



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

PERSISTÊNCIA DE MODELOS TIN EM BANCO DE DADOS

Eduilson Lívio Neves da Costa Carneiro

Monografia de Qualificação em Computação Aplicada

INPE
São José dos Campos
2007

RESUMO

Os Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados Objeto-Relacional (SGBD-OR) evoluíram dos SGBD-R, sendo uma solução para aplicações não convencionais. Dentre essas aplicações encontram-se os Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

O armazenamento de dados espaciais em SGBD está diretamente relacionado à sua forma de representação. Dentre os modelos de representação de dados espaciais temos o modelo TIN utilizado para representar dados de relevo, temperatura, informações geológicas, informações meteorológicas, dentre outros, coletados em espaçamento irregular com cobertura de toda área da superfície a ser representada.

Neste trabalho, apresentaremos as atuais estruturas de armazenamento de dados espaciais em SGBD, com particular enfoque na persistência de modelos TIN em SGBD.

SUMÁRIO

RESUMO	ii
SUMÁRIO.....	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	v
1 INTRODUÇÃO	1
2 TRIANGULAR IRREGULAR NETWORKS.....	3
3 ARMAZENAMENTO DE DADOS ESPACIAIS.....	11
3.1 Open Geospatial Consortium – OGC	11
3.2 ArcGIS	14
3.3 Oracle Spatial	17
3.4 PostGIS.....	18
3.5 Outros Modelos de Armazenamento.....	18
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Superfície e grade irregular triangular correspondente (Namikawa, 1995)	5
Figura 3.1 – Subtipos de <i>feature</i> , adaptado de (OGC, 1998b).....	12
Figura 3.2 – Hierarquia da classe <i>Geometry</i> (OGC, 1998a)	12
Figura 3.3 – Classe <i>PolyhedralSurface</i> (OGC, 1998a)	13
Figura 3.4 – Subtipos de <i>coverage</i> , adaptado de (OGC, 1998b).....	13
Figura 3.5 – Estrutura de dados <i>geodatabase</i> (ESRI, 2007)	14
Figura 3.6 – Representações espaciais para <i>feature class</i> (ESRI, 2007)	15
Figura 3.7 – Estrutura de dados <i>terrains</i> (ESRI, 2007).....	16
Figura 3.8 – Níveis de detalhe com <i>terrains pyramid</i> (ESRI, 2007)	17
Figura 3.9 – Tipos de dados espaciais primitivos do <i>Oracle Spatial</i> (Murray, 2006)	17

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BD	– Bancos de Dados
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LIDAR	– <i>Light Detection and Ranging</i>
OGC	– <i>Open Geospatial Consortium</i>
SI	– Sistemas de Informações
SIG	– Sistemas de Informações Geográficas
SGBD	– Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados
SGBD–R	– Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados Relacionais
SGBD–OR	– Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados Objeto–Relacional
TIN	– <i>Triangular Irregular Networks</i>

1 INTRODUÇÃO

Os modernos Sistemas de Informações (SI) estão altamente baseados nas tecnologias dos Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados (SGBD) disponíveis. Com destaque para os Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados Relacionais (SGBD-R), que se apóiam na teoria dos modelos relacionais de dados.

Os Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados Objeto-Relacional (SGBD-OR) evoluíram dos SGBD-R, sendo uma solução para aplicações não convencionais. Dentre essas aplicações encontram-se os Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Os SIG possuem duas formas de interação com os SGBD através de dois tipos de arquiteturas (Câmara, 2005):

- **Arquitetura Dual**, onde os BD armazenam os dados convencionais ou alfanuméricos e os dados espaciais são armazenados em arquivos de formato proprietário;
- **Arquitetura Integrada**, que utilizam os BD para armazenarem tanto os dados alfanuméricos quanto espaciais.

O armazenamento de dados espaciais em SGBD está diretamente relacionado à sua forma de representação. Os dados espaciais encontrados nos SIG podem ser classificados em Geo-Campos e Geo-Objetos (Goodchild, 1992).

- **Geo-Objetos**: são representados por entidades vetoriais: ponto, linha e polígono, referenciados por um sistema de coordenadas

cartesianos, com fronteiras claramente definidas e com ou sem relação topológica entre si (Burrough; McDonnel, 1998).

- Geo-Campos: são representados através de uma matriz com células retangulares, hexagonais ou triangulares, ou de uma rede irregular de triângulos ou polígonos. Os geo-campos são utilizados na discretização de informações como relevo, temperatura ou pressão sobre superfícies contínuas.

As Redes Triangulares Irregulares, mais comumente conhecidas como TIN - *Triangular Irregular Networks*, são o objeto de estudo deste trabalho, com foco principal em sua persistência e eficiente recuperação em BD. No capítulo 2 detalhamos os conceitos envolvidos, métodos de geração e os dados que utilizam essa forma de representação. No capítulo 3 exploramos quais as alternativas atuais de armazenamento e manipulação de modelos TIN disponíveis e no capítulo 4 apresentamos as motivações para essa linha de pesquisa assim como considerações finais a respeito do trabalho.

2 TRIANGULAR IRREGULAR NETWORKS

Segundo Mark (1997) e Berg *et all* (2000), o modelo TIN é a forma padrão para representação de topografia em SIG e em outros *softwares*.

