



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-10506-RPQ/249

INTRODUÇÃO À CIÊNCIA DA GEOINFORMAÇÃO

Editado e organizado por

Gilberto Câmara

Clodoveu Davis

Antônio Miguel Vieira Monteiro

INTRODUÇÃO

Gilberto Câmara

Clodoveu Davis

1.1 POR QUE GEOPROCESSAMENTO ?

A coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foi uma parte importante das atividades das sociedades organizadas. Até recentemente, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel; isto impedia uma análise que combinasse diversos mapas e dados. Com o desenvolvimento simultâneo, na segunda metade deste século, da tecnologia de Informática, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento.

Nesse contexto, o termo *Geoprocessamento* denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional. As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de *Sistemas de Informação Geográfica (GIS¹)*, permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados geo-referenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos.

Pode-se dizer, de forma genérica, “*Se onde é importante para seu negócio, então Geoprocessamento é sua ferramenta de trabalho*”. Sempre que o **onde** aparece, dentre as questões e problemas que precisam ser resolvidos por um sistema informatizado, haverá uma oportunidade para considerar a adoção de um SIG.

Num país de dimensão continental como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais, o Geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente.

¹ No decorrer deste texto, utilizaremos a sigla GIS (do inglês *Geographic Information System*) para nos referir aos sistemas de informação geográfica, pelo uso consagrado deste jargão em nosso meio.

1.2 BREVE HISTÓRICO DO GEOPROCESSAMENTO

1.2.1 EVOLUÇÃO INTERNACIONAL

As primeiras tentativas de automatizar parte do processamento de dados com características espaciais aconteceram na Inglaterra e nos Estados Unidos, nos anos 50, com o objetivo principal de reduzir os custos de produção e manutenção de mapas. Dada a precariedade da informática na época, e a especificidade das aplicações desenvolvidas (pesquisa em botânica, na Inglaterra, e estudos de volume de tráfego, nos Estados Unidos), estes sistemas ainda não podem ser classificados como “sistemas de informação”.

Os primeiros Sistemas de Informação Geográfica surgiram na década de 60, no Canadá, como parte de um programa governamental para criar um inventário de recursos naturais. Estes sistemas, no entanto, eram muito difíceis de usar: não existiam monitores gráficos de alta resolução, os computadores necessários eram excessivamente caros, e a mão de obra tinha que ser altamente especializada e caríssima. Não existiam soluções comerciais prontas para uso, e cada interessado precisava desenvolver seus próprios programas, o que demandava muito tempo e, naturalmente, muito dinheiro.

Além disto, a capacidade de armazenamento e a velocidade de processamento eram muito baixas. Ao longo dos anos 70 foram desenvolvidos novos e mais acessíveis recursos de hardware, tornando viável o desenvolvimento de sistemas comerciais. Foi então que a expressão *Geographic Information System* foi criada. Foi também nesta época que começaram a surgir os primeiros sistemas comerciais de CAD (Computer Aided Design, ou projeto assistido por computador), que melhoraram em muito as condições para a produção de desenhos e plantas para engenharia, e serviram de base para os primeiros sistemas de cartografia automatizada. Também nos anos 70 foram desenvolvidos alguns fundamentos matemáticos voltados para a cartografia, incluindo questões de geometria computacional. No entanto, devido aos custos e ao fato destes proto-sistemas ainda utilizarem exclusivamente computadores de grande porte, apenas grandes organizações tinham acesso à tecnologia.

A década de 80 representa o momento quando a tecnologia de sistemas de informação geográfica inicia um período de acelerado crescimento que dura até os dias de hoje. Até então limitados pelo alto custo do hardware e pela pouca quantidade de pesquisa específica sobre o tema, os GIS se beneficiaram grandemente da massificação causada pelos avanços da microinformática e do estabelecimento de centros de estudos sobre o assunto. Nos EUA, a criação dos centros de pesquisa que formam o NCGIA - National Centre for Geographical Information and Analysis (NCGIA, 1989) marca o estabelecimento do Geoprocessamento como disciplina científica independente.

No decorrer dos anos 80, com a grande popularização e barateamento das estações de trabalho gráficas, além do surgimento e evolução dos computadores pessoais e dos sistemas gerenciadores de bancos de dados relacionais, ocorreu uma grande difusão do uso de GIS. A incorporação de muitas funções de análise espacial proporcionou também um alargamento do leque de aplicações de GIS. Na década atual, observa-se um grande crescimento do ritmo de penetração do GIS nas organizações, sempre alavancado pelos custos decrescentes do hardware e do software, e também pelo surgimento de alternativas menos custosas para a construção de bases de dados geográficas.

1.2.2 DESENVOLVIMENTOS NO BRASIL

A introdução do Geoprocessamento no Brasil inicia-se a partir do esforço de divulgação e formação de pessoal feito pelo prof. Jorge Xavier da Silva (UFRJ), no início dos anos 80. A vinda ao Brasil, em 1982, do Dr. Roger Tomlinson, responsável pela criação do primeiro SIG (o Canadian Geographical Information System), incentivou o aparecimento de vários grupos interessados em desenvolver tecnologia, entre os quais podemos citar:

- UFRJ: O grupo do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geografia da UFRJ, sob a orientação do professor Jorge Xavier, desenvolveu o SAGA (Sistema de Análise Geo-Ambiental). O SAGA tem seu forte na capacidade de análise geográfica e vem sendo utilizado com sucesso com veículo de estudos e pesquisas.
- MaxiDATA: os então responsáveis pelo setor de informática da empresa de aerolevante AeroSul criaram, em meados dos anos 80, um sistema para automatização de processos cartográficos. Posteriormente, constituíram empresa MaxiDATA e lançaram o MaxiCAD, software largamente utilizado no Brasil, principalmente em aplicações de Mapeamento por Computador. Mais recentemente, o produto dbMapa permitiu a junção de bancos de dados relacionais a arquivos gráficos MaxiCAD, produzindo uma solução para "desktop mapping" para aplicações cadastrais.
- CPqD/TELEBRÁS: O Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRÁS iniciou, em 1990, o desenvolvimento do SAGRE (Sistema Automatizado de Gerência da Rede Externa), uma extensiva aplicação de Geoprocessamento no setor de telefonia. Construído com base num ambiente de um SIG (VISION) com um banco de dados cliente-servidor (ORACLE), o SAGRE envolve um significativo desenvolvimento e personalização de software.

- INPE: Em 1984, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) estabeleceu um grupo específico para o desenvolvimento de tecnologia de geoprocessamento e sensoriamento remoto (a Divisão de Processamento de Imagens - DPI). De 1984 a 1990 a DPI desenvolveu o SITIM (Sistema de Tratamento de Imagens) e o SGI (Sistema de Informações Geográficas), para ambiente PC/DOS, e, a partir de 1991, o SPRING (Sistema para Processamento de Informações Geográficas), para ambientes UNIX e MS/Windows.

O SITIM/SGI foi suporte de um conjunto significativo de projetos ambientais, podendo-se citar: (a) o levantamento dos remanescentes da Mata Atlântica Brasileira (cerca de 100 cartas), desenvolvido pela IMAGEM Sensoriamento Remoto, sob contrato do SOS Mata Atlântica; (b) a cartografia fito-ecológica de Fernando de Noronha, realizada pelo NMA/EMBRAPA; (c) o mapeamento das áreas de risco para plantio para toda a Região Sul do Brasil, para as culturas de milho, trigo e soja, realizado pelo CPAC/EMBRAPA; (d) o estudo das características geológicas da bacia do Recôncavo, através da integração de dados geofísicos, altimétricos e de sensoriamento remoto, conduzido pelo CENPES/Petrobrás. Assad e Sano (1998) apresentam um conjunto significativo de resultados do SITIM/SGI na área agrícola.

O SPRING unifica o tratamento de imagens de Sensoriamento Remoto (ópticas e microondas), mapas temáticos, mapas cadastrais, redes e modelos numéricos de terreno. A partir de 1997, o SPRING passou a ser distribuído via Internet e pode ser obtido através do website <http://www.dpi.inpe.br/spring>.

1.3 REFERÊNCIAS ADICIONAIS

O objetivo deste trabalho é apresentar ao leitor uma visão focada nos problemas de análise espacial, que sirva de motivação para estudos e pesquisas avançadas. Em particular, recomenda-se a leitura do livro de Burrough (1998), por causa de seu excelente tratamento da questão de análise espacial e o livro de Assad e Sano (1993), por sua apresentação muito didática de exemplos reais. Para os mais versados na área de informática, recomenda-se fortemente os textos de Worboys (1995) e de Câmara et al. (1996). Finalmente, a coletânea de Maguire, Goodchild e Rhind (1991) é um livro de referência, sempre útil para consulta sobre questões específicas

BIBLIOGRAFIA

- ARONOFF, S. *Geographical Information Systems: A Management Perspective*. Ottawa, WDI Publications, 1989.
- ASSAD, E.D.; SANO, E.E. *Sistemas de Informações Geográficas - Aplicações na Agricultura*. Brasília, EMBRAPA, 1998 (2z. edição).
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. *Principles of geographical information systems*. Oxford, Oxford University Press, 1998.
- CÂMARA, G.; CASANOVA, M.A.; HEMERLY, A.; MEDEIROS, C.M.B.; MAGALHÃES, G. *Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica*. SBC, X Escola de Computação, Campinas, 1996.
- CÂMARA, G.; FREITAS, U.M.; SOUZA, R.C.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-Oriented Data Modelling. *Computers and Graphics*, vol. 15, n.6, July 1996.
- COWEN, D.J. GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54:1551-4, 1988.
- MAGUIRE, D. An Overview and Definition of GIS. In: Maguire, D.; Goodchild, M.; Rhind, D. (eds) *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. New York, John Wiley and Sons, 1991, pp. 9-20.
- MAGUIRE, D.; GOODCHILD, M.; RHIND, D. (eds.) *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. New York, John Wiley and Sons, 1991.
- NCGIA, The Research Plan for the NCGIA, *International Journal of Geographic Information Systems*, 3(2):117-136, 1989.
- TUFTE, E.R.. *The Visual Display of Quantitative Information*. Cheshire, USA, Graphics Press, 1983.
- WORBOYS, M.F. *GIS: A Computing Perspective*. London, Taylor and Francis, 1995.

CONCEITOS BÁSICOS EM CIÊNCIA DA GEOINFORMAÇÃO

Gilberto Câmara¹
Antônio Miguel Vieira Monteiro

2.1 INTRODUÇÃO

Trabalhar com geoinformação significa, antes de mais nada, utilizar computadores como instrumentos de representação de dados espacialmente referenciados. Deste modo, o problema fundamental da Ciência da Geoinformação é o estudo e a implementação de diferentes formas de representação computacional do espaço geográfico.

É costume dizer-se que Geoprocessamento é uma *tecnologia interdisciplinar*, que permite a convergência de diferentes disciplinas científicas para o estudo de fenômenos ambientais e urbanos. Ou ainda, que “o espaço é uma linguagem comum” para as diferentes disciplinas do conhecimento.

Apesar de aplicáveis, estas noções escondem um problema conceitual: a pretensa interdisciplinaridade dos SIGs é obtida pela *redução* dos conceitos de cada disciplina a *algoritmos* e *estruturas de dados* utilizados para armazenamento e tratamento dos dados geográficos. Considere-se, a título de ilustração, alguns problemas típicos:

- Um sociólogo deseja utilizar um SIG para entender e quantificar o fenômeno da *exclusão social* numa grande cidade brasileira.
- Um ecólogo usa o SIG com o objetivo de compreender os remanescentes florestais da Mata Atlântica, através do conceito de *fragmento* típico de Ecologia da Paisagem.
- Um geólogo pretende usar um SIG para determinar a *distribuição* de um mineral numa área de prospecção, a partir de um conjunto de amostras de campo.

¹ Com a colaboração de Cláudio Clemente Faria Barbosa, Clodoveu Davis e Frederico Fonseca.

O que há de comum em todos os casos acima? Para começar, cada especialista lida com conceitos de sua disciplina (*exclusão social, fragmentos, distribuição mineral*). Para utilizar um SIG, é preciso que cada especialista transforme conceitos de sua disciplina em representações computacionais. Após esta tradução, torna-se viável compartilhar os dados de estudo com outros especialistas (eventualmente de disciplinas diferentes). Em outras palavras, quando falamos que o espaço é uma linguagem comum no uso de SIG, estamos nos referindo ao *espaço computacionalmente representado* e não aos conceitos abstratos de *espaço geográfico*.

Do ponto de vista da aplicação, utilizar um SIG implica em escolher as representações computacionais mais adequadas para capturar a semântica de seu domínio de aplicação. Do ponto de vista da tecnologia, desenvolver um SIG significa oferecer o conjunto mais amplo possível de estruturas de dados e algoritmos capazes de representar a grande diversidade de concepções do espaço.

Nesta perspectiva, este capítulo examina os problemas básicos de representação computacional de dados geográficos. Os conceitos apresentados visam esclarecer as questões básicas do Geoprocessamento: *Como representar, em computadores, os dados geográficos? Como as estruturas de dados geométricas e alfanuméricas se relacionam com os dados do mundo real? Que alternativas de representação computacional existem para dados geográficos?*

Para simplificar a discussão, lidaremos neste capítulo com dados individuais (cada mapa considerado em separado dos demais dados). No próximo capítulo (*Modelagem de Dados em Geoprocessamento*) estaremos considerando o problema de modelar uma aplicação complexa, incluindo os relacionamentos entre os diferentes tipos de dados.

2.2 TRADUZINDO A INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA PARA O COMPUTADOR

Para abordar o problema fundamental do Ciência da Geoinformação (o entendimento das representações computacionais do espaço), estaremos utilizando, neste e em outros capítulos do livro, um arcabouço conceitual para entender o processo traduzir o mundo real para o ambiente computacional: o “paradigma dos quatro universos” (Gomes e Velho, 1995), que distingue:

- o universo do *mundo real*, que inclui as entidades da realidade a serem modeladas no sistema;
- o universo *matemático (conceitual)*, que inclui uma definição matemática (formal) das entidades a ser representadas;

- o universo de *representação*, onde as diversas entidades formais são mapeadas para representações geométricas e alfanuméricas no computador;
- o universo de *implementação*, onde as estruturas de dados e algoritmos são escolhidos, baseados em considerações como desempenho, capacidade do equipamento e tamanho da massa de dados. É neste nível que acontece a codificação.

Esta visão deste paradigma está ilustrada na Figura 2.1.

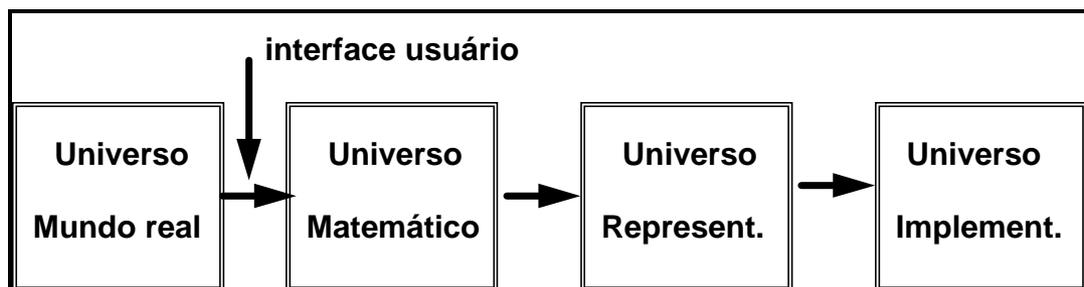


Figura 2.1 - Paradigma dos quatro universos.

A visão apresentada não se limita a sistemas de Geoprocessamento, mas representa uma perspectiva unificadora aos problemas de Computação Gráfica e Processamento de Imagens. Sua aplicação ao problema de Geoprocessamento é particularmente apropriada pois permite equacionar os problemas da área, como se pode constatar:

- no universo do *mundo real* encontram-se os fenômenos a serem representados (tipos de solo, cadastro urbano e rural, dados geofísicos e topográficos);
- no universo *conceitual (matemático)* pode-se distinguir entre as grandes classes formais de dados geográficos (*dados contínuos* e *objetos individualizáveis*) e especializar estas classes nos tipos de dados geográficos utilizados comumente (dados temáticos e cadastrais, modelos numéricos de terreno, dados de sensoriamento remoto);
- no universo de *representação* as entidades formais definidas no universo conceitual são associadas a diferentes representações geométricas, que podem variar conforme a escala e a projeção cartográfica escolhida e a época de aquisição do dado. aqui se distingue entre as representações matricial e vetorial, que podem ainda ser especializadas;
- o universo de *implementação* é onde ocorre a realização do modelo de dados através de linguagens de programação. Neste universo, escolhem-se

as estruturas de dados (tais como árvores quaternárias e árvores-R) para implementar as geometrias do universo de representação;

Com base nesta visão, as dicotomias tradicionais de Geoprocessamento (campos-objetos e matricial-vetorial) podem ser resolvidas, mostrando-se que elas se encontram *em níveis distintos de abstração*.

Esta análise também indica que a interface de usuário de um SIG deve, tanto quanto possível, refletir o universo conceitual e esconder detalhes dos universos de representação e implementação. No nível conceitual, o usuário lida com conceitos mais próximos de sua realidade e minimiza a complexidade envolvida nos diferentes tipos de representação geométrica.

2.3 O UNIVERSO DO MUNDO REAL

2.3.1 SISTEMAS DE MEDIDA E DE REFERÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL

Um aspecto central no uso da tecnologia de Geoprocessamento advém da característica lógico-matemática de sistemas de informação; para ser representada em ambiente computacional, temos de associar a cada tipo de informação geográfica uma escala de medida e de referência, que será utilizada pelo GIS para caracterizá-lo.

A visão mais aplicada em Geoprocessamento utiliza uma escala de mensuração que permite associar grandezas numéricas a cada objeto a ser representado computacional. Esta visão deriva do conceito "representacionalista" proposto pelo filósofo Bertrand Russel: as propriedades não são intrínsecas aos objetos, mas são obtidas a partir de medidas. Assim, a representação de um objeto geográfico num GIS dependerá da escala que utilizarmos.

As regras de medida podem ir desde a simples atribuição do valor 0 ou 1 para as amostras (0 = seco, 1 = úmido), até um conjunto de valores extraídos dos números reais (23.3°C, 24.5°C, 28.1°C,....). A regra usada no processo de medição determina o seu nível, e cada nível de medida descreve a entidade de estudo com um determinado grau de detalhe, que varia de informações qualitativas até informações quantitativas. Como a forma de se medir as variáveis do mundo real afeta seus modos de manipulação, é essencial que o nível de medida utilizado seja incorporado a um conjunto de observações.

A referência histórica mais importante sobre os sistemas de medidas aplicados em GIS é o trabalho de Stevens (1951), em que esse autor propõe quatro escalas de mensuração: *nominal, ordinal, intervalo e razão*. Os dois primeiros níveis

são *temáticos*, pois a cada medida é atribuído um número ou nome associando a observação a um tema ou classe. Quando um valor numérico é usado nos níveis de medidas *temáticos*, este valor serve somente como um identificador para nomear ou classificar aquela amostra da variável (1 = latossolo, 2 = podzólico, ...), não podendo portanto ser usado em expressões matemáticas, pois são valores qualitativos e não quantitativos.

A regra para o nível de medida *nominal* baseia-se na diferenciação entre os objetos segundo classes distintas. Como exemplos de classes usadas em medidas nominais tem-se: classes de solo, classes de rocha, classes de cobertura vegetal. Uma característica comum dos níveis binário e nominal é que a classificação dos eventos é feita sem nenhuma ordem inerente e serve apenas para diferenciá-los.

O nível de medida *ordinal* atribui valores ou nomes para as amostras, mas gera um conjunto ordenado de classes, baseado em critérios como tamanho (maior do que, menor do que), altura (1 = baixo, 2 = médio, 3 = alto), etc. Dados temáticos de classes de drenagem e de erosão, são exemplos de variáveis medidas no nível ordinal.

Uma característica importante dos níveis de medidas temáticas, é que elas não determinam magnitude. Quando o estudo necessita de uma descrição mais detalhada, que permita comparar intervalo e ordem de grandeza entre eventos, recorre-se aos níveis de medidas denominados de *numéricos*, onde as regras de atribuição de valores baseiam-se em uma escala de números reais.

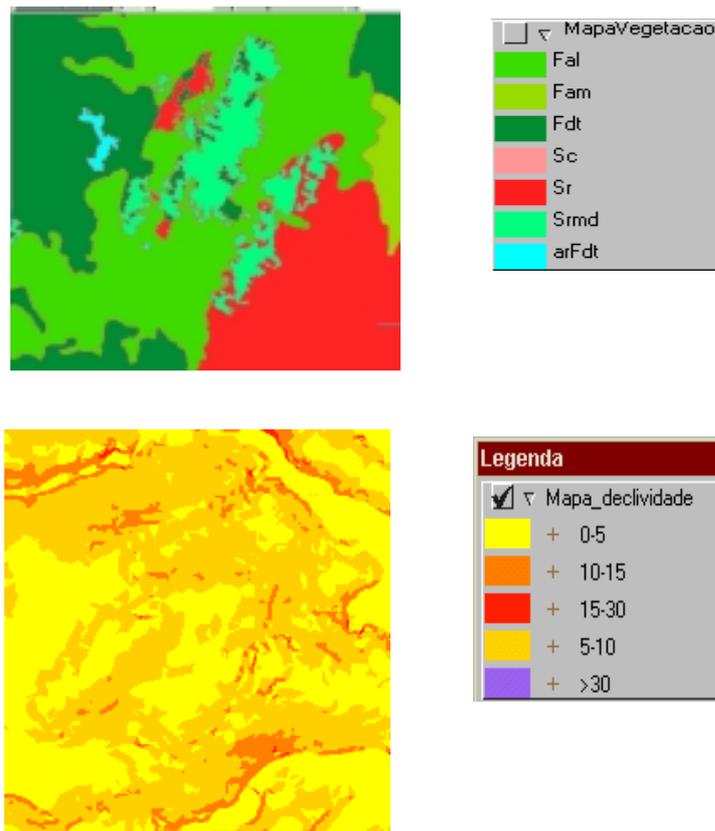


Figura 2.2 - Exemplos de medida nominal (mapa de vegetação) e medida ordinal (mapa de classes de declividade).

Existem dois níveis de medidas baseados em escala de números reais: *o nível por intervalo e o nível por razão*. No nível de medida por intervalo o ponto de referência zero é definido de forma arbitrária, permitindo a atribuição de valores negativos, e positivos $[-\infty, 0, +\infty]$, para as amostras. O equador e o meridiano de Greenwich, usados com referência na determinação de posições sobre a superfície da Terra é um exemplos de referência zero arbitrária e a localização geográfica em latitude/longitude é exemplos de variáveis descritas no nível de medida por intervalo. Por ter um ponto de referência zero arbitrária, valores medidos no nível por intervalo não podem ser usados para estimar proporções.

No nível de medida por *razão* o ponto de referência zero não é arbitrário, mas determinado por alguma condição natural. Por exemplo, na descrição de atributos como o peso, a distância entre dois pontos, a área e o volume de objetos, não faz sentido físico valores negativos, sendo a ausência destes atributos o ponto de origem zero na escala de medida correspondente. No caso de temperatura, a condição natural é o ponto de repouso dos átomos da matéria, a partir do qual não se consegue

temperaturas menores. Este ponto é o zero absoluto para temperatura, zero graus Kelvin. Por ter como referência um ponto de zero absoluto, as medidas feitas no nível de medida por razão permitem estimar proporções e podem ser usadas em operações de multiplicação, divisão e subtração entre amostras.

As medidas temáticas e as numéricas por intervalo não devem ser usadas diretamente em expressões matemáticas. Entretanto, na prática, os modelos ambientais combinam valores por razão com valores por intervalo. Nestes casos, parâmetros devem ser incluídos para permitir a conversão de valores medidos no nível por intervalo para o nível por razão, em unidades apropriadas.

2.4 TIPOS DE DADOS EM GEOPROCESSAMENTO

2.4.1 DADOS TEMÁTICOS

Dados temáticos descrevem a distribuição espacial de uma grandeza geográfica, expressa de forma qualitativa, como os mapas de pedologia e a aptidão agrícola de uma região. Estes dados, obtidos a partir de levantamento de campo, são inseridos no sistema por digitalização ou, de forma mais automatizada, a partir de classificação de imagens. Os dados apresentados na figura 2.2 (mapa de vegetação e mapa de declividade) são exemplos de dados temáticos.

2.4.2 DADOS CADASTRAIS

Um dado cadastral distingue-se de um temático, pois cada um de seus elementos é um *objeto geográfico*, que possui atributos e pode estar associado a várias representações gráficas. Por exemplo, os lotes de uma cidade são elementos do espaço geográfico que possuem atributos (dono, localização, valor venal, IPTU devido, etc.) e que podem ter representações gráficas diferentes em mapas de escalas distintas. Os atributos estão armazenados num sistema gerenciador de banco de dados.

A Figura 2.3 mostra um exemplo de dado cadastral da América do Sul, onde os países possuem atributos não-gráficos (PIB e população).

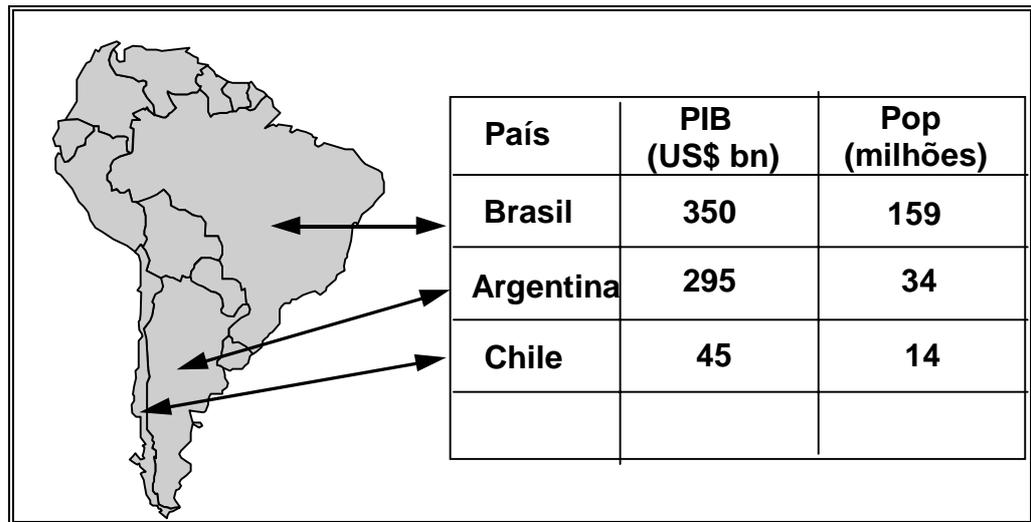


Figura 2.3 - Exemplo de dado cadastral (países da América do Sul).

2.4.3 REDES

Em Geoprocessamento, o conceito de "rede" denota as informações associadas a:

- Serviços de utilidade pública, como água, luz e telefone;
- Redes de drenagem (bacias hidrográficas);
- Rodovias.

No caso de redes, cada objeto geográfico (e.g: cabo telefônico, transformador de rede elétrica, cano de água) possui uma *localização geográfica exata* e está sempre associado a atributos descritivos presentes no banco de dados.

As informações gráficas de redes são armazenadas em coordenadas vetoriais, com *topologia arco-nó*: os atributos de arcos incluem o sentido de fluxo e os atributos dos nós sua impedância (custo de percorrimento). A topologia de redes constitui um *grafo*, que armazena informações sobre recursos que fluem entre localizações geográficas distintas, como ilustra a Figura 2.4.

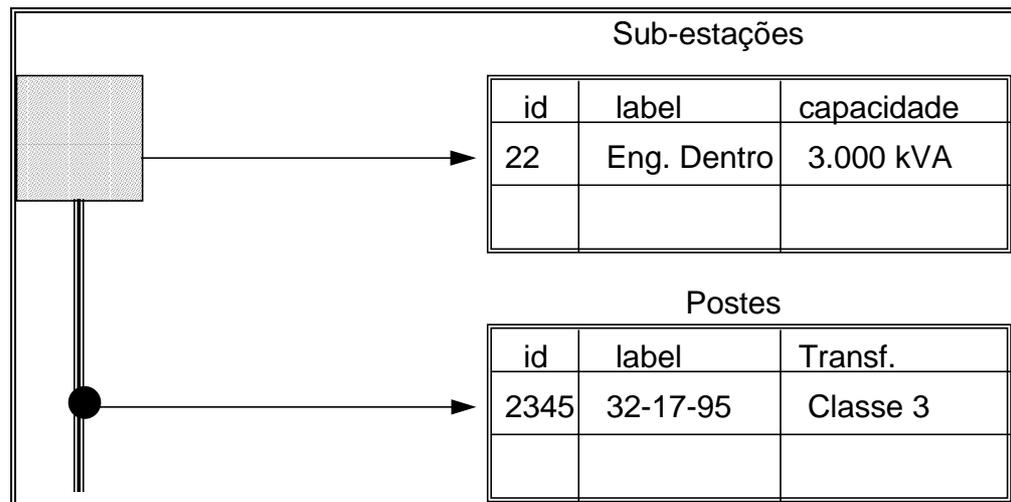


Figura 2.4 - Elementos de Rede.

Como observa Goodchild (1992b), uma rede é um sistema de endereçamento 1-D embutido no espaço 2-D. Para citar um exemplo, tome-se uma rede elétrica, que tem, entre outros, os componentes: postes, transformadores, sub-estações, linhas de transmissão e chaves. As linhas de transmissão serão representadas topologicamente como os arcos de um grafo orientado, estando as demais informações concentradas em seus nós. Note-se que os algoritmos de cálculo de propriedades da rede podem, em sua grande maioria, ser resolvidos apenas com a topologia da rede e de seus atributos.

2.4.4 MODELOS NUMÉRICOS DE TERRENO

O termo *modelo numérico de terreno* (ou MNT) é utilizado para denotar a representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço. Comumente associados à altimetria, também podem ser utilizados para modelar unidades geológicas, como teor de minerais, ou propriedades do solo ou subsolo, como aeromagnetismo.

Entre os usos de modelos numéricos de terreno, pode-se citar (Burrough, 1986):

- (a) Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- (b) Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens;
- (c) Cômputo de mapas de declividade e exposição para apoio a análises de geomorfologia e erodibilidade;

- (d) Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- (e) Apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

Um MNT pode ser definido como um modelo matemático que reproduz uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de pontos (x, y) , em um referencial qualquer, com atributos denotados de z , que descrevem a variação contínua da superfície. Um exemplo de MNT é apresentado na figura 2.5.

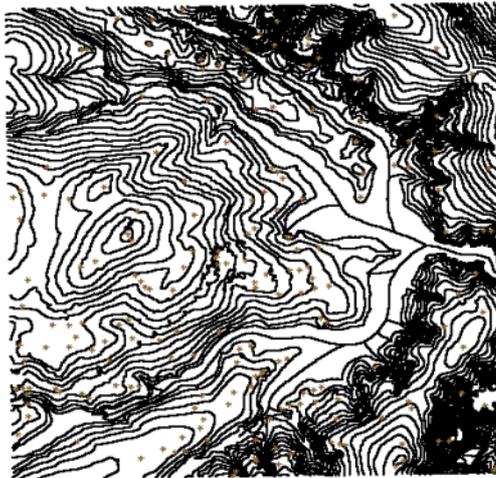


Figura 2.5 - Exemplo de modelo numérico de terreno (isolinhas de topografia).

2.4.5 IMAGENS

Obtidas por satélites, fotografias aéreas ou "scanners" aerotransportados, as imagens representam formas de captura indireta de informação espacial. Armazenadas como matrizes, cada elemento de imagem (denominado "pixel") tem um valor proporcional à energia eletromagnética refletida ou emitida pela área da superfície terrestre correspondente. A Figura 2.6 mostra uma composição colorida falsa cor das bandas 3 (associada a cor Azul), 4 (Verde) e 5 (Vermelha) do satélite TM-Landsat, para a região de Manaus (AM).

Pela natureza do processo de aquisição de imagens, os objetos geográficos estão contidos na imagem, sendo necessário recorrer a técnicas de fotointerpretação e de classificação para individualizá-los.

Características importantes de imagens de satélite são: o número e a largura de bandas do espectro eletromagnético imageadas (*resolução espectral*), a menor área da superfície terrestre observada instantaneamente por cada sensor (*resolução espacial*), o nível de quantização registrado pelo sistema sensor (*resolução radiométrica*) e o intervalo entre duas passagens do satélite pelo mesmo ponto (*resolução temporal*).

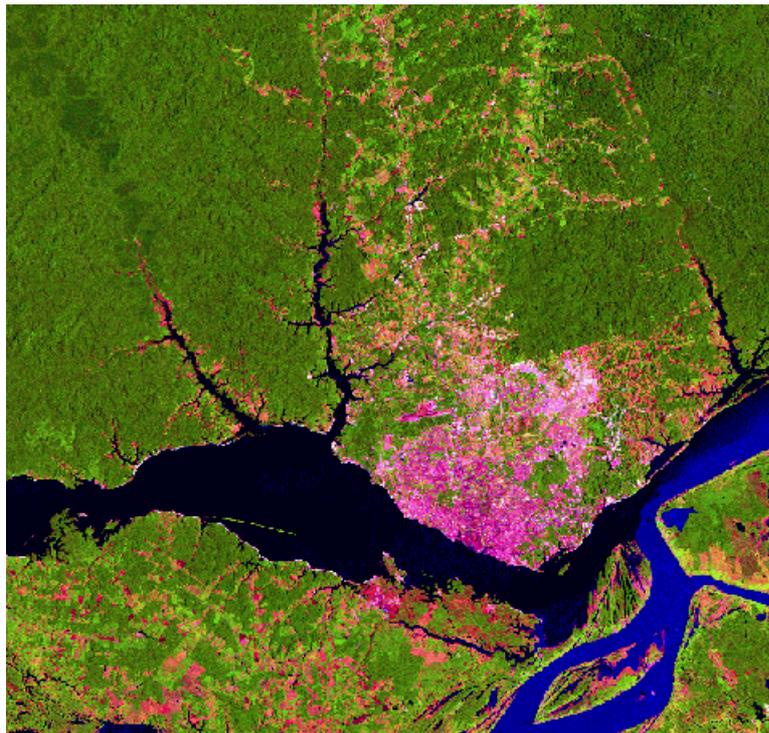


Figura 2.6 - Exemplo de Imagem (composição colorida TM/VIIRS para a região de Manaus).

2.5 O UNIVERSO CONCEITUAL

2.5.1 VISÃO GERAL

Em Geoprocessamento, o espaço geográfico é modelado segundo duas visões complementares: os modelos de *campos* e *objetos* (Worboys, 1995). O modelo de campos enxerga o espaço geográfico como uma superfície contínua, sobre a qual variam os fenômenos a serem observados segundo diferentes distribuições. Por exemplo, um mapa de vegetação descreve uma distribuição que associa a cada ponto do mapa um tipo específico de cobertura vegetal, enquanto um mapa geoquímico associa o teor de um mineral a cada ponto.

O modelo de objetos representa o espaço geográfico como uma coleção de entidades distintas e identificáveis. Por exemplo, um cadastro espacial dos lotes de um município identifica cada lote como um dado individual, com atributos que o distinguem dos demais. Igualmente, poder-se-ia pensar como geo-objetos os rios de uma bacia hidrográfica ou os aeroportos de um estado.

Para definir o modelo, seguir-se-ão os seguintes passos:

1. definir as classes básicas do modelo e estabelecer as suas relações, dentro dos princípios de especialização, generalização e agregação;
2. estabelecer como é possível, a partir do modelo, definir um esquema conceitual para um banco de dados geográfico, por especialização das classes básicas.

2.5.2 REGIÃO GEOGRÁFICA

Definição 2.1. Região Geográfica.

Define-se uma *região geográfica* R como uma superfície qualquer pertencente ao espaço geográfico, que pode ser representada num plano ou reticulado, dependente de uma projeção cartográfica.

A região geográfica serve de suporte geométrico para localização de entidades geográficas, pois toda entidade geográfica será representada por um ponto ou um conjunto de pontos em R . A definição de região geográfica proposta não restringe a escolha da representação geométrica (matricial ou vetorial) associada aos objetos geográficos.

2.5.3 GEO-CAMPOS

Definição 2.2. Geo-Campo.

Um geo-campo representa a distribuição espacial de uma variável que possui valores em todos os pontos pertencentes a uma região geográfica, *num dado tempo t*.

Múltiplas representações de um mesmo *geo-campo* podem significar a variação de uma dada variável no tempo t_1, t_2, \dots, t_{N-1} . Desta maneira torna-se possível representar as diferentes cronologias de alguns temas, tais como as mudanças no uso e cobertura do solo, a sazonalidade da vegetação ou a dinâmica das variáveis climáticas.

Os geo-campos podem ser especializados em:

- TEMÁTICO - dada uma região geográfica R , um *geo-campo temático* associa a cada ponto do espaço um *tema* de um mapa (p.ex. um geo-campo de vegetação é caracterizado pelo conjunto de temas {floresta densa, floresta aberta, cerrado, ...});
- NUMÉRICO - dada uma região geográfica, um *geo-campo numérico* associa, a cada ponto do espaço, um valor real (p. ex. um mapa de campo magnético ou mapa de altimetria);
- DADO_SENSOR_REMOTO - esta classe é uma especialização de NUMÉRICO, obtida através de discretização da resposta recebida por um sensor (passivo ou ativo) de uma área da superfície terrestre.

A Figura 2.7, apresenta um exemplo de geo-campos.

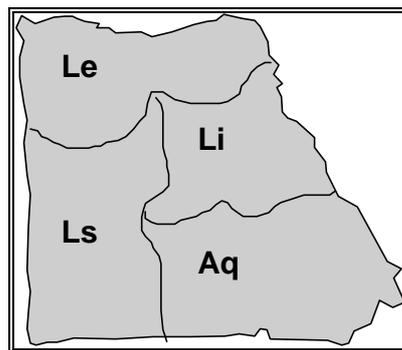


Figura 2.7 - Geo-campo temático (solos).

2.5.3.1 GEO-OBJETO

Definição 2.3. Geo-Objeto

Um geo-objeto é um elemento único que possui atributos não-espaciais e está associado a múltiplas localizações geográficas. A localização pretende ser exata e o objeto é distinguível de seu entorno.

Esta definição tem três grandes motivações adicionais:

1. *As projeções cartográficas:* a projeção planar da Terra, a partir de escalas macroregionais, é feita com o uso de quadrículas que estão particionadas em sistemas de referência independentes que definem recortes arbitrários no espaço e podem dividir a localização de um geo-objeto. Por exemplo, um particionamento cartográfico da Amazônia na projeção UTM, escala 1:250.000, faz com que os principais rios tenham representações geométricas descontínuas em vários mapas;
2. *Representações geométricas em diferentes escalas:* na prática, num mesmo banco de dados geográfico, podem conviver representações da mesma realidade geográfica em diferentes escalas geográficas. Por exemplo, considere-se um conjunto de mapas dos municípios do Estado de São Paulo, que inclui um mapa geral (na escala de 1:1.000.000) e mapas regionais (na escala de 1:100.000). Nesta situação, um mesmo geo-objeto (p.ex., o município de São José dos Campos) teria duas representações geométricas: uma contínua no mapa regional do Vale do Paraíba e outra descontínua nas folhas na escala 1:100.000;
3. *Múltiplas representações temporais:* as diferentes representações de um mesmo objeto podem corresponder a variações temporais do mesmo, como no caso de um lago que teve suas bordas alteradas²;

Para ilustrar este conceito, considere-se a Figura 2.8, que mostra um banco de dados da Amazônia, onde os retângulos pontilhados representam o recorte espacial do banco de dados. Entidades como os rios Amazonas e Xingú têm representações em diferentes particionamentos espaciais do banco de dados.

²Um caso particularmente dramático é o Mar de Aral, na ex-URSS.

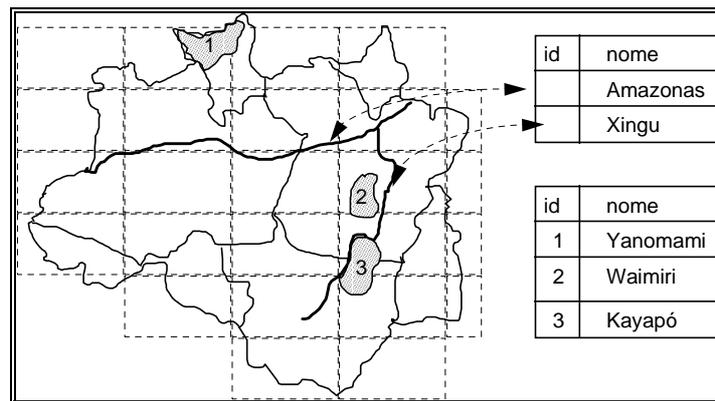


Figura 2.8 - Princípio de identidade em bancos de dados geográficos.

2.5.3.2 OBJETO NÃO-ESPACIAL

Em muitas situações é conveniente permitir a associação de informações não-espaciais a um banco de dados georeferenciado. Por exemplo, considere-se uma aplicação de cadastro urbano em uma prefeitura que já dispõe de um sistema para cálculo do IPTU baseado num cadastro alfanumérico de lotes. Neste caso, pode-se desejar associar o cadastro alfanumérico a dados georeferenciados contendo a localização geográfica e as dimensões destas propriedades. Para englobar estas entidades, introduz-se a noção de *objeto não-espacial*.

Definição 2.4. Objeto não-espacial

Um objeto não-espacial é um objeto que não possui localizações espaciais associadas.

Assim, a noção de objeto não-espacial engloba qualquer tipo de informação que não seja georeferenciada e que se queira agregar a um SIG.

O exemplo anexo mostra o caso de uma aplicação de cadastro rural, mostrada na Figura 2.9. Neste caso, tem-se os geo-objetos da classe “fazendas” (que estão referenciados espacialmente) e deseja-se estabelecer a ligação entre estes geo-objetos e a informação alfanumérica já existente sob a forma de um cadastro de propriedades. Neste caso, as informações de cadastro são consideradas um *objeto não-espacial*.

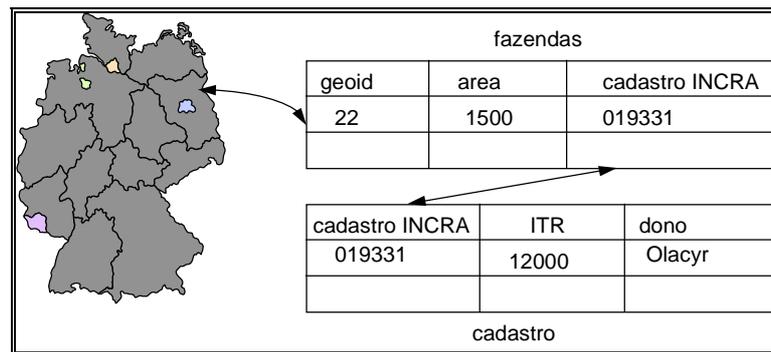


Figura 2.9 - Exemplo de ligação entre geo-objeto e objeto não-espacial.

2.6 UNIVERSO DE REPRESENTAÇÃO

No universo de representação, definem-se as possíveis representações geométricas que podem estar associadas às classes do universo conceitual. Inicialmente, deve-se considerar as duas grandes classes de representações geométricas: REPRESENTAÇÃO VETORIAL e REPRESENTAÇÃO MATRICIAL.

Na representação vetorial, a representação de um elemento ou objeto é uma tentativa de reproduzi-lo o mais exatamente possível. Qualquer entidade ou elemento gráfico de um mapa é reduzido a três formas básicas: pontos, linhas, áreas ou polígonos.

A representação matricial consiste no uso de uma malha quadriculada regular sobre a qual se constrói, célula a célula, o elemento que está sendo representado. A cada célula, atribui-se um código referente ao atributo estudado, de tal forma que o computador saiba a que elemento ou objeto pertence determinada célula.

Vale ressaltar que as representações estão associadas aos tipos de dados anteriormente discutidos, a saber:

- *dados temáticos*: admitem tanto representação matricial quanto vetorial;
- *dados cadastrais*: sua parte gráfica é armazenada em forma de coordenadas vetoriais e seus atributos não gráficos são guardados em um banco de dados;
- *redes*: sua parte gráfica é armazenada em forma de coordenadas vetoriais, com a topologia *arco-nó* e seus atributos não gráficos são guardados em um banco de dados;
- *imagens de sensoriamento remoto*: armazenadas em representação matricial;

- modelos numéricos de terreno: podem ser armazenados em *grades regulares* (representação matricial), *grades triangulares* (representação vetorial com topologia *arco-nó*) ou *isolinhas* (representação vetorial sem topologia).

2.6.1 REPRESENTAÇÃO MATRICIAL

Nesta representação, o espaço é representado como uma matriz $P(m, n)$ composto de m colunas e n linhas, onde cada célula possui um número de linha, um número de coluna e um valor correspondente ao atributo estudado e cada célula é individualmente acessada pelas suas coordenadas.

A representação matricial supõe que o espaço pode ser tratado como uma superfície plana, onde cada célula está associada a uma porção do terreno. A resolução do sistema é dada pela relação entre o tamanho da célula no mapa ou documento e a área por ela coberta no terreno. A Figura 2.10 mostra um mesmo mapa representado por células de diferentes tamanhos (diferentes resoluções), representando diferentes áreas no terreno.

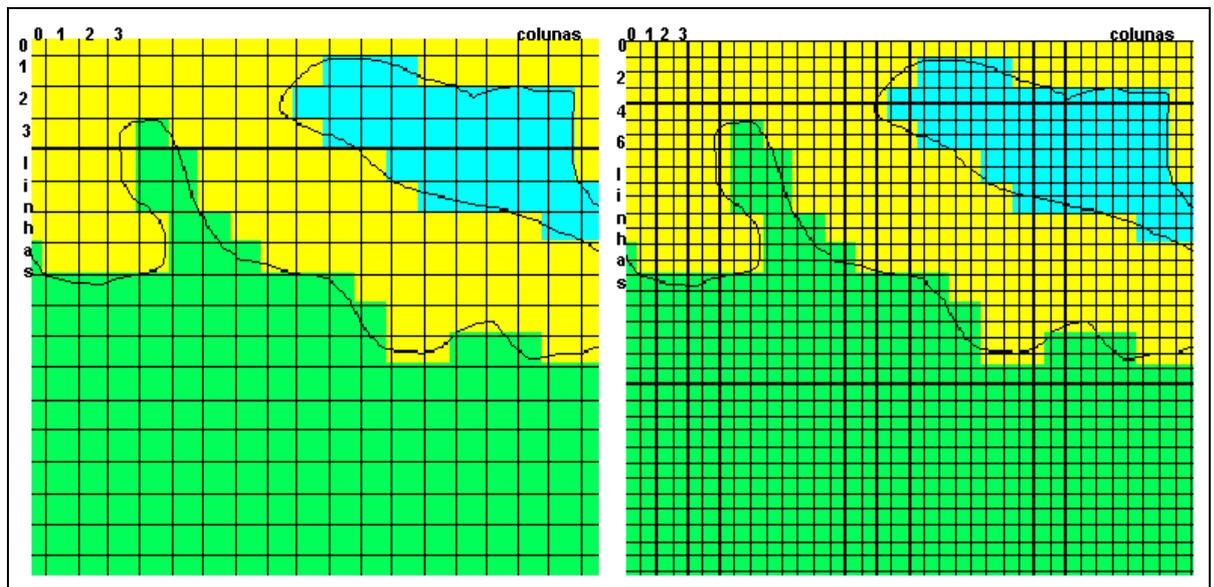


Figura 2.10 - Diferentes representações matriciais para um mapa.

Como o mapa do lado esquerdo possui uma resolução quatro vezes menor que o do mapa do lado direito, as avaliações de áreas e distâncias serão bem menos exatas que no primeiro. Em contrapartida, o espaço de armazenamento necessário para o mapa da direita será quatro vezes maior que o da esquerda.

Os dados são codificados, célula a célula, atribuindo a cada uma o código correspondente à uma classe referente ao fenômeno estudado. Para fazer isto, é necessário estabelecer um critério a ser obedecido em toda a operação.

Pode-se, por exemplo, atribuir a cada célula o código da classe sobre a qual estiver o centro da quadrícula. Outra possibilidade é adotar-se o critério da maior ocorrência. Neste caso, o código corresponde ao da classe que ocupar a maior parte da célula.

Hierarquia de Representações Matriciais

A REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA MATRICIAL pode ser especializada segundo a hierarquia de classes mostrada na Figura 2.11.

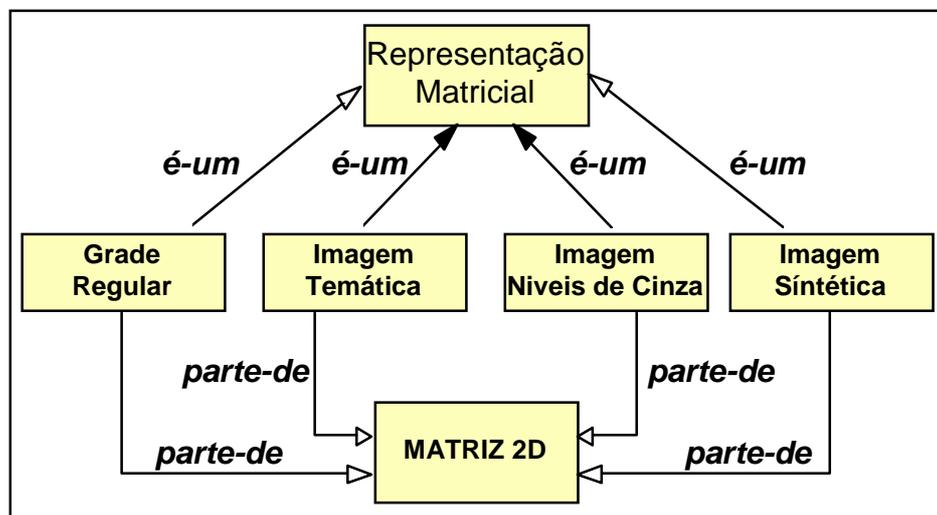


Figura 2.11 - Hierarquia de classes para representação matricial.

Os tipos possíveis de representação matricial são:

- GRADE REGULAR: uma grade regular é uma matriz de reais;
- IMAGEM EM TONS DE CINZA: imagem representada através de uma matriz onde os valores da matriz representam os valores de cinza da imagem;
- IMAGEM TEMÁTICA: representação matricial de um geo-campo TEMÁTICO, Por exemplo, numa imagem temática, um elemento da matriz de valor 2 pode estar associado ao tema “Floresta Ombrófila”;
- IMAGEM SINTÉTICA (ou CODIFICADA): representação de uma imagem em cores, utilizada para mostrar imagens em composição colorida em placas gráficas falsa-cor.

2.6.2 REPRESENTAÇÃO VETORIAL

2.6.2.1 CONCEITOS GERAIS

No modelo vetorial, a localização e a aparência gráfica de cada objeto são representadas por um ou mais pares de coordenadas. Este tipo de representação não é exclusivo do GIS: sistemas CAD e outros tipos de sistemas gráficos também utilizam representações vetoriais. Isto porque o modelo vetorial é bastante intuitivo para engenheiros e projetistas, embora estes nem sempre utilizem sistemas de coordenadas ajustados à superfície da Terra para realizar seus projetos, pois para estas aplicações um simples sistema de coordenadas cartesianas é suficiente. Mas o uso de vetores em GIS é bem mais sofisticado do que o uso em CAD, pois em geral GIS envolve volumes de dados bem maiores, e conta com recursos para tratamento de topologia, associação de atributos alfanuméricos e indexação espacial.

No caso de representação vetorial, consideram-se três elementos gráficos: ponto, linha poligonal e área (polígono). Um *ponto* é um par ordenado (x, y) de coordenadas espaciais. Além das coordenadas, outros dados não-espaciais (atributos) podem ser arquivados para indicar de que tipo de ponto se está tratando.

As *linhas poligonais*, arcos, ou elementos lineares são um conjunto de pontos conectados. Além das coordenadas dos pontos que compõem a linha, deve-se armazenar informação que indique de que tipo de linha se está tratando, ou seja, a que atributo ela está associada. Um *polígono* é a região do plano limitada por uma ou mais linhas poligonais conectadas de tal forma que o último ponto de uma linha seja idêntico ao primeiro da próxima.

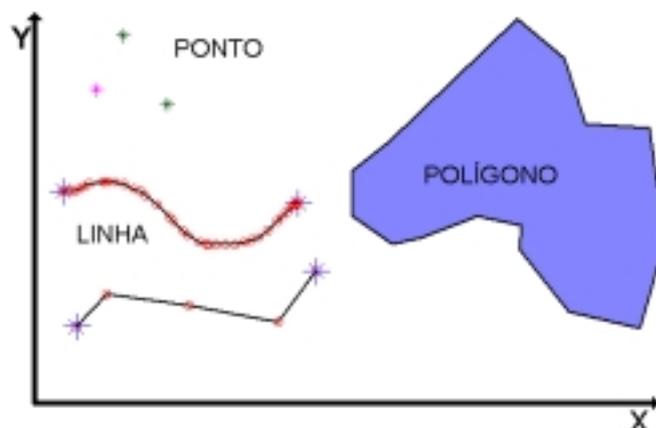


Figura 2.12 - Elementos da representação vetorial

Observe-se também que o polígono divide o plano em duas regiões: o interior, que convencionalmente inclui a fronteira (a poligonal fechada) e o exterior. Assim, quando utilizamos a expressão *vetores*, estamos nos referindo a alguma combinação de pontos, linhas poligonais e polígonos, conforme definidos acima. Combinações porque teoricamente poderíamos utilizar mais de um tipo de primitiva gráfica na criação da representação de um objeto. Por exemplo, pode-se ter objetos de área mais complexos, formados por um polígono básico e vários outros polígonos contidos no primeiro, delimitando buracos. Pode-se também ter objetos compostos por mais de um polígono, como seria necessário no caso do estado do Pará, que além da parte “continental” tem a ilha de Marajó e outras como parte de seu território.

2.6.2.2 VETORES E TOPOLOGIA EM GIS

Apesar de estarmos sempre concebendo representações sob a forma de pontos, linhas e áreas para objetos em GIS, existem algumas variações com relação à adaptação destas representações à realidade, ou seja, considerando a forma com que estes objetos ocorrem na natureza.

Objetos de área podem ter três formas diferentes de utilização: como objetos *isolados*, objetos *aninhados* ou objetos *adjacentes*. O caso de objetos isolados é bastante comum em GIS urbanos, e ocorre no caso em que os objetos da mesma classe em geral não se tocam. Por exemplo, edificações, piscinas, e mesmo as quadras das aplicações cadastrais ocorrem isoladamente, não existindo segmentos poligonais compartilhados entre os objetos. O caso típico de objetos aninhados é o de curvas de nível e todo tipo de isolinhas, em que se tem linhas que não se cruzam, e são entendidas como estando “empilhadas” umas sobre as outras. Finalmente, temos objetos adjacentes, e os exemplos típicos são todas as modalidades de divisão territorial: bairros, setores censitários, municípios e outros. São também exemplos mapas geológicos e pedológicos, que representam fenômenos que cobrem toda a área de interesse. Neste caso, pode-se ter o compartilhamento de fronteiras entre objetos adjacentes, gerando a necessidade por estruturas topológicas. Estes também são os casos em que recursos de representação de buracos e ilhas são mais necessários.

Também objetos de linha podem ter variadas formas de utilização. Analogamente aos objetos de área, pode-se ter objetos de linha isolados, em árvore e em rede. Objetos de linha isolados ocorrem, por exemplo, na representação de muros e cercas em mapas urbanos. Objetos de linha organizados em uma árvore podem ser encontrados nas representações de rios e seus afluentes, e também em redes de esgotos e drenagem pluvial. E podem ser organizados em rede, nos casos de redes elétricas, telefônicas, de água ou mesmo na malha viária urbana e nas malhas rodoviária e ferroviária.

Seja no caso de objetos de área ou no caso de objetos de linhas, quando queremos armazenar explicitamente as relação de adjacência, utilizamos formas específicas de representação vetorial: as representações topológicas.

2.6.2.3 TOPOLOGIA ARCO-NÓ

A topologia arco-nó é a representação vetorial associada a um rede linear conectada. Um *nó* pode ser definido como o ponto de intersecção entre duas ou mais linhas, correspondente ao ponto inicial ou final de cada linha. Nenhuma linha poderá estar desconectada das demais para que a topologia da rede possa ficar totalmente definida.

O conhecimento das relações topológicas entre as linhas pode ser de fundamental importância no caso de redes. Para exemplificar, considere-se a Figura 2.13, que mostra uma parte de uma rede de distribuição elétrica, com os seus diversos componentes (sub-estação, rede, poste, transformador, consumidor).

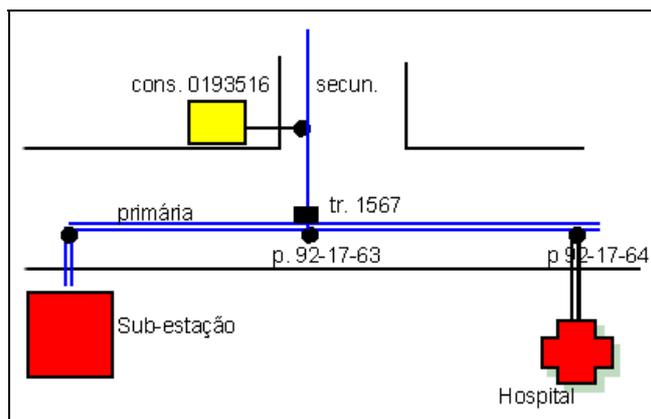


Figura 2.13 - Exemplo de topologia arco-nó (rede elétrica).

2.6.2.4 TOPOLOGIA ARCO-NÓ-POLÍGONO

A topologia arco-nó-polígono é utilizada quando se quer representar elementos gráficos do tipo área. Seu objetivo é descrever as propriedades topológicas de áreas de tal maneira que os atributos não-espaciais associados aos elementos ou entidades poligonais possam ser manipulados da mesma forma que os correspondentes elementos em um mapa temático analógico.

Neste caso, faz-se necessário armazenar informação referente aos elementos vizinhos, da mesma forma que na estrutura de redes deviam ser definidas as ligações entre as linhas. A Figura 2.14 mostra de forma simplificada um exemplo desta estrutura topológica.

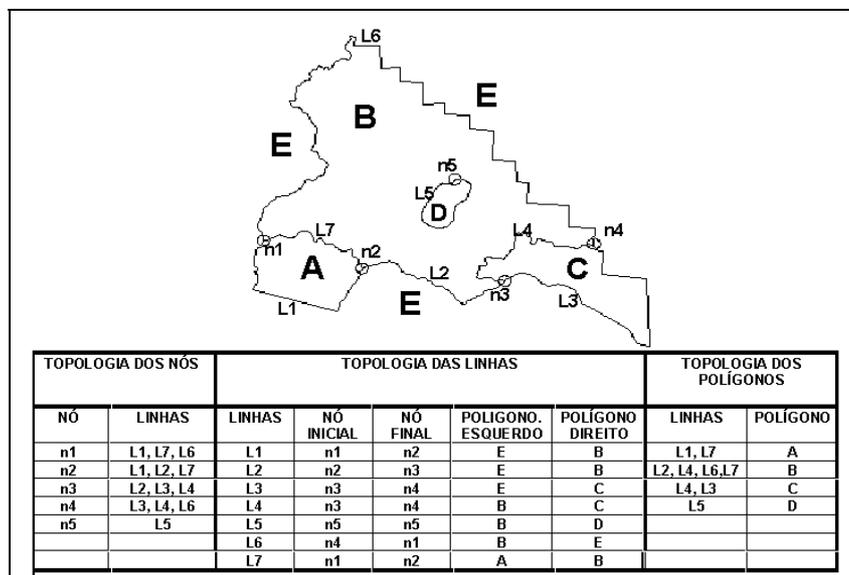


Figura 2.14 - Estrutura topológica do tipo arco-nó-polígono.

2.6.2.5 HIERARQUIA DE REPRESENTAÇÕES VETORIAIS

Para um entendimento mais detalhado das representações vetoriais em GIS, deve-se inicialmente precisar o que se entende por primitivas geométricas: *coordenadas 2D*, *coordenadas 3D*, *nó 2D*, *nó 3D*, *nó de rede*, *arcos*, *arcos orientados*, *isolinhas* e *polígonos*.

Dada uma região geográfica R , pode-se definir:

- COORDENADA2D - Uma coordenada 2D é um objeto composto por uma localização singular $(x_i, y_j) \in R$;
- COORDENADA3D - Uma coordenada 3D é um objeto composto por uma localização singular (x_i, y_j, z) , onde $(x_i, y_j) \in R$;
- PONTO2D - Um ponto 2D é um objeto que possui atributos descritivos e uma coordenada 2D;
- LINHA2D - Uma linha 2D possui atributos e inclui um conjunto de coordenadas 2D;
- ISOLINHA - uma isolinha contém uma linha 2D associada a um valor real (cota);
- ARCO ORIENTADO - um arco orientado contém uma linha 2D associada a uma orientação de percorrimto;
- NÓ2D - um nó 2D inclui uma coordenada2D $(x_i, y_i) \in R$ e uma lista L de linhas 2D (trata-se da conexão entre duas ou mais linhas, utilizada para manter a topologia da estrutura);
- NÓ REDE - um nó de rede contém um nó 2D e uma lista de arcos orientados, onde a cada instância associa-se uma impedância e um custo de percorrimto;
- NÓ 3D - um nó 3D instância desta classe contém uma coordenada 3D (x_i, y_i, z_i) e um lista L de linhas 2D (trata-se da conexão entre três ou mais linhas de uma grade triangular);
- POLÍGONO - um polígono contém uma lista de linhas 2D e uma lista de nós 2D que descrevem as coordenadas da área externa e das áreas internas que compõem o polígono.

Uma vez definidas as primitivas geométricas vetoriais, pode ser estabelecida a hierarquia de representações geométricas vetoriais, como mostrado na Figura 2.15, onde distinguem-se os relacionamentos de especialização **é-um** (“is-a”), inclusão de uma instância **parte-de** (“part-of”), inclusão de um conjunto de

instâncias **conjunto-de** (“set-of”) e inclusão de uma lista de identificadores de instâncias **lista-de** (“list-of”).

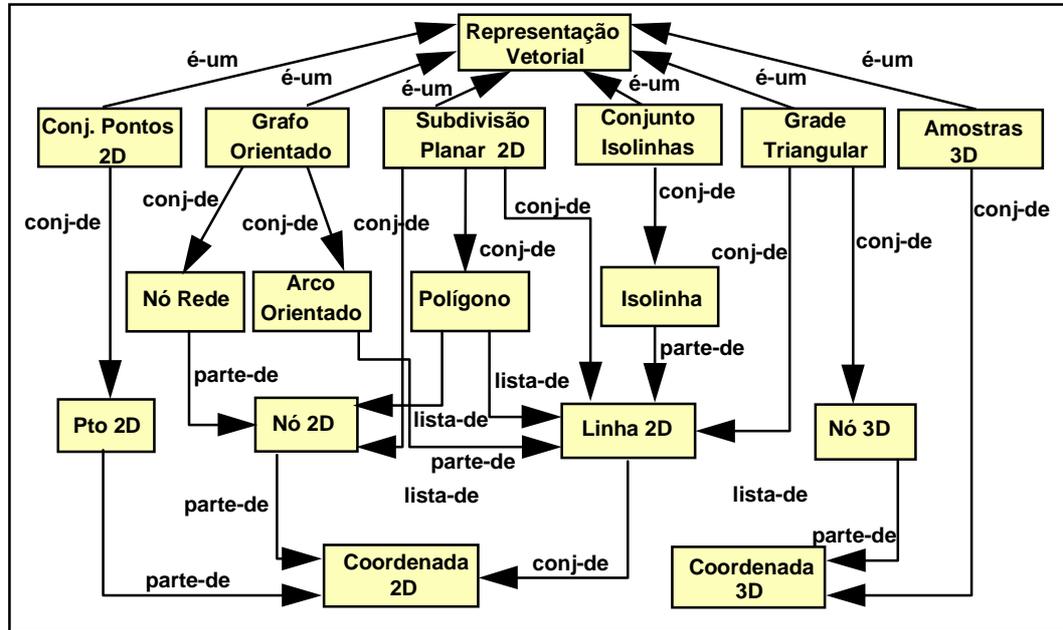


Figura 2.15 - Hierarquia de classes para representação vetorial.

Deste modo, pode-se distinguir os tipos de representação vetorial:

- CONJUNTO DE PONTOS 2D - uma instância desta classe é um conjunto de pontos 2D utilizados para guardar localizações isoladas no espaço (p.ex. no caso de poços de petróleo);
- CONJUNTO DE ISOLINHAS - uma instância desta classe é um conjunto de linhas, onde cada linha possui uma cota e as linhas não se interceptam;
- SUBDIVISÃO PLANAR - para uma região geográfica R qualquer, uma subdivisão planar contém um conjunto Pg de polígonos, L de linhas 2D e N de nós 2D;
- GRAFO ORIENTADO - uma instância desta classe é uma representação composta de um conjunto de nó de rede e de um conjunto de arco orientado 2D;
- GRADE TRIANGULAR - uma instância desta classe contém um conjunto de nós 3D e um conjunto L de linhas 2D tal que todas as linhas se interceptam, mas apenas em seus pontos iniciais e finais;
- MAPA PONTOS3D - uma instância desta classe é um conjunto de coordenadas 3d. Trata-se de um conjunto de amostras 3D.

2.7 COMPARAÇÃO ENTRE REPRESENTAÇÕES MATRICIAL E VETORIAL

Como observamos anteriormente, dados temáticos admitem tanto a representação matricial quanto a vetorial; deste modo, é relevante compará-las.

Para a produção de cartas e em operações onde se requer maior precisão, a representação vetorial é mais adequada. As operações de álgebra de mapas são mais facilmente realizadas no formato matricial. No entanto, para um mesmo grau de precisão, o espaço de armazenamento requerido por uma representação matricial é substancialmente maior. Isto é ilustrado na Figura 2.16.

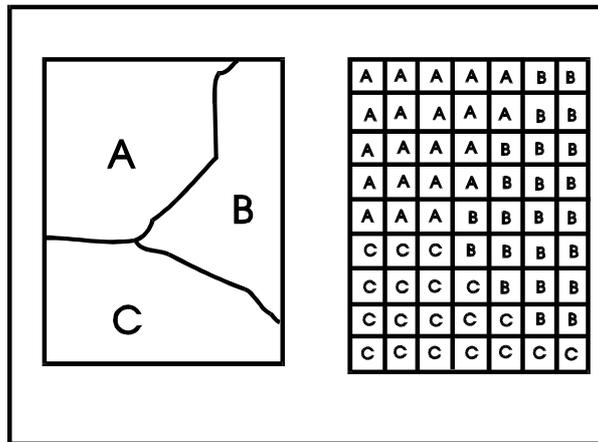


Figura 2.16 - Representação vetorial e matricial de um mapa temático.

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação entre as vantagens e desvantagens de armazenamento matricial e vetorial para mapas temáticos. Esta comparação leva em conta os vários aspectos: relacionamentos espaciais, análise, armazenamento. Nesta tabela, o formato mais vantajoso para cada caso é apresentado em destaque.

TABELA 2.1

COMPARAÇÃO ENTRE REPRESENTAÇÕES PARA MAPAS TEMÁTICOS

<i>Aspecto</i>	<i>Representação Vetorial</i>	<i>Representação Matricial</i>
Relações espaciais entre objetos	Relacionamentos topológicos entre objetos disponíveis	Relacionamentos espaciais devem ser inferidos
Ligação com banco de dados	Facilita associar atributos a elementos gráficos	Associa atributos apenas a classes do mapa
Análise, Simulação e Modelagem	Representação indireta de fenômenos contínuos Álgebra de mapas é limitada	Representa melhor fenômenos com variação contínua no espaço Simulação e modelagem mais fáceis
Escalas de trabalho	Adequado tanto a grandes quanto a pequenas escalas	Mais adequado para pequenas escalas (1:25.000 e menores)
Algoritmos	Problemas com erros geométricos	Processamento mais rápido e eficiente.
Armazenamento	Por coordenadas (mais eficiente)	Por matrizes

2.8 REPRESENTAÇÕES DE MODELOS NUMÉRICOS DE TERRENO

2.8.1 GRADE REGULAR

A *grade regular* é uma representação matricial aonde cada elemento da matriz está associado a um valor numérico, como mostra a Figura 2.17. Para a geração da grade torna-se necessário estimar, através de interpoladores matemáticos, os valores para as células que não possuem medidas de elevação, considerando-se a vizinhança de medidas de elevação conhecidas.

Os procedimentos de interpolação para geração de grades regulares a partir de amostras variam de acordo com a grandeza medida. No caso de altimetria, é comum o uso de funções de ponderação por inverso do quadrado da distância. Já para variáveis geofísicas, procedimentos de filtragem bidimensional ou de geoestatística (como a *krigeagem*) são utilizados.

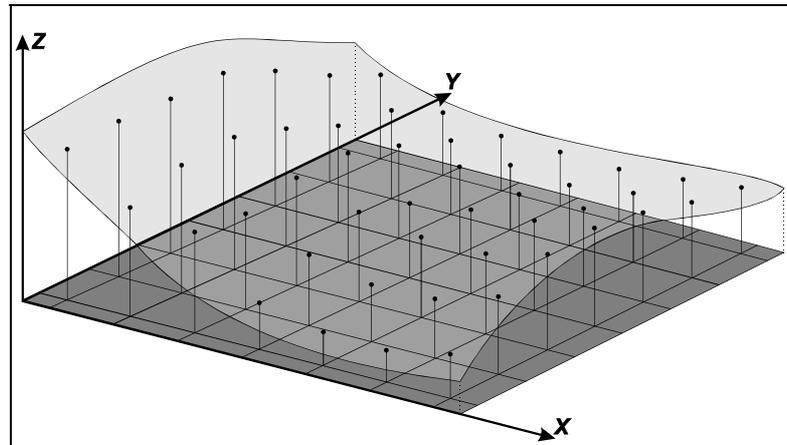


Figura 2.17 - Superfície e grade regular correspondente. (Fonte: Namikawa 1995).

2.8.2 MALHAS TRIANGULARES

A *malha triangular* ou TIN (do inglês “triangular irregular network”) é uma estrutura do tipo vetorial com topologia do tipo *nó-arco* e representa uma superfície através de um conjunto de faces triangulares interligadas. Para cada um dos três vértices da face do triângulo são armazenados as coordenadas de localização (x, y) e o atributo z, com o valor de elevação ou altitude. Em geral, nos SIGs que possuem pacotes para MNT, os algoritmos para geração da grade triangular baseiam-se na triangulação de Delaunay com restrição de região.

Quanto mais equiláteras forem as faces triangulares, maior a exatidão com que se descreve a superfície. O valor de elevação em qualquer ponto dentro da superfície pode ser estimado a partir das faces triangulares, utilizando-se interpoladores. A Figura 2.18 mostra uma superfície tridimensional e a grade triangular correspondente.

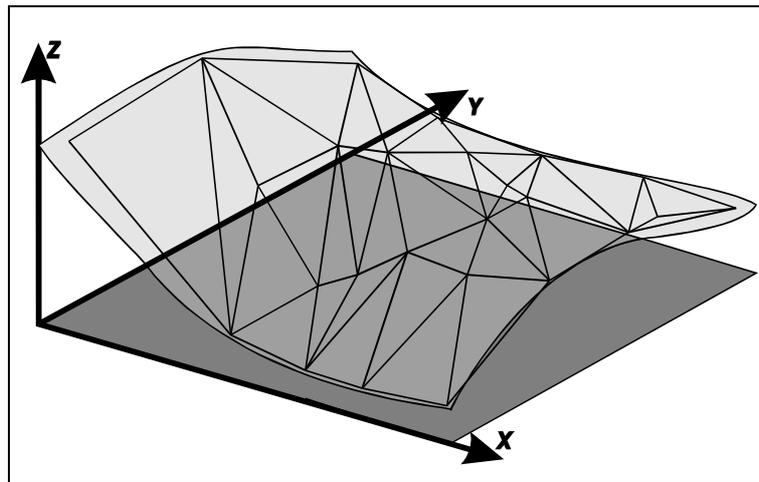


Figura 2.18 - Superfície e malha triangular correspondente. (Fonte: Namikawa 1995).

2.8.3 COMPARAÇÃO ENTRE REPRESENTAÇÕES DE MNT

As malhas triangulares são normalmente melhores para representar a variação do terreno, pois capturam a complexidade do relevo sem a necessidade de grande quantidade de dados redundantes. As grades regulares têm grande redundância em terrenos uniformes e dificuldade de adaptação a relevos de natureza distinta no mesmo mapa, por causa da grade de amostragem fixa.

Para o caso de variáveis geofísicas e para operações como visualização 3D, as grades regulares são preferíveis, principalmente pela maior facilidade de manuseio computacional. A Tabela 2.2 resume as principais vantagens e desvantagens de grades regulares e malhas triangulares.

TABELA 2.3

COMPARAÇÃO ENTRE GRADES REGULARES E MALHAS TRIANGULARES PARA REPRESENTAR MODELOS NUMÉRICOS DE TERRENO

	Malha triangular	Grade regular
Vantagens	<ol style="list-style-type: none"> 1. Melhor representação de relevo complexo 2. Incorporação de restrições como linhas de crista 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Facilita manuseio e conversão 2. Adequada para geofísica e visualização 3D
Problemas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Complexidade de manuseio 2. Inadequada para visualização 3D 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Representação relevo complexo 2. Cálculo de declividade

Os modelos numéricos de terreno também podem ser convertidos para mapas temáticos e para imagens. Em ambos os casos, a grandeza numérica é quantizada, seja para um número pequeno de valores (caso de dados temáticos) seja para a variação associada a imagens (valores discretos).

2.9 REPRESENTAÇÕES COMPUTACIONAIS DE ATRIBUTOS DE OBJETOS

Entende-se por atributo qualquer informação descritiva (nomes, números, tabelas e textos) relacionada com um único objeto, elemento, entidade gráfica ou um conjunto deles, que caracteriza um dado fenômeno geográfico.

Inicialmente os SIGs armazenavam tanto as entidades gráficas quanto os atributos não-espaciais em sistemas próprios de arquivos internos. Permitiam ainda que os atributos não-espaciais fossem inseridos no sistema durante, ou imediatamente após, a entrada dos objetos ou entidades gráficas que representavam. Estes procedimentos eram problemáticos quando havia numerosa quantidade de atributos não-espaciais a serem relacionados com os objetos.

Além disso, as ferramentas de busca, recuperação, manutenção e análise destes sistemas deixavam a desejar, quando comparadas aos tradicionais Sistemas de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD). Um SGBD é um sistema de banco de dados que funciona independentemente do sistema aplicativo, armazenando os dados em arquivos no disco rígido e carregando-os em memória para sua manipulação. Assegura três requisitos importantes na operação de dados: *integridade* - controle de acesso por vários usuários; *eficiência* - acesso e modificações de grande volume de

dados e *persistência* - manutenção de dados por longo tempo, independente dos aplicativos que dão acesso ao dado.

A organização de bancos de dados geográficas mais utilizada na prática é a chamada *estratégia dual*, descrita a seguir. Para alternativas, o leitor deverá reportar-se ao capítulo 3 deste texto.

2.9.1.1 ESTRATÉGIA DUAL

Um SIG implementado com a estratégia dual utiliza um SGBD relacional para armazenar os atributos convencionais dos objetos geográficos (na forma de tabelas) e arquivos para guardar as representações geométricas destes objetos. No *modelo relacional*, os dados são organizados na forma de uma *tabela* onde as *linhas* correspondem aos *dados* e as *colunas* correspondem aos *atributos*.

A entrada dos atributos não-espaciais é feita por meio de um SGBD relacional e para cada entidade gráfica inserida no sistema é imposto um identificador único ou *rótulo*, através do qual é feita uma *ligação lógica* com seus respectivos atributos não-espaciais armazenados em tabelas de dados no SGBD, como ilustrado na Figura 2.19.

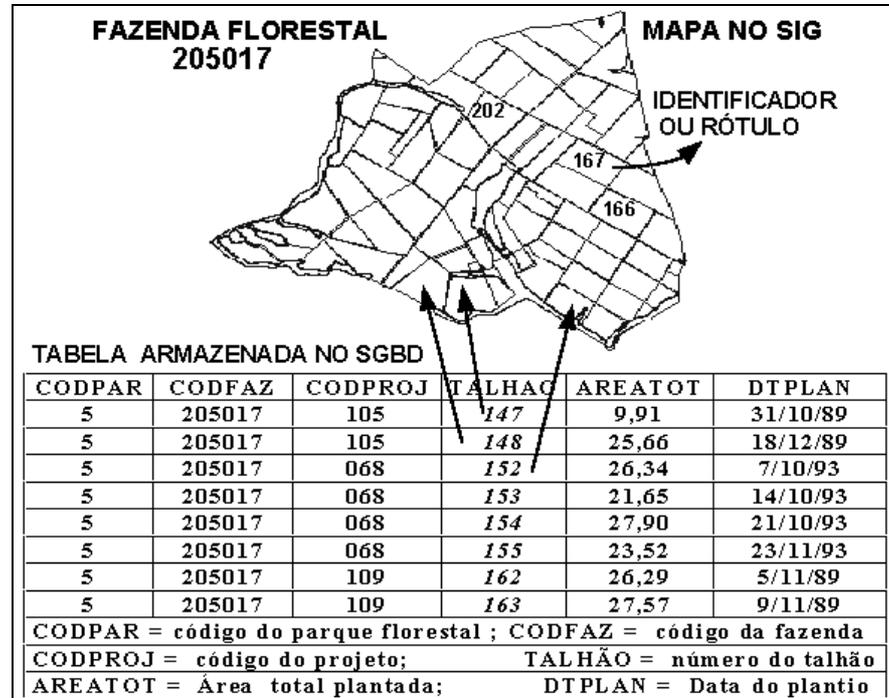


Figura 2.19 - Estratégia dual para bancos de dados geográficos.

A Figura 2.19 exemplifica as ligações lógicas criadas entre os rótulos dos talhões de um mapa florestal e seus atributos correspondentes (registros no “campo” TALHÃO) numa tabela de banco de dados.

O mesmo tipo de relacionamento lógico pode ser feito em outros casos, como por exemplo: moradores em um lote, lotes em uma quadra, quadras em bairro, bairros em uma cidade; hidrantes de segurança ou telefones públicos ao longo de uma avenida; postos de serviço e restaurantes ao longo de uma rodovia.

A principal vantagem desta estratégia é poder utilizar os SGBDs relacionais de mercado. No entanto, como as representações geométricas dos objetos espaciais estão fora do controle do SGBD, esta estrutura dificulta o equacionamento das questões de otimização de consultas, gerência de transações e controle de integridade e de concorrência. Estes problemas só podem ser resolvidos através de implementações sofisticadas das camadas superiores da arquitetura genérica, que operem coordenadamente com o SGBD convencional. Exemplos de sistemas comerciais baseados em estratégia dual são o ARC/INFO (Morehouse, 1992), MGE (Intergraph, 1990) e o SPRING (Câmara et al., 1996).

2.10 UNIVERSO DE IMPLEMENTAÇÃO

Ao se discutir o universo de implementação, serão indicadas quais as estruturas de dados a serem utilizadas para construir um sistema de Geoprocessamento. Neste momento, são tratadas as decisões concretas de programação e que podem admitir número muito grande de variações. Estas decisões podem levar em conta as aplicações às quais o sistema é voltado, a disponibilidade de algoritmos para tratamento de dados geográficos e o desempenho do hardware. Para uma discussão sobre os problemas de implementação de operações geográficas, veja-se Güting et al. (1994).

Um dos aspectos principais a ser levado em conta no universo de implementação é o uso de estruturas de indexação espacial. Os métodos de acesso a dados espaciais compõem-se de *estruturas de dados e algoritmos de pesquisa e recuperação* e representam um componente determinante no desempenho total do sistema. Apanhados gerais da literatura são feitos em Berg (1997) e van Kreveld et al.(1998). Estes métodos operam sobre chaves multidimensionais e dividem-se conforme a representação dos dados associados: pontos (ex: *árvores K-D*), linhas e polígonos (ex: *árvores R e R+*) e imagens (ex: *árvores quaternárias*).

Com relação às estruturas de dados, podemos fazer algumas considerações de ordem prática:

- armazenamento de pontos 3D em árvores K-D (Bentley, 1975) traz um ganho muito significativo para aplicações como a geração de grade regular a partir de um conjunto de amostras esparsas;
- o uso de árvores quaternárias (Samet, 1990) para armazenar imagens em tons de cinza não é eficaz. Para o caso de mapas temáticos, apesar de utilizado em pelo menos um sistema comercial (SPANS), os ganhos não são significativos;
- o uso de árvores-R (Gutman, 1984) é uma forma eficiente de organizar os dados vetoriais, para fins de recuperação e operação (Brinkhoff et al., 1993).

2.11 RESUMO

Para compreender melhor a relação entre os diferentes universos (níveis) do modelo, a Tabela 2.4 contém vários exemplos de entidades do mundo real e suas correspondentes no modelo.

TABELA 2.4

CORRESPONDÊNCIA ENTRE UNIVERSOS DO MODELO

<i>Universo do mundo real</i>	<i>Universo conceitual</i>	<i>Universo de representação</i>	<i>Universo de implementação</i>
Mapa de vegetação	Geo-campo Temático	Matriz de inteiros Subdivisão Planar	Quad-tree Linhas 2D (com R-Tree)
Mapa altimétrico	Geo-campo Numérico	Grade regular Grade triangular Conjunto Pontos 3D Conjunto Isolinhas	Matriz 2D Linhas 2D e Nós 3D Pontos 3D (KD-tree) Linhas 2D
Lotes urbanos Rede elétrica	Geo-objetos Rede	Polígonos e Tabela Grafo Orientado	Linhas 2D e Nós 2D Linhas 2D (com R-Tree)

2.12 ORGANIZAÇÃO DE AMBIENTE DE TRABALHO EM SIG

Num SIG, existem duas grandes formas de organização de um ambiente de trabalho:

- organização baseada num *banco de dados geográficos* (“à la dBASE”);
- organização baseada em *projetos* (“à la AutoCAD”).

No primeiro caso, o usuário define inicialmente o esquema conceitual associado às entidades do banco de dados geográficos, indicando para cada tipo de dados seus atributos não-espaciais e as representações geométricas associadas. Procede-se da mesma forma que num banco de dados tradicional (como o dBASE ou o ACCESS), onde a definição da estrutura do banco precede a entrada dos dados. O SPRING e o MGE são exemplos de sistemas organizados como bancos de dados geográficos. No segundo caso, o usuário define inicialmente um referencial geográfico (que delimita uma região de trabalho) e a seguir, define as entidades geográficas que compõem o projeto. O ARC/INFO, SGI e IDRISI são exemplos desta classe de sistemas.

Note-se que um banco de dados geográficos pode ser particionado em projetos, sendo que as definições do esquema conceitual valem para todos os projetos do banco, mesmo que não haja continuidade espacial entre estes projetos.

Um projeto é usualmente composto por um conjunto de *níveis, camadas ou planos de informação (PIs)*, que variam em número, tipos de formatos e de temas, conforme as necessidades de cada tarefa ou estudo. Por exemplo, caso se desejasse fazer um estudo de uso atual do solo e seus impactos sobre o ambiente em uma região, definida em um projeto, seria necessário que este projeto fosse composto de *PIs* com os seguintes temas: 1) rede de drenagem; 2) cidades, rodovias e ferrovias; 3) altimetria; 4) geomorfologia; 5) unidades e associações dos solos; 6) tipologia vegetal; 7) tipos de uso e ocupação das terras. Os *PIs* 1, 2 e 3, quando superpostos, vão formar a cartografia básica da região de estudo ou mapa topográfico, como foi visto no capítulo 2. Os *PIs* restantes são os mapas especiais ou temáticos necessários para atingir o objetivo proposto, isto é, cada *PI* representa uma mesma área mas com informações geográficas diferentes.

Os *PIs* de um projeto podem pertencer a diferentes classes de dados relacionadas com os formatos de representação de dados disponíveis no SIG utilizado.

Esta organização da informação espacial é muito conveniente para permitir que diferentes variáveis sejam integradas ao banco de dados e que diferentes tipos de estudo possam ser realizados, combinando tão somente os fenômenos de interesse.

BIBLIOGRAFIA

- BENTLEY, J. Multidimensional Search Trees Used for Associative Searching. *Communications of the ACM*, 18:509-517, 1975.
- BRINKHOFF, T.; KRIEGEL, H.P.; SEEGER, B. Efficient Processing of Spatial Joins Using R-Trees. In: ACM SIGMOD Conference, Washington, 1993. *Proceedings*, Washington, ACM, pp. 237-246, 1993.
- DE BERG (ed.), Computational Geometry : Algorithms and Applications. Berlin, Springer Verlag, 1997.
- CÂMARA, G. *Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos*. Tese de Doutorado em Computação Aplicada. São José dos Campos, INPE, Dezembro 1995. (disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/teses/gilberto>>).
- CÂMARA, G.; FREITAS, U.M.; SOUZA, R.C.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-Oriented Data Modelling. *Computers and Graphics*, vol. 15, n.6, July 1996.
- GOODCHILD, M. Geographical information science. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6 (2): 35-45, 1992a.
- GOODCHILD, M. Geographical data modeling. *Computers & Geosciences*, 1992, 18(4): 401-408, 1992b.
- GOMES, J.M.; VELHO, L. *Computação Visual: Imagens*. Rio, SBM, 1995.
- GUTING, R.H. An Introduction to Spatial Database Systems. *VLDB Journal*, 3(4), October 1994.
- GUTMAN, A. R-trees: a dynamic index structure for spatial searching. In: ACM SIGMOD CONFERENCE. *Proceedings*, Boston, ACM, pp. 47-57, 1984.
- INTERGRAPH, MGE- *The Modular GIS Environment*, 1990. <<http://www.intergraph.com/gis>>
- VAN KREVELD, M.; ROOS, T, NIEVERGELT, J. (eds.) *Algorithmic Foundations of Geographic Information Systems (Lecture Notes in Computer Science, 1340)*. Berlin, Springer-Verlag, 1998.
- MOREHOUSE, S. The ARC/INFO Geographical Information System. *Computers & Geosciences*, 18(4): 435-443, 1992.

NAMIKAWA, L. M. *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, Brasil, 1995.

SAMET, H. *The Design and Analysis of Spatial Data Structures*. Reading, Addison-Wesley, 1990.

STEVENS, S. *Handbook of Experimental Psychology*. New York, Wiley, 1951.

WORBOYS, M.F. *GIS: A Computing Perspective*. London, Taylor and Francis, 1995.

ARQUITETURA DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Clodoveu Davis
Gilberto Câmara

3.1 DESCRIÇÃO GERAL

O termo *Sistemas de Informação Geográfica* (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também através de sua localização espacial; oferecem ao administrador (urbanista, planejador, engenheiro) uma visão inédita de seu ambiente de trabalho, em que todas as informações disponíveis sobre um determinado assunto estão ao seu alcance, interrelacionadas com base no que lhes é fundamentalmente comum -- a localização geográfica. Para que isto seja possível, a geometria e os atributos dos dados num SIG devem estar *georreferenciados*, isto é, localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica.

O requisito de armazenar a geometria dos objetos geográficos e de seus atributos representa uma *dualidade* básica para SIGs. Para cada objeto geográfico, o SIG necessita armazenar seus atributos e as várias representações gráficas associadas. Devido a sua ampla gama de aplicações, que inclui temas como agricultura, floresta, cartografia, cadastro urbano e redes de concessionárias (água, energia e telefonia), há pelo menos três grandes maneiras de utilizar um SIG:

- como ferramenta para produção de mapas;
- como suporte para análise espacial de fenômenos;
- como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

Estas três visões do SIG são antes convergentes que conflitantes e refletem a importância relativa do tratamento da informação geográfica dentro de uma instituição. Para esclarecer ainda mais o assunto, apresentam-se a seguir algumas definições de SIG:

“Um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados” (Aronoff, 1989);

“Conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real” (Burrough, 1986);

“Um sistema de suporte à decisão que integra dados referenciados espacialmente num ambiente de respostas a problemas” (Cowen, 1988);

“Um banco de dados indexados espacialmente, sobre o qual opera um conjunto de procedimentos para responder a consultas sobre entidades espaciais” (Smith et al., 1987).

Estas definições de SIG refletem, cada uma à sua maneira, a multiplicidade de usos e visões possíveis desta tecnologia e apontam para uma perspectiva interdisciplinar de sua utilização. A partir destes conceitos, é possível indicar as principais características de SIGs:

- Inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno;
- Oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados.

3.2 ESTRUTURA GERAL DE UM SIG

Numa visão abrangente, pode-se indicar que um SIG tem os seguintes componentes:

- Interface com usuário;
- Entrada e integração de dados;
- Funções de consulta e análise espacial;
- Visualização e plotagem;
- Armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos).

Estes componentes se relacionam de forma hierárquica. No nível mais próximo ao usuário, a *interface homem-máquina* define como o sistema é operado e controlado. No nível intermediário, um SIG deve ter mecanismos de processamento de dados espaciais (*entrada, edição, análise, visualização e saída*). No nível mais interno do sistema, um *sistema de gerência de bancos de dados geográficos* oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos.

De uma forma geral, as funções de processamento de um SIG operam sobre dados em uma *área de trabalho* em memória principal. A ligação entre os dados geográficos e as funções de processamento do SIG é feita por mecanismos de seleção e consulta que definem restrições sobre o conjunto de dados. Exemplos ilustrativos de modos de seleção de dados são:

- "Recupere os dados relativos à carta de Guajará-Mirim " (*restrição por definição de região de interesse*);
- "Recupere as cidades do Estado de São Paulo com população entre 100.000 e 500.000 habitantes" (*consulta por atributos não-espaciais*).
- "Mostre os postos de saúde num raio de 5 km do hospital municipal de S.J.Campos" (*consulta com restrições espaciais*).

A Figura 1.1 indica o relacionamento dos principais componentes ou subsistemas de um SIG. Cada sistema, em função de seus objetivos e necessidades, implementa estes componentes de forma distinta, mas todos os subsistemas citados devem estar presentes num SIG.

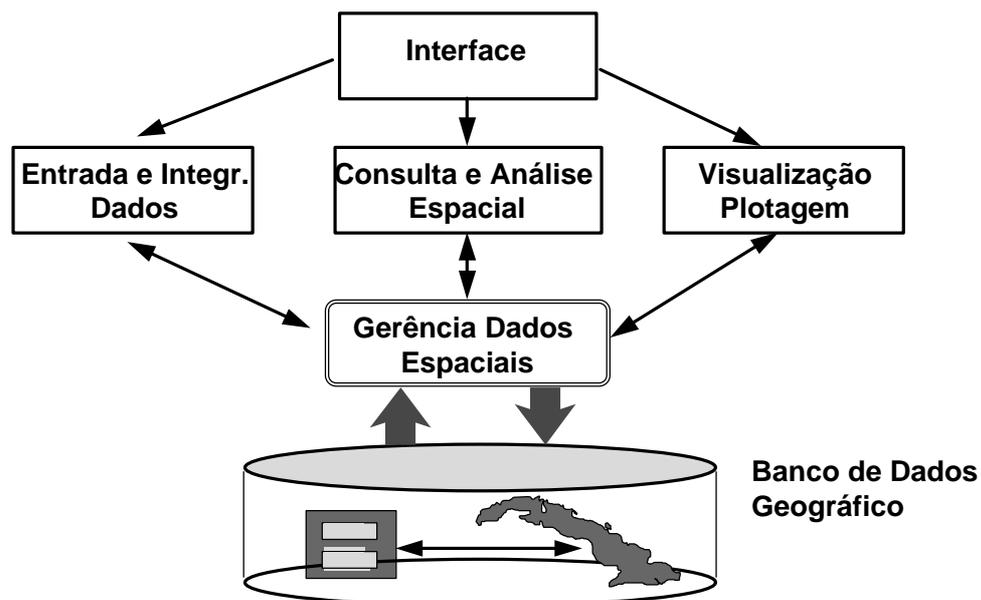


Figura 3.1 - Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica

Neste capítulo, apresentamos uma descrição detalhada dos componentes de um SIG, detalhando sua estrutura geral. Na seção 3.2, apresentamos as diferentes alternativas de implementação da arquitetura de um SIG. Na seção 3.3, detalhamos as funções disponíveis, e na seção 3.4, apresentamos uma descrição das principais alternativas disponíveis no mercado, no final da década de 90.

3.3 ARQUITETURA INTERNA

Os GIS de mercado funcionam segundo uma variedade de arquiteturas internas. Uma análise das diferentes arquiteturas de GIS pode indicar a existência de pontos fortes ou fracos em cada sistema, que têm influência decisiva em aspectos como o desempenho, a capacidade de gerenciamento de grandes bases de dados, a capacidade de utilização simultânea por múltiplos usuários e a capacidade de integração com outros sistemas.

Nesta seção, desenvolvemos uma visão do esquema de funcionamento interno dos diferentes SIGs, ao identificar cada módulo do software, verificar sua função, avaliar sua eficiência individual e de seu relacionamento com os demais componentes.

Nosso objetivo não é o de quantificar ou de relacionar as diferenças entre os SIG no que diz respeito à *qualidade* da implementação de seus módulos ou componentes, e sim o de analisar as *diferenças conceituais* expressas na maneira como cada um deles se organiza, muitas vezes refletindo sua evolução como produto ao longo dos anos, e as alternativas de implementação disponíveis à época de sua primeira concepção. Em seguida, cabe uma análise a respeito de como estas alternativas poderão afetar os aspectos mais importantes do software do ponto de vista do usuário, em particular eficiência, segurança, consistência de dados, e capacidade de integração com outros softwares.

Com algumas alterações, ou maior detalhamento, praticamente qualquer software comercial hoje existente cairá em uma das seguintes alternativas:

- SIG Tradicional
- Arquitetura Dual
- SIG baseado em CAD
- SIG relacional
- SIG orientado a objetos
- *Desktop mapping*
- SIG baseado em imagens
- SIG integrado (imagens-vetores)

Observe-se que as cinco primeiras categorias referem-se especificamente a SIG baseado em vetores. Isto deve-se ao fato de que existem muitas variações para a filosofia básica de armazenamento e utilização de vetores, o que é refletido com clareza nos SIG

das primeiras categorias, enquanto o gerenciamento e processamento de imagens é mais uniforme entre as diversas aplicações comerciais existentes.

Deve-se destacar que, com o passar do tempo e com o crescimento do nível de complexidade dos SIG comerciais, esta categorização está perdendo gradualmente a nitidez. Um exemplo típico deste fenômeno é a crescente incorporação de recursos e funções a sistemas *desktop mapping*, tornando-os mais poderosos, e aproximando-os do que seria denominado “*desktop SIG*”. De qualquer forma, quando aplicável, serão feitas as observações devidas com relação aos produtos comerciais mais utilizados no Brasil.

Em seguida, serão apresentadas duas linhas de desenvolvimento que vem sendo perseguidas pela academia e pela indústria nos últimos tempos. A primeira delas é a que tenta viabilizar o uso de recursos de geoprocessamento através da Internet. Isto vem sendo feito de várias maneiras, e ainda não existe um consenso ou um enfoque vitorioso. A segunda é o investimento em padrões, buscando delinear uma arquitetura básica para SIG *interoperáveis*.

3.3.1 SIG Tradicional

A Figura 3.2 apresenta um diagrama de blocos que representa a arquitetura interna dos SIG mais tradicionais. Por “tradicional” entenda-se que se trata da arquitetura dos primeiros SIG, concebidos em uma época em que a novidade estava na integração de dados gráficos a dados alfanuméricos em um único ambiente. Neste tipo de sistema, o usuário pode acessar os dados geográficos através de uma interface gráfica (*Graphical User Interface*, GUI) ou através de uma linguagem de programação. Esta linguagem de programação é em geral muito simples, consistindo apenas de macro-comandos, ou seja, na possibilidade de encadeamento de comandos encontrados na interface gráfica de qualquer maneira. Assim, a linguagem de programação pode funcionar também como uma interface do tipo linha de comando, em que o usuário pode digitar comandos interativamente. Existe também a possibilidade de personalização da GUI, de modo a incluir macro-comandos ou seqüências de comandos desenvolvidos pelo usuário.

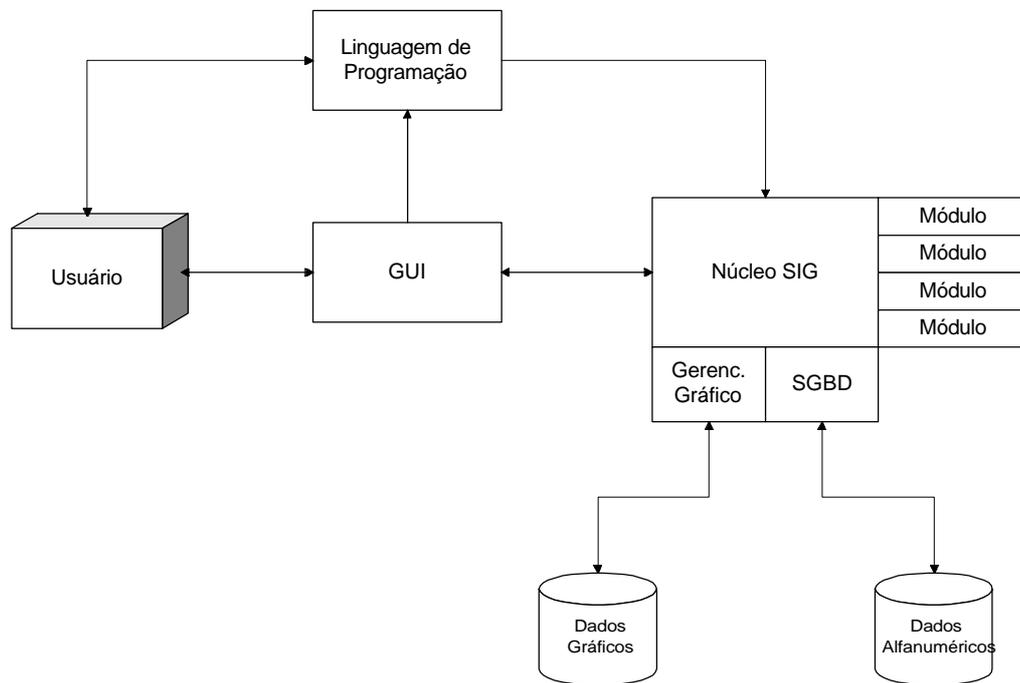


Figura 3.2 - SIG tradicional

Os comandos formulados via GUI ou via linguagem são executados pelo *núcleo* (*kernel*) do software, responsável tanto pelo processamento das funções geográficas quanto pelo gerenciamento dos dados. Este núcleo pode ser implementado de forma monolítica, contendo todas as funções do SIG. No entanto, é mais comum, até por motivos comerciais, encontrar implementações em que as funções são divididas em módulos, cabendo ao núcleo implementar a funcionalidade básica e o gerenciamento dos dados. Estes módulos podem ser comercializados separadamente, permitindo que o usuário configure seu ambiente com custos mais reduzidos. Por exemplo, podem existir módulos para edição gráfica/topológica, acabamento final e plotagem de mapas, processamento de redes, modelagem digital do terreno, gerenciamento de imagens e outros. Um usuário com dez postos de trabalho pode optar por ter recursos de edição em apenas cinco deles, tendo recursos de plotagem em todos, de modelagem do terreno em apenas um, e dispensando o uso de imagens.

Mas o principal aspecto desta arquitetura está na forma de gerenciamento dos dados gráficos e alfanuméricos. A opção implementada pelos desenvolvedores inclui a codificação dos dados gráficos em estruturas proprietárias, ou seja, estruturas de dados concebidas e implementadas dentro do ambiente do desenvolvedor e tratadas como segredo comercial. Assim, os dados gráficos são codificados em arquivos binários, cuja

leitura e correta interpretação só pode ser feita por quem conheça a estrutura de codificação, e este conhecimento está restrito aos técnicos do próprio desenvolvedor.

A codificação dos dados alfanuméricos segue a mesma lógica, embora aqui não haja a preocupação com a ocultação da forma de armazenamento. É em geral adotada uma estrutura tabular, semelhante à dos SGBD relacionais, com registros de tamanho fixo. Somente é necessário conhecer a estrutura dos dados alfanuméricos (quantidade de campos, tipo de conteúdo e largura de cada um deles) para que se consiga interpretar corretamente o conteúdo dos arquivos. O tratamento dos dados alfanuméricos pode ser feito em um ambiente proprietário de gerenciamento de bancos de dados, sendo este ambiente totalmente integrado ao produto, e não tendo vida própria fora dele. Este SGBD é em geral muito simples, não preenchendo os requisitos básicos dos SGBD relacionais padrão.

Resumo das características principais:

- Gerenciamento em separado de gráficos e alfanuméricos
- Armazenamento de gráficos em estruturas proprietárias
- Armazenamento de dados alfanuméricos em banco de dados geralmente proprietário, integrado ao produto (nem sempre relacional)

Exemplos: ARC/INFO (básico)

3.3.2 Arquitetura Dual

A arquitetura apresentada no item anterior evoluiu para a apresentada na Figura 3.3. A única diferença está na adoção de um SGBD relacional completo para gerenciar os dados alfanuméricos. Esta opção reflete principalmente uma intenção de não “reinventar a roda”, utilizando produtos disponíveis no mercado para realizar parte das tarefas do SIG. Na implementação pouco muda conceitualmente, sendo que a tarefa de desenvolver o núcleo fica bastante facilitada. Observe-se que o SIG e o SGBD relacional, sendo produtos diferentes, precisam se comunicar de uma maneira satisfatória para realizar sua função. Esta comunicação é gerenciada pelo núcleo, e é restrita às operações normais de bancos de dados: inserção de dados, exclusão, consultas.

Do ponto de vista do usuário, esta alternativa abre a possibilidade de se ter aplicações convencionais, concebidas e desenvolvidas dentro do ambiente do SGBD relacional, compartilhando os atributos alfanuméricos dos objetos geográficos. O problema é que, como o SGBD relacional não conhece a estrutura gráfica proprietária, existe o sério risco de se introduzir inconsistências no banco de dados geográfico. Imagine-se, por exemplo, que um usuário de aplicação exclusivamente alfanumérica

possa excluir um registro alfanumérico, mas que compõe um conjunto de atributos para uma determinada entidade geográfica. Sem que o SIG saiba, esta entidade geográfica passa a não ter mais atributos, tornando-se inconsistente. Assim, o acesso a atributos alfanuméricos de dados geográficos só pode ser feito de maneira criteriosa, dentro de controles rígidos que precisam ser implementados pela aplicação, uma vez que o software básico (SIG e SGBD relacional) não oferecem qualquer recurso para a garantia automática da integridade dos dados. Observe-se que este tipo de problema poderia ocorrer no caso anterior também, mas como o acesso aos dados gráficos e alfanuