SIG, quando este dispõe de recursos adequados de gerenciamento de redes.

3.2.3 Generalização e Especialização

No modelo OMT-G, a especificação de generalizações e especializações se aplica tanto a classes georreferenciadas quanto a classes convencionais, seguindo basicamente as definições e notação propostas na UML, em que um triângulo conecta uma superclasse às suas subclasses. No caso de generalização/especialização envolvendo classes georreferenciadas, a alternativa de representação da superclasse e das subclasses tem que ser a mesma.

As generalizações (espaciais ou não) podem ser especificadas como *totais* ou *parciais* [16, 22]. Uma generalização é total quando a união de todas as instâncias das

subclasses é equivalente ao conjunto completo de instâncias da superclasse. A UML representa a restrição de totalidade através dos elementos de restrição predefinidos *completo* e *incompleto*, mas o modelo OMT-G adota uma notação mais visual, que consiste em colocar um ponto no vértice superior do triângulo para indicar a totalidade da relação [16]

Outra característica de generalizações e especializações é a superposição ou disjunção. A disjunção ocorre quando as instâncias da superclasse pertencem a apenas uma subclasse. Como na UML, o OMT-G indica a condição de disjunção deixando o triângulo em branco, e a sobreposição com o triângulo preenchido.

Com isso, existem quatro combinações de disjunção e totalidade, gerando quatro tipos de restrições que se aplicam a generalização/especialização. A Figura 1 apresenta exemplos de cada combinação.

Observe-se que essas definições conduzem naturalmente à implementação das restrições de integridade correspondentes, independentemente das características espaciais dos dados. Como não se trata de restrições especificamente espaciais, não será desenvolvida aqui uma formalização específica, bastando observar que em geral o esquema de implementação poderá assegurar que as restrições sejam atendidas usando apenas os recursos habituais em gerenciadores de bancos de dados convencionais.

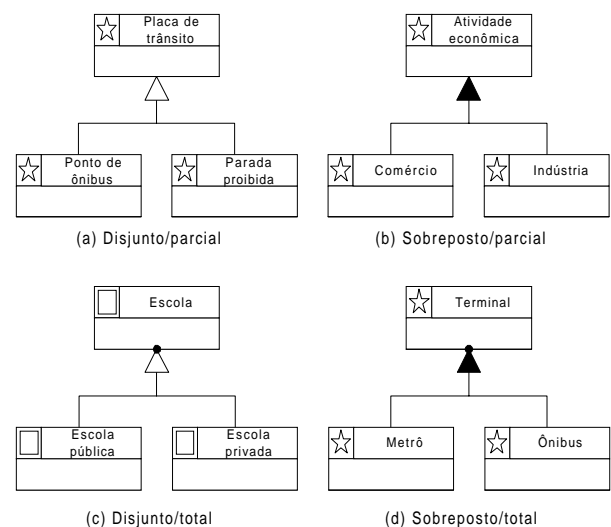


Figura 1 - Exemplos de generalização

3.2.4 Agregação espacial

Agregação é uma forma especial de associação entre objetos, em que um deles é formado a partir dos demais. Isso pode ocorrer entre classes convencionais, entre classes georreferenciadas, e também entre uma classe convencional e uma georreferenciada. Quando a agregação é entre classes georreferenciadas, é usada a *agregação espacial*.

A agregação espacial é, assim, um caso especial de agregação em que relacionamentos topológicos do tipo

“todo-partes” são explicitados [1, 15]. O uso deste tipo de agregação impõe restrições de integridade espaciais relativas à existência do objeto agregado e dos sub-objetos correspondentes.

Essas restrições destinam-se essencialmente a garantir que cada parte esteja geometricamente contida no todo, e que o todo seja completamente coberto pelas partes. Observe-se que a existência dessas restrições não força uma decisão quanto à seqüência de entrada de dados, ou seja, não é definido, no diagrama de classes do OMT-G, se o todo deve ser incorporado ao banco de dados primeiro, para depois ser dividido em partes, ou se o procedimento deve ser o inverso. Tal definição é feita no diagrama de transformação do OMT-G, onde uma operação de transformação adequada entre as classes envolvidas pode ser especificada [9]. Essa operação de transformação tem então que garantir a aplicação das restrições de integridade relativas ao conceito da agregação. As restrições de integridade espaciais relativas à agregação espacial são definidas formalmente a seguir.

R17. Agregação espacial. Seja $P = \{P_0, P_1, \dots, P_n\}$ um conjunto de geo-objetos. Então 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
3. $((P_i \text{ toca } P_j) \vee (P_i \text{ disjuncto } P_j)) = V$ para todo i, j tais que $i \neq j$.

Como exemplo, considere-se o fragmento de diagrama de classes apresentado na Figura 2, onde se está especificando que quadras são compostas de lotes, ou seja, as quadras são geometricamente equivalentes à união de lotes adjacentes. Isso implica em dizer que (1) nenhuma área pertencente à quadra pode existir fora de um de seus lotes, (2) não pode haver superposição geométrica entre os lotes que pertencem à quadra, e (3) nenhuma área que pertença a um lote pode existir fora da quadra.

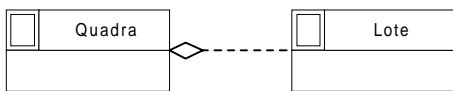


Figura 2 - Agregação espacial (notação OMT-G)

3.3 Restrições Geométricas Relativas a Geo-Objetos

Estas restrições são ligadas fundamentalmente aos conceitos geométricos sobre linhas poligonais e polígonos, usados na representação de geo-objetos, especificamente as classes *linha*, *polígono*, *arco unidirecional* e *arco bidirecional*.

Na área de geometria computacional, define-se como *simples* a linha poligonal ou polígono em que não existem interseções entre segmentos, à exceção do compartilhamento de vértices entre segmentos consecutivos, e

complexos no caso oposto. As condições formais para que uma linha seja considerada simples correspondem aos dois primeiros critérios da restrição de isolinhas (R2). De modo geral, os SIG não impedem que poligonais complexas sejam criadas; no entanto, dificilmente este tipo de linha ocorre na natureza. Além do mais, essas poligonais criam dificuldades na definição da topologia e em operações como a criação de *buffers*. De fato, diversos SIG possuem módulos de tratamento de dados de entrada que são capazes de encontrar e eliminar tais situações, deslocando vértices ou dividindo as linhas ou polígonos em duas ou mais partes simples.

Assim, as definições geométricas adotadas no modelo OMT-G não admitem a existência de geo-objetos formados por linhas ou polígonos complexos. São admitidos, por outro lado, geo-objetos formados por um ou vários polígonos simples, sendo que um deles é considerado o polígono “básico” e os demais constituem *ilhas* ou *buracos*. Esses polígonos formados por múltiplas partes (ou *regiões poligonais* [17]) são importantes pois não se pode assegurar que o resultado de operações tradicionais, tais como criação de *buffers*, união, interseção e diferença de polígonos simples seja sempre formado por um único polígono. Neste caso, uma exigência importante é que o polígono básico e as ilhas tenham seus vértices codificados em sentido anti-horário, e os buracos codificados em sentido horário [18]. As restrições correspondentes a linhas e polígonos são apresentadas a seguir.

R18. Linhas. Sejam v_0, v_1, \dots, v_{n-1} n pontos no plano.

Sejam $s_0 = \overline{v_0v_1}, s_1 = \overline{v_1v_2}, \dots, s_{n-2} = \overline{v_{n-2}v_{n-1}}$ uma seqüência de $n - 1$ segmentos, conectando estes pontos. Estes segmentos formam uma *linha poligonal* L se, e somente se, (1) a interseção de segmentos consecutivos é apenas o ponto extremo compartilhado por eles (i.e., $s_i \cap s_{i+1} = v_{i+1}$), (2) segmentos não consecutivos não se interceptam (i.e., $s_i \cap s_j = \emptyset$ para todo i, j tais que $j \neq i + 1$), e (3) $v_0 \neq v_{n-1}$, ou seja, a linha poligonal não é fechada.

R19. Polígonos simples. Sejam v_0, v_1, \dots, v_{n-1} n pontos no plano, sendo $n > 3$.

Sejam $s_0 = \overline{v_0v_1}, s_1 = \overline{v_1v_2}, \dots, s_{n-2} = \overline{v_{n-2}v_{n-1}}$ uma seqüência de $n - 1$ segmentos, conectando estes pontos. Estes segmentos formam um *polígono simples* P se, e somente se, (1) a interseção de segmentos consecutivos é apenas o ponto extremo compartilhado por eles (i.e., $s_i \cap s_{i+1} = v_{i+1}$), (2) segmentos não consecutivos não se interceptam (i.e., $s_i \cap s_j = \emptyset$ para todo i, j tais que $j \neq i + 1$), e (3) $v_0 = v_{n-1}$, ou seja, o polígono é fechado.

R20. Regiões poligonais. Seja $R = \{P_0, P_1, \dots, P_{n-1}\}$ um conjunto formado por n polígonos simples no plano, sendo $n > 1$. Considerando que P_0 é o polígono básico, R compõe uma região poligonal se e somente se (1)

$P_i \cap P_j = \emptyset$, para todo $i \neq j$, (2) o polígono P_0 tem seus vértices codificados no sentido anti-horário, (3) P_i disjuncto P_j (restrição R10) para todo $P_i \neq P_0$ cujos vértices estiverem codificados em sentido anti-horário, e (4)

P_0 contém P_i (restrição R13) para todo $P_i \neq P_0$ cujos vértices estiverem codificados em sentido horário.

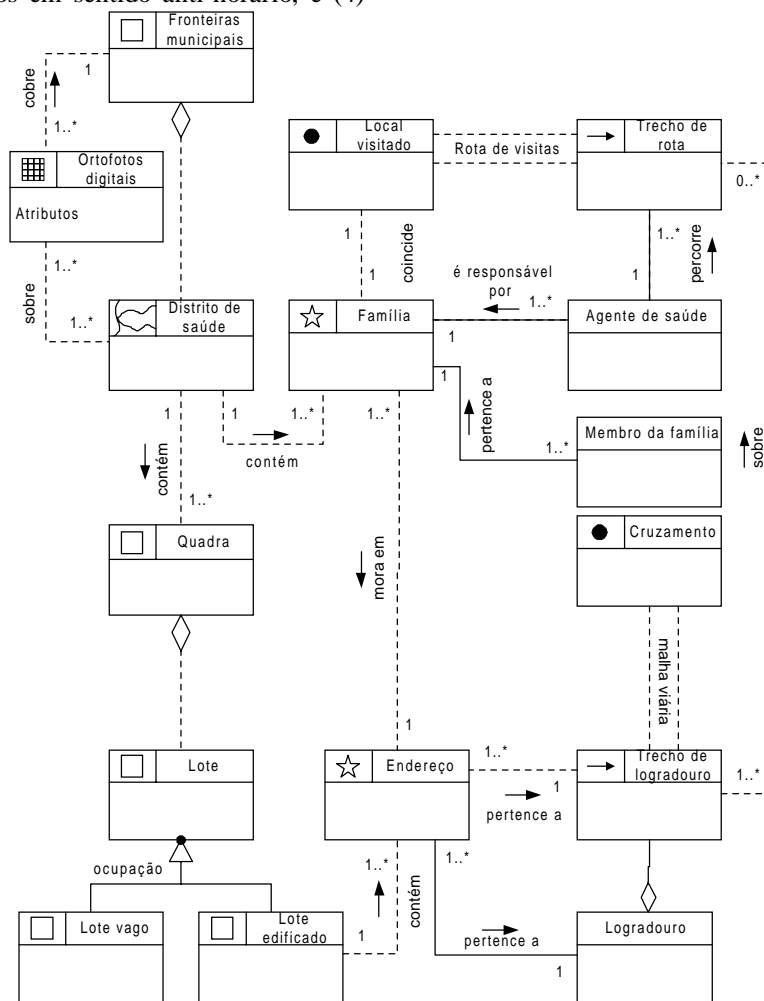


Figura 3 - Exemplo de aplicação, diagrama de classes OMT-G

4. Exemplo de Aplicação

Para ilustrar melhor a dedução de restrições de integridade espaciais a partir das classes e relacionamentos definidos no modelo OMT-G, uma aplicação simplificada na área de um programa de saúde da família é apresentada nesta seção.

A Figura 3 apresenta o diagrama de classes OMT-G para a aplicação. O espaço geográfico da aplicação é o território de um município. Um conjunto de ortofotos digitais cobre a totalidade desse território, e é usado como informação de fundo para a aplicação.

O espaço municipal é dividido em distritos de saúde, que são responsáveis pelo atendimento descentralizado à população. Cada distrito emprega agentes de saúde, que cuidam de famílias que vivem na área do distrito. Os distritos de saúde contêm quadras, que são por sua vez divididas em lotes. Quadras e lotes têm seus limites re-

presentados por polígonos. Os lotes podem ser vagos ou ocupados, dependendo da existência de uma ou mais edificações em seu interior. Endereços são formados pela concatenação do código do logradouro ao número de porta. Cada endereço é representado por um símbolo, que deve ser posicionado no interior dos limites do lote. Apenas lotes edificados podem possuir endereços (uma restrição de integridade definida pelo usuário, pois corresponde à regra definida pela administração municipal para a atribuição oficial de endereços). Um logradouro é representado por seus segmentos, que cumprem o papel de arcos na rede de logradouros (malha viária municipal). Os nós dessa rede representam os cruzamentos entre vias.

Cada agente de saúde é responsável por visitas periódicas a um grupo de famílias, aplicando por ocasião da visita técnicas de medicina preventiva, tais como acompanhamento de recém-nascidos, controle de gestantes, vacinação, verificação de condições sanitárias, e outras. Cada membro de cada família é cadastrado no sistema,

juntamente com seus dados individuais e histórico médico. Os agentes dispõem de rotas previamente definidas para se deslocar de casa em casa.

A partir do diagrama de classes, e de acordo com as regras apresentadas, pode-se deduzir as restrições de integridade listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Restrições de integridade espaciais do exemplo e respectivas identificações no texto

Restrições Topológicas	
Fronteiras municipais são uma agregação espacial de Distrito de saúde Quadra é uma agregação espacial de Lote	R17
Distrito de saúde contém Família Distrito de saúde contém Quadra Lote edificado contém Endereço	R13
A malha viária é composta de Trechos de logradouro (arcos) e Cruzamentos (nós) Rotas de visitas são compostas de Trechos de rota (arcos) e Locais visitados (nós)	R15
Endereço e Família coincidem Família e Local visitado coincidem	R12
Distritos de saúde precisam preencher o espaço modelado (fronteiras municipais) Ortofotos digitais precisam preencher o espaço modelado (fronteiras municipais)	R1
Distritos de saúde formam uma subdivisão planar	R4, R19, R20
Ortofotos digitais são tesselações	R3
Fronteiras Municipais, Quadra, Lote, Lote Vago, Lote Edificado são polígonos	R19, R20
Trecho Rota e Trecho de Logradouro são arcos	R18
Restrições Semânticas	
Trechos de logradouro não podem cruzar Quadras	R10
Restrições Definidas pelo Usuário	
Um Lote não edificado não pode conter Endereços	R10

Além das restrições de integridade espaciais, listadas na Tabela 1, restrições decorrentes das associações simples incluídas no diagrama de classes também precisam ser especificadas. Existe ainda a necessidade de especificar as restrições de integridade para a especialização entre Lote, Lote vago e Lote edificado. A cardinalidade de cada associação simples e de cada relacionamento espacial precisa ainda ser levada em consideração

na implementação como um conjunto de restrições estruturais.

5. Conclusões e Direções Futuras

Os SIG atuais são em geral produtos monolíticos e verticalizados, em que todas as funções relevantes são implementadas pela equipe de desenvolvimento do produto e incorporadas, em geral de maneira fechada e proprietária, ao código. É muito comum encontrar produtos que incorporam funções primitivas de gerenciamento de dados espaciais, e ao mesmo tempo possuem uma interface com sistemas tradicionais usuais de gerenciamento de bancos de dados relacionais. Apenas recentemente esses SGBD começaram a incorporar características espaciais, incluindo estruturas objeto-relacionais, capazes de gerenciar formas geométricas simples, e recursos de indexação espacial. Os desenvolvedores de software SIG estão gradualmente percebendo a importância estratégica e econômica de usar esses SGBD em lugar de suas estruturas proprietárias, e têm introduzido interfaces entre eles e seus produtos.

No entanto, os SGBD ditos espaciais de hoje não implementam as restrições de integridade espaciais com a mesma qualidade das restrições usuais em bancos de dados relacionais. Ao contrário, os SGBD assumem que toda a verificação de integridade espacial será realizado pelo SIG, durante o processo de entrada de dados, anteriormente ao armazenamento no banco de dados. Com a formulação de regras claras para a verificação da integridade, as restrições espaciais poderão ser agregadas ao processo de mapeamento entre o esquema conceitual e o esquema de implementação, e poderiam portanto ser solidamente incorporadas ao projeto do banco de dados. Um exame detalhado das restrições de integridade apresentadas neste artigo indica que cada uma delas pode ser implementada com a ajuda de algoritmos bastante conhecidos das áreas de geometria computacional, tais como ponto em polígono [21], interseção de linhas [8, 21], e interseção, união e diferença de polígonos [18], ou com o uso localizado de estruturas topológicas, como a *winged-edge* [2]. Além disso, deve ser permitido que o usuário formule restrições de integridade específicas, conforme exigido pela aplicação e suas “regras de negócio”. Isso pode ser feito tanto pela implementação de uma função de verificação da consistência do banco, quanto pelo uso combinado de funções existentes. Essas funções são na verdade implementações de algoritmos tradicionais, disponíveis em SIG comerciais já há muitos anos, tais como detecção de *slivers* e *gaps*, casamento de bordas, simplificação de linhas, e outros.

Existe outro argumento em favor da transferência da responsabilidade de verificação da integridade espacial para o SGBD. Como esses produtos pretendem tornar-se o eixo do gerenciamento da informação espacial em ambientes corporativos, uma grande parte das vantagens em empregá-los advém da possibilidade de se implantar uma

ampla gama de produtos-cliente, cada qual especializado em um nicho de tarefas: edição de dados, análise espacial, gerenciamento de redes, produção cartográfica, integração a sistemas legados, e assim por diante. Com isso, parece ser mais racional procurar assegurar a integridade dos dados a partir da implementação das restrições de integridade como funções do SGBD, e criar mecanismos para executá-las criteriosamente por ocasião do armazenamento de algum dado.

Quando a integração das restrições de integridade espaciais aos SGBD espaciais for implementada, desenvolvedores e usuários de SIG poderão investir em outros recursos, incluindo aspectos espaço-temporais, múltiplas representações [9], e o uso de ontologias para aproximar a aplicação do modelo mental do usuário [13].

6. Referências

- [1] Abrantes, G., Carapuça, R. Explicit representation of data that depend on topological relationships and control over data consistency. In *Proceedings of the Fifth European Conference and Exhibition on Geographical Information Systems*, 1:869-877, 1994.
- [2] Baumgart, B. A polyhedron representation for computer vision. In *Proceedings of the AFIPS Conference*, 589-596, Anaheim, California, 1975.
- [3] Borges, K. A. V., Laender, A. H. F., Davis Jr., C. A. Spatial data integrity constraints in object oriented geographic data modeling. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS'99)*, 1-6, Kansas City, Missouri, 1999.
- [4] Borges, K. A. V., Davis Jr., C. A., Laender, A. H. F. OMT-G: An Object-Oriented Data Model for Geographic Applications. *GeoInformatica* 5(3), 2001 (to appear, September 2001).
- [5] Câmara, G. Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos. Tese de Doutorado, INPE, 1995.
- [6] Clementini, E., DiFelice, P., Oosterom, P. A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction. In *Proceedings of the 3rd Symposium on Spatial Database Systems*, 277-295, Singapore, 1993.
- [7] Cockcroft, S. A taxonomy of spatial data integrity constraints. *GeoInformatica* 1(4): 327-343, 1997.
- [8] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L. *Introduction to Algorithms*. McGraw-Hill and MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.
- [9] Davis Jr., C. A. *Múltiplas Representações em Sistemas de Informação Geográficos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.
- [10] Egenhofer, M. J., Franzosa, R. D. Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(2):161-174, 1991.
- [11] Egenhofer, M. J., Herring, J. A mathematical framework for the definition of topological relationships. In *Proc. 4th International Symposium on Spatial Data Handling*, 803-813, Zurich, 1990.
- [12] Elmasri, R., Navathe, S. *Fundamentals of database systems*. 3rd Edition. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 2000.
- [13] Fonseca, F. T. *Ontology-driven Geographic Information Systems*. Ph.D. Thesis, University of Maine, 2001.
- [14] Goyal, R. K. *Similarity Assessment for Cardinal Directions Between Extended Spatial Objects*. Ph.D. Thesis, University of Maine, 1999.
- [15] Kösters, G., Pagel, B., Six, H. GIS-application development with GeoOOA. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(4):307-335, 1997.
- [16] Laender, A. H. F., Flynn, D. J.. 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*, 242-256, Springer, 1994.
- [17] Laurini, R., Thompson, D. *Fundamentals of spatial information systems*. Academic Press, London, 1992.
- [18] Margalit, A., Knott, G. D. An Algorithm for Computing the Union, Intersection or Difference of Two Polygons. *Computers & Graphics* 13(2): 167-183, 1989.
- [19] Papadias, D., Theodoridis, Y. Spatial relations, minimum bounding rectangles, and spatial data structures. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(2):111-138, 1997.
- [20] Plumber, L., Groger, G. Achieving integrity in geographic information systems: maps and nested maps, *GeoInformatica* 1(4): 346-367, 1997.
- [21] Preparata, F. P., Shamos, M. I. *Computational Geometry: an Introduction*, Springer-Verlag, New York, 1988.
- [22] Rational Software Corporation. *The Unified Modeling Language: notation guide*, version 1.1 July 1997. (<http://www.rational.com>).