De acordo com Preparata e Shamos (1985), uma triangulação pode ser definida da seguinte forma: seja $P = \{p_i = (x_i, y_i), 1 \leq i \leq n\}$ um conjunto de N pontos distintos, espaçados irregularmente, num espaço euclidiano bidimensional, $FC(P)$ o fecho convexo do conjunto P , ou seja, o menor polígono convexo no espaço euclidiano que contenha todos os pontos de P , e $t = (V_1, V_2, V_3)$ um triângulo formado pelos vértices V_1, V_2 e $V_3 \in P$. O conjunto de triângulos $T = \{t_j, 1 \leq j \leq m\}$ é uma triangulação de P se não houver superposição de triângulos, podendo haver compartilhamento de vértices e arestas, e que cada região interna a $FC(P)$ pertença a um triângulo de T .

O conjunto P representa os pontos amostrais da variável, ou fenômeno em questão, que será modelado pelo TIN. Cada amostra é composta de uma posição e do valor que representa a ocorrência do fenômeno sobre esta posição. Por exemplo, para o sistema de coordenadas cartesiano XYZ , a posição pode ser representada pelo par de coordenadas xy e o valor de z . Os fenômenos espaciais que podem ser representados por TIN são dados de relevo, temperatura, informações geológicas, informações meteorológicas, dentre outros, coletados em espaçamento irregular com cobertura de toda área da superfície a ser representada.

Segundo Namikawa (1995), a triangulação de Delaunay é a mais aceita para representação de superfícies, e cita duas propriedades para que uma triangulação T seja uma triangulação de Delaunay:

- supondo um quadrilátero convexo formado por dois triângulos adjacentes e a aresta comum a esses triângulos uma diagonal do quadrilátero. Se essa diagonal for substituída por outra diagonal do quadrilátero e o mínimo entre os seis ângulos internos dos triângulos não aumentar, então, essa é uma triangulação de Delaunay (Sibson, 1978);
- para todo triângulo $t \in T$, da triangulação sobre o conjunto P de pontos, composto pelas arestas A_1, A_2 e A_3 , existe um círculo C com borda sobre as extremidades destas arestas e este círculo não contém outros pontos do conjunto P . Esta propriedade é conhecida como propriedade do circuncírculo (Li *et al.*, 2004).

A Figura 2.1 apresenta um exemplo de superfície com a estrutura triangular associada.

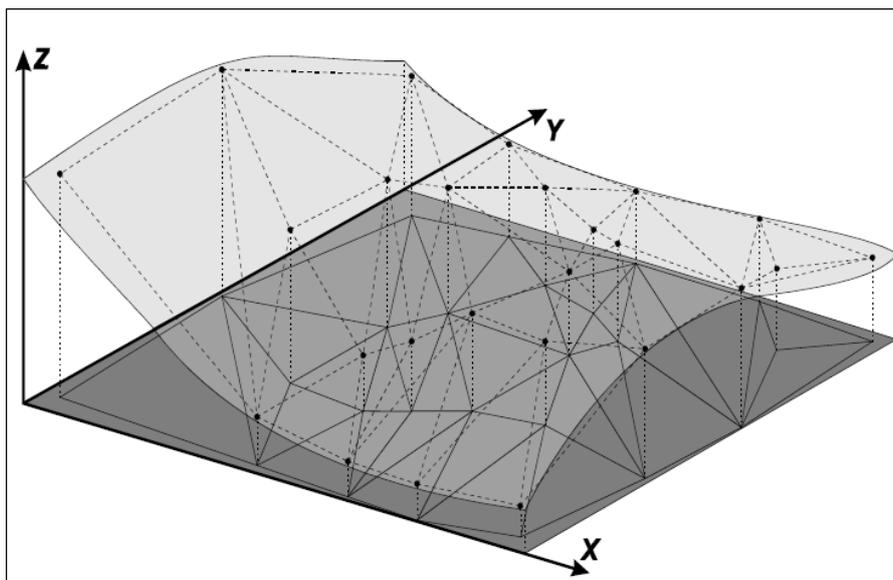


Figura 2.1 - Superfície e grade irregular triangular correspondente (Namikawa, 1995).

Conforme Li (2004), existem diversas abordagens aceitas para a construção de triangulações baseadas na triangulação de Delaunay, e apresenta algumas:

- **Triangulação de Delaunay estática baseada em vetores:** nesse método os pontos amostrais são todos apresentados de uma única vez. Após a escolha do ponto inicial inicia-se a criação dos triângulos, sequencialmente, até estarem todos os pontos interligados. A escolha do ponto inicial segue algumas abordagens: (a) o centro geométrico dos pontos amostrais (Ilfick, 1979); (b) a menor das linhas entre dois pontos, que gera muito processamento para calcular todas as distâncias entres os pontos e por isso menos indicada; (c) um segmento de linha no limite imaginário para os pontos, tal limite pode ser o retângulo envolvente dos pontos; (d) um segmento de linha sobre o fecho convexo dos pontos amostrais, o cálculo do fecho convexo pode

ser realizado através de diversos algoritmos (Rezende; Stolfi, 1994), (Preparata *et al.*, 1985).

- **Triangulação de Delaunay dinâmica baseada em vetores:** A inserção dos pontos amostrais dá-se de forma seqüencial, o que faz com que o processo de criação da triangulação adquira um formato dinâmico onde a triangulação é ajustada à medida que os novos pontos são inseridos. Esse método também abrange a remoção de pontos, refazendo a triangulação após cada deleção. Este procedimento apresenta complexidade da ordem $O(N^2)$ no pior caso, mas se a busca for iniciada por um ponto central passa a ter $O\left(N^{\frac{3}{2}}\right)$ (Guibas; Stolfi, 1985). O algoritmo de Bowyer-Watson (Bowyer, 1981; Watson, 1981) é considerado o principal algoritmo para esse tipo de triangulação.
- **Triangulação Quase-Delaunay:** Esse processo de triangulação é utilizado quando temos a necessidade de inserir linhas características no modelo encontrado. As linhas características representam formas geográficas que causam uma descontinuidade da superfície, como os vales, as cristas de regiões montanhosas, dentre outros (Namikawa, 1995). Esse método segue duas propriedades: (a) as linhas características são inseridas em uma triangulação prévia, (b) o resultado final é uma triangulação mais próximo possível da triangulação de Delaunay (Li *et al.*, 2004).

- **Triangulação a partir de linhas de eixo médio (*skeletons*) geradas de curvas de nível (isolinhas):** A inserção de dados de isolinhas em uma triangulação possui duas abordagens não desejadas. Ou inserimos todos os pontos das isolinhas na triangulação, o que poderia provocar um efeito chamado de *flat triangles*, com triângulos formados por pontos de mesma isolinha; ou então, tratar as isolinhas como linhas características, o que sobrecarregaria o processamento. Portanto, uma abordagem menos problemática seria a geração de linhas de *skeletons*, a partir das isolinhas. Assim teríamos uma triangulação inicial formada pelas linhas do *skeleton* e em seguida a inserção dos pontos amostrais na triangulação. Segundo Christensen (1987) esse método gera uma triangulação com boa precisão sem criar ou quebrar feições importantes. Em Little (2001) temos uma abordagem que utiliza um *skeleton* como ponto inicial para a triangulação e avalia a complexidade do algoritmo em $O(N \log^2 N)$ para o pior caso.
- **Triangulação de Delaunay via Diagrama de Voronoi:** Existe uma forte relação entre o Diagrama de Voronoi e a Triangulação de Delaunay. Após a construção do Diagrama de Voronoi efetua-se a triangulação unindo-se os pontos que compartilham bordas das regiões do diagrama de Voronoi, formando as arestas para a Triangulação de Delaunay. Portanto, a questão importante nesse método é o processo de criação do diagrama de Voronoi. Para

uma descrição elementar do diagrama de Voronoi, seja P um conjunto de N pontos no plano e p_i e $p_j \in P$, a região do plano que está mais próxima do ponto p_i do que de p_j é definida pelo semi-plano que contenha p_i , ou seja, pelo bissetor perpendicular ao segmento de reta $\overline{p_i p_j}$, denominado $H(p_i, p_j)$. Seja $V(i)$ a região do plano que está mais próxima de p_i do que qualquer outro ponto de P , então, $V(i)$ é a interseção de $N-1$ semi-planos e é uma região poligonal convexa com no máximo $N-1$ lados.

$$V(i) = \bigcap_{i \neq j} H(p_i, p_j)$$

Sendo $V(i)$ denominado de polígono de Voronoi associado a p_i , as N regiões do plano compreendem o diagrama de Voronoi para o conjunto P , representado por $Vor(P)$ (Preparata *et al.*, 1985). Existem diversos algoritmos disponíveis para a geração do diagrama de Voronoi, uma extensa apresentação e avaliação sobre eles pode ser encontrada em Aurenhammer (1991) e Okabe *et al.* (2000).

A precisão dos modelos TIN está diretamente relacionada à qualidade dos pontos amostrais, ou seja, o custo do modelo tem uma relação direta com a confiabilidade das amostras (Maune, 2001). Por exemplo, para representar áreas com grande variação na topografia através de um modelo TIN é necessária a existência de uma maior quantidade de pontos amostrais que em áreas com menos variações de topografia.

Existem diversas aplicações que podem fazer uso de modelos TIN, dentre elas citamos:

- **Geração de Mapas:** tais como, mapas planimétricos, mapas topográficos;
- **Visualização:** geração de superfícies 3D do terreno, através da sobreposição com um plano de textura, por exemplo;
- **Aplicações de Transporte:** utiliza-se modelos TIN no auxílio à elaboração de projetos de estradas, navegação aérea, navegação marítima, utilizando técnicas de análise de perfil e cálculo de volumes;
- **Aplicações Hidrológicas:** em hidrologia podemos destacar o gerenciamento de recursos e morfologia submarina;
- **Aplicações de Engenharia em Geral:** os modelos TIN são utilizados em análises de visibilidade, muito usada por empresas de telecomunicações; mapas de declividade e exposição em previsões de acidentes;
- **Aplicações Militares:** através de *software* de simulação 3D pode-se planejar ataques militares, melhor posicionamento de armas e comunicação, rotas para movimentação, dentre outros.

Uma variedade de citações de aplicações que fazem uso de TIN pode ser encontrada em Maune (2001), Li *et al* (2004), Simões (1993).

Algumas dessas aplicações necessitam constante iteração com os modelos TIN durante sua utilização, assim como armazenamento,

recuperação e renderização. No próximo capítulo veremos quais as possibilidades e estruturas de armazenamento existentes para a persistência de modelos TIN em SGBD.

3 ARMAZENAMENTO DE DADOS ESPACIAIS

O armazenamento de dados espaciais em SGBD dá-se de forma variada. Os modelos TIN são considerados dados espaciais de “dois e meio” dimensões, pois se trata de dados tridimensionais, mas com suporte espacial feito por estruturas bidimensionais.

Neste capítulo analisaremos as soluções adotadas por alguns dos principais modelos de armazenamento de dados espaciais, focando especialmente no armazenamento de TIN.

3.1 Open Geospatial Consortium – OGC

O *Open Geospatial Consortium* – OGC é um consórcio internacional que agrupa empresas, instituições governamentais e acadêmicas com o objetivo de promover interoperabilidade entre sistemas envolvendo informação espacial. O OGC define diversas especificações para padrões de dados espaciais. Podemos dividir as especificações em duas categorias: (a) *especificação abstrata* – define o modelo de geometrias e serviços desconsiderando detalhes de sua implementação; (b) *especificação de implementação* – mostra como os conceitos da especificação abstrata podem ser implementados utilizando tecnologias de desenvolvimento existentes.

A classe abstrata denominada *feature* é utilizada como base do modelo conceitual do OGC. Segundo o OGC (1998a), a *feature* é uma abstração de um fenômeno do mundo real, tornando-se uma feição geográfica quando associada a uma coordenada de posicionamento.

A classe abstrata *feature* tem duas especializações principais *feature with geometry*, que aborda o conceito de geo-objetos, e *coverage*, que aborda o conceito de geo-campos, além da especialização *other feature subtypes* (Figura 3.1).

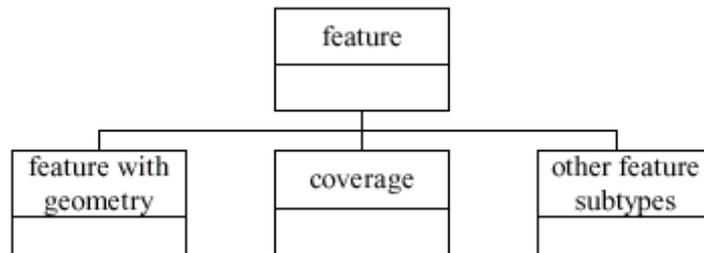


Figura 3.1 – Subtipos de *feature*, adaptado de (OGC, 1998b)

No subtipo *feature with geometry*, que está representado pela classe abstrata *Geometry* (Figura 3.2), encontramos referência ao modelo TIN, que é representado por uma especialização da classe *PolyhedralSurface* denominada *TIN* que está mais detalhada na Figura 3.3.

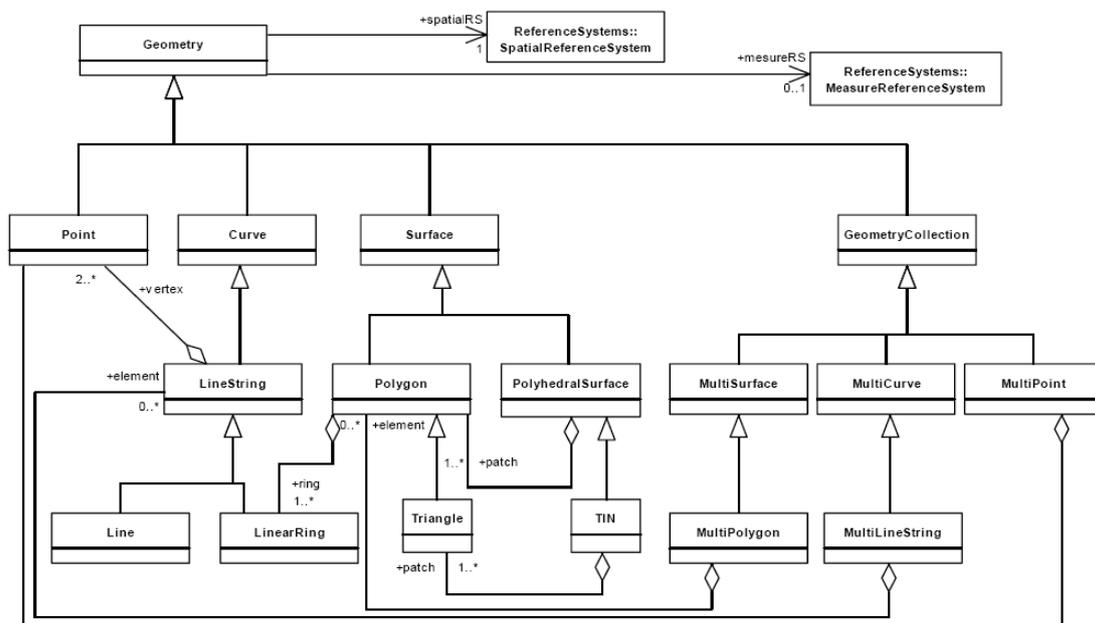


Figura 3.2 – Hierarquia da classe *Geometry* (OGC, 1998a)

A classe *TIN* consiste de um conjunto de uma ou mais instâncias da

classe *Triangle*. A classe *Triangle* é uma especialização da classe *Polygon*, cada *Triangle* é um *Polygon* com três vértices distintos, não colineares e sem bordas internas.

Toda a especificação para a implementação da classe *Geometry* e suas subclasses estão em OGC (1998a).

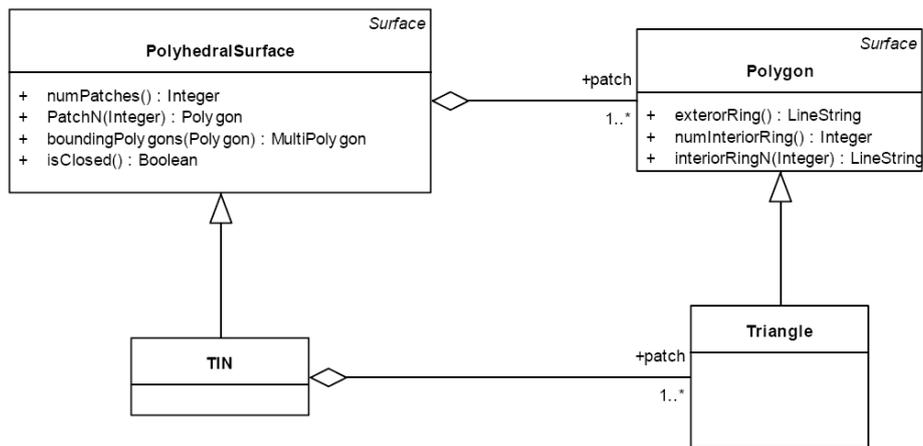


Figura 3.3 – Classe *PolyhedralSurface* (OGC, 1998a)

A classe abstrata *coverage* também se divide em subtipos (Figura 3.4), dentre eles podemos encontrar o tipo que representa os modelos TIN (*TIN Coverage*).

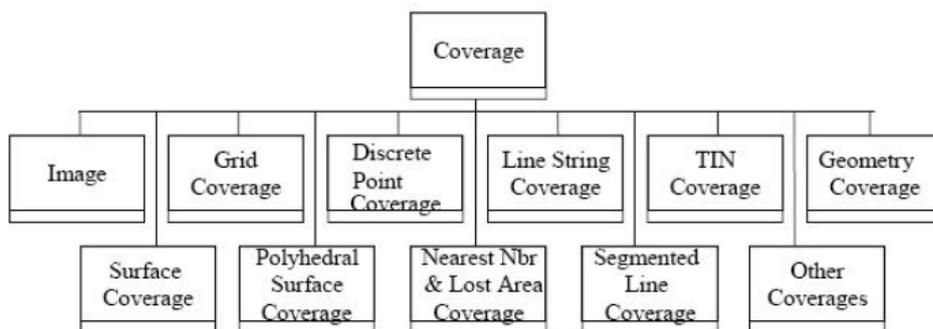


Figura 3.4 – Subtipos de *coverage*, adaptado de (OGC, 1998b)

Em suas especificações de implementação o OGC ainda não contemplou todos os subtipos da classe *coverage*, tendo especificado apenas para o

subtipo *Grid Coverage* (OGC, 2001).

A implementação de modelos de dados espaciais cabe aos sistemas SIG e aos SGBD através de suas extensões espaciais. A seguir apresentaremos alguns exemplos de sistemas que tratam dados espaciais e suas implementações de TIN.

3.2 ArcGIS

O ArcGIS é um sistema de informações geográficas desenvolvido pela *Environmental Systems Research Institute, Inc.* – ESRI. O ArcGIS utiliza um conceito de estrutura de dados nativa denominada *geodatabase* (Figura 3.5), que consiste em uma coleção de dados espaciais contidos em uma pasta de um sistema de arquivos, ou um Banco de Dados Microsoft Access ou um SGBD-R (como Oracle, Microsoft SQL Server, ou IBM DB2).

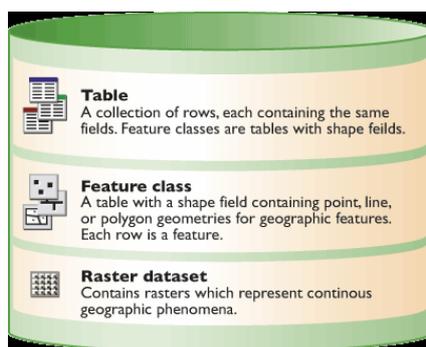


Figura 3.5 – Estrutura de dados *geodatabase* (ESRI, 2007)

O *geodatabase* utiliza três tipos de coleções de dados:

- **Feature Class**: coleção homogênea de objetos geográficos que utilizam mesma representação espacial, e um conjunto comum de atributos, por exemplo, um conjunto de linhas para representar

estradas. As mais comuns representações espaciais da *feature class* são pontos, linhas, polígonos e anotações (Figura 3.6).

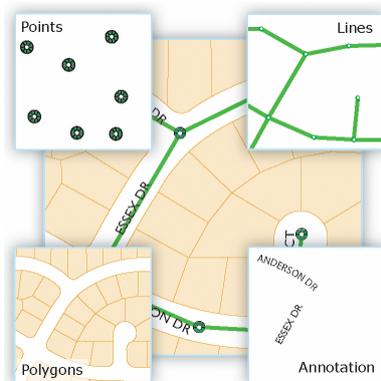


Figura 3.6 – Representações espaciais para *feature class* (ESRI, 2007)

- **Raster:** representa as feições geográficas pela divisão do mundo em espaços discretos retangulares ou quadriláteros, organizados como uma matriz, denominados células. Cada célula possui um valor utilizado para representar alguma característica do local. O *raster* é utilizado para representar imagens, modelos digitais de elevação de terreno e outros fenômenos numéricos.
- **Tables:** os atributos são gerenciados através de tabelas que seguem a teoria dos modelos relacionais de dados. Os tipos de atributos suportados pelo geodatabase são: *numbers*, *text*, *date*, BLOBs e *Global Identifiers* (GlobalID ou GUID), detalhes a respeito de cada tipo podem ser encontrados em (ESRI, 2007).

Além do geodatabase o ArcGIS tem a capacidade de trabalhar com outros formatos de dados, como arquivos CAD (*Computer Aided Design*), arquivos *raster* (TIFF, GeoTIFF), e *Terrains*.

Terrains é um modelo de dados utilizado para representar superfícies,

formado a partir de coleções de dados de múltiplas fontes como dados LIDAR, pontos amostrais, linhas de quebra, dentre outros. Dentro do modelo *Terrains* ficam registradas quais as coleções de dados que serão usadas para gerar sua visualização. O modelo *Terrains* é baseado no modelo TIN e gerado dinamicamente de acordo com a necessidade do usuário (Figura 3.7).

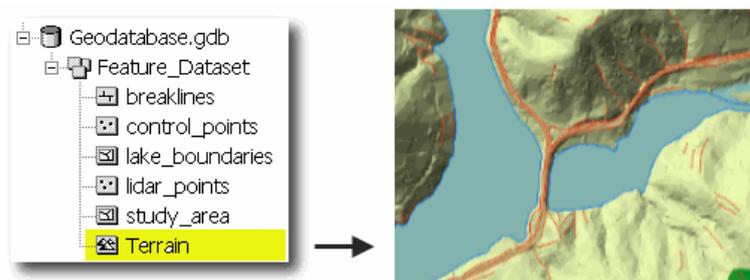


Figura 3.7 – Estrutura de dados *terrains* (ESRI, 2007)

O modelo *Terrains* utiliza o conceito de *terrains pyramid* para trabalhar com múltiplos níveis de detalhamento. Na sua definição o usuário define a quantidade de níveis de detalhamento desejado, tendo no máximo sete níveis. Para cada nível de detalhamento definem-se as coleções de dados que serão visualizadas, e qual a resolução e a faixa de escala para cada nível. Na temos uma visualização em três níveis de detalhamento diferentes de um *terrains*.

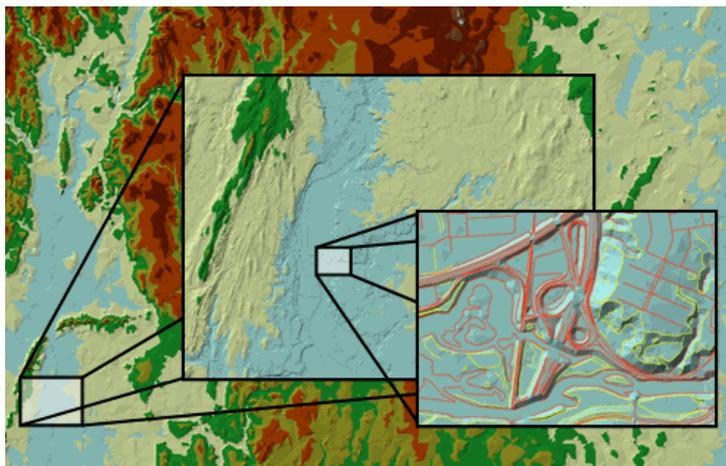


Figura 3.8 – Níveis de detalhe com *terrains pyramid* (ESRI, 2007)

3.3 Oracle Spatial

O *Oracle Spatial* é uma extensão espacial que tem como base o SGBD-OR *Oracle*. Esta extensão é baseada nas especificações de implementações do OGC, onde cada elemento é associado a um tipo de dado espacial primitivo, como ponto, linha ou polígono (com ou sem ilha), como pode ser visto na Figura 3.9.

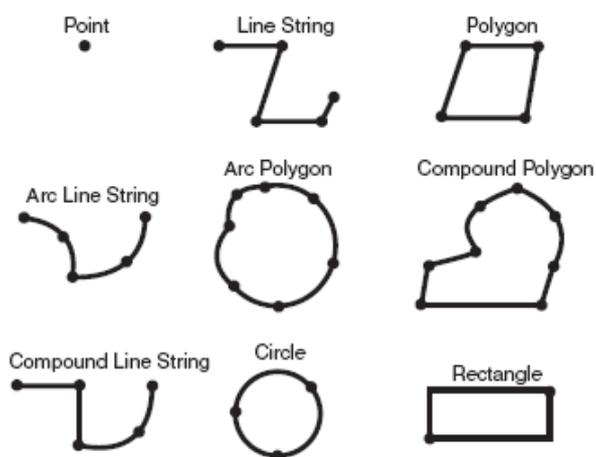


Figura 3.9 – Tipos de dados espaciais primitivos do *Oracle Spatial* (Murray, 2006)

De acordo com Francica (2007) o Oracle Spatial 11g, a próxima versão a ser lançada, trará um novo tipo de dado espacial denominado SDO_TIN.

O SDO_TIN armazenará o modelo TIN gerado e poderá agrupar os dados TIN em pequenos pedaços, que serão acessados através do tipo SDO_Geometry.

3.4 PostGIS

O PostGIS (Ramsey, 2007) é uma extensão para dados espaciais, de código aberto e gratuito, que tem como suporte o SGBD-OR PostgreSQL, desenvolvido pela *Refractions Research Inc.* O PostGIS suporta todos os tipos de dados e funções especificadas pelo OGC. No entanto, a última versão disponibilizada ainda não está em conformidade com a última versão da especificação do OGC, não sendo possível o tratamento de TIN como estrutura de armazenamento.

3.5 Outros Modelos de Armazenamento

Na sessão anterior vimos alguns modelos de armazenamento de dados espaciais em SGBD-OR. A análise dos principais modelos nos mostra que todos adotam como formato base o armazenamento de modelo TIN em estruturas bidimensionais, com armazenamento conjunto da variável de grandeza numérica, por exemplo, altitude. Configurando assim uma estrutura de armazenamento de “dois e meio” dimensões.

Outra abordagem possível para persistência de TIN é o tratamento de estrutura geométrica tridimensional. Em Stoter (2002) é apresentada uma avaliação sobre as possibilidades de armazenamento de dados 3D em SGBD 2D, além de propor tipos de dados espaciais que atendam as

necessidades de consultas espaciais mais complexas.

Zlatanova (2006) examina algumas opções de gerenciamento de dados 3D e aponta como tendência a evolução dos SGBD para SGBD 3D, Isso possibilitaria uma melhora no gerenciamento dos dados 3D, incorporando no SGBD 3D algumas funções básicas, por exemplo, cálculo de volume. Porém, reporta-se ao TIN como ainda sendo armazenado em estrutura bidimensional. Nesse trabalho apenas é considerado o modelo geométrico, não sendo analisado o aspecto topológico do dado.

A necessidade de algumas aplicações como planejamento urbano, monitoramento ambiental e telecomunicações, tem levado a pesquisas na área de armazenamento, processamento e análise de dados 3D. Tais pesquisas apontam a criação de SIG 3D para atender a essas demandas, em (Zlatanova, 2002; Zlatanova *et al.*, 2002) temos um resumo dos avanços em SIG 3D.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho tivemos uma apresentação das principais estruturas de armazenamento de dados espaciais em SGBD, com foco especial na persistência de modelos TIN.

Apresentamos que os modelos TIN são baseados na construção da triangulação proposta por Delaunay e identificamos as principais abordagens aceitas para a construção de TIN baseadas na triangulação de Delaunay. São elas: (a) Triangulação de Delaunay estática baseada em vetores, (b) Triangulação de Delaunay dinâmica baseada em vetores, (c) Triangulação Quase-Delaunay, (d) Triangulação a partir de linhas de eixo médio (*skeletons*) geradas de curvas de nível (isolinhas), e (e) Triangulação de Delaunay via Diagrama de Voronoi.

Mostramos as principais extensões utilizadas pelos SGBD-OR para o armazenamento de dados espaciais e que todos utilizam estruturas bidimensionais para armazenamento de dados TIN, armazenando a terceira dimensão como um dado não-espacial, impossibilitando assim, consultas espaciais mais complexas.

O padrão sugerido pelo OGC apresenta a classe TIN, derivada da classe abstrata *feature*, como um conjunto de triângulos, que são polígonos especiais com apenas três vértices. No entanto, não existe nenhuma implementação disponível para avaliação de sua performance.

O modelo utilizado pelo ArcGIS armazena os dados de diferentes fontes necessários para a construção da triangulação. Através de uma estrutura

denominada *terrain* é criada a triangulação. O ArcGIS trabalha com multi-escala através de uma estratégia denominada *terrain pyramid*, permitindo uma melhor performance na recuperação e visualização dos dados.

Os modelos adotados pela Oracle e pelo PostGIS seguem as especificações do OGC. A próxima versão do Oracle Spatial contemplará uma classe especial para armazenamento de TIN que permitirá o armazenamento de todo o modelo em pequenos blocos, facilitando sua recuperação.

Após esse estudo surgem algumas questões de relevância para o tema. Como comparar e analisar os modelos apresentados? Quais as vantagens de armazenamento em banco de dados? E finalmente, qual a melhor estrutura para persistência e recuperação de modelos TIN em banco de dados?

Para responder a essas questões é necessário se estabelecer testes que permitam avaliar o desempenho no armazenamento e recuperação para os modelos apresentados. Esses testes passam também pela avaliação de técnicas de indexação espacial adequadas para a estrutura de dados adotada. Nesse sentido o modelo do OGC ainda não tem uma implementação disponível, impossibilitando uma avaliação prática.

Para definirmos as vantagens do armazenamento em banco de dados teremos os testes de desempenho, além da possibilidade de utilização de TIN em multi-escala, que pode dinamizar a visualização e análise de

dados TIN. O modelo do ArcGIS traz essa possibilidade, mas necessita de testes comparativos com outras técnicas de multi-escala disponíveis.

Quanto à estrutura mais apropriada temos basicamente três direcionamentos que apontam para a utilização da estrutura de armazenamento baseada em pontos, com geração dinâmica da triangulação; polígonos, adotada pelo OGC; ou mista, adotado pelo ArcGIS. O que nos possibilita análise na relação espaço de armazenamento X eficiência em recuperação e visualização.

Se existe uma tendência em padronização de estrutura de dados para modelos TIN pelas principais extensões espaciais de SGBD, está clara a importância da persistência de TIN em banco de dados. Portanto, isso mostra que a persistência de TIN em SGBD é um assunto viável e atual. As estruturas bidimensionais têm se mostrado capazes de atender as necessidades de armazenamento, mas podem deixar a desejar quando forem implementadas funções de análise espaciais mais complexas. No entanto, a implementação de GIS 3D ainda é uma solução distante. Acreditamos que uma estrutura bidimensional bem definida com o mínimo armazenamento de dados e redundância, uma indexação adequada e técnicas de multi-escala apropriadas venham responder os questionamentos acima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aurenhammer, F. Voronoi diagrams – a survey of a fundamental geometric data structure. **ACM Computer Surveys**, v. 23, n. 3, p. 345–405

Berg, M. d.; Kreveld, M. v.; Overmars, M.; Schwarzkopf, O. **Computational Geometry: Algorithms and Applications**. 2nd. New York: Springer-Verlag, 2000. 367 p.

Bowyer, A. Computing Dirichlet tessellations. **The Computer Journal**, v. 24, n. 2 p. 162–166 Disponível em: <http://comjnl.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/24/2/162>
10.1093/comjnl/24.2.162.

Burrough, P.; McDonnel, R. **Principles of Geographic Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998.

Câmara, G. Representação Computacional de Dados Geográficos. In: Câmara, G.; Davis, C.; Casanova, M. A.; Queiroz, G. R. d. (Ed.). **Bancos de Dados Geográficos**. Curitiba: Editora MundoGEO, 2005.

Christensen, A. H. J. Fitting a triangulation to contour lines. In: Auto-Carto 8: Eighth International Symposium on Computer-Assisted Cartography, 1987 p. 57–67.

ESRI. **ArcGIS 9.2 Desktop Help**. Redlands, CA, 2007. Disponível em: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2>. Acesso em: 10/05/2007.

Francica, J. Oracle Spatial 11g's Enhancements. **Directions Magazine**, 2007. Disponível em: http://www.directionsmag.com/article.php?article_id=2427&trv=1. Acesso em: 10/05/2007.

Goodchild, M. Geographical Information Science. **International Journal of Geographical Information and Analysis**, v. 6, n. 1, p. 31–

Guibas, L.; Stolfi, J. Primitives for the manipulation of general subdivisions and the computational of Voronoi. **ACM Transactions on Graphics**, v. 4, n. 2, p. 74–123

Ilfick, M. H. Contouring by Use of a Triangular Mesh. **Cartographic Journal**, p. 24–28

Li, Z.; Zhu, Q.; Gold, C. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology**. London: Taylor and Francis, 2004.

Little, J. J.; Shi, P. Structural Lines, TINs, and DEMs. **Algorithmica**, v. 30, n. 2, p. 243–263

Mark, D. M. The History of Geographic Information Systems: Invention and Re-Invention of Triangulated Irregular Networks (TINS). In: GIS/LIS '97, 1997, Bethesda, MD. p. 284–289.

Maune, D. F. **Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual**. Bethesda, Md: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2001. ISBSN 1–57083–064–9.

Murray, C. **Oracle Spatial User's Guide and Reference 10g Release 2 (10.2)**. Redwood City: Oracle Corporation, 2006. 594 p.

Namikawa, L. **Um método de ajuste de superfície para grades triangulares considerando linhas características**. Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1995.

OGC. **OpenGIS Simple Features Specification for SQL**. Boston: Open GIS Consortium, 1998a.

____. **The OpenGIS Specification Model: The Coverage Type and Its Subtypes**. Wayland, MA: Open Geospatial Consortium, 1998b. (OpenGIS Project Document Number 98–106R2).

____. **OpenGIS Implementation Specification: Grid Coverage**. Boston: Open Geospatial Consortium, 2001. (OGC Document Number 01–004).

Okabe, A.; Boots, B.; Sugihara, K.; Chiu, S. N. **Spatial tessellations: Concepts and applications of Voronoi diagrams**. 2nd. New York: Wiley, 2000. 671 p.

Preparata, F.; Shamos, M. **Computational Geometry**. New York: Springer-Verlag, 1985. 398 p.

Ramsey, P. **PostGIS Manual**. Victoria, Canadá: 2007. Disponível em: <http://postgis.refractory.net/docs/postgis.pdf>. Acesso em: 10/05/2007.

Rezende, P. J. d.; Stolfi, J. Fundamentos da Geometria Computacional. In: IX Escola de Computação, 1994, Recife, Brasil.

Sibson, R. Locally Equiangular Triangulations. **The Computer Journal**, v. 21, p. 243–245

Simões, M. G. **Modeladores Digitais de Terreno em Sistemas de Informação Geográfica**. 168 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação (COPPE/UFRJ) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

Stoter, J.; van Oosterom, P. Incorporating 3D geo-objects into a 2D geo-DBMS. In: ACSM/ASPRS, 2002, Washington DC, USA. p. 19–26.

Watson, D. F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes. **The Computer Journal**, v. 24, n. 2 p. 167–172 Disponível em: <http://comjnl.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/24/2/167>. 10.1093/comjnl/24.2.167.

Zlatanova, S., 2002, **Advances in 3D GIS**, Disegno Digitale e Design, p. 24–29.

____. **3D geometries in spatial DBMS**. Delft University of Technology, 2006.

Zlatanova, S.; Rahman, A. A.; Pilouk, M. Trends in 3D GIS Development. **Journal of Geospatial Engineering**, v. 4, n. 2, p. 71–80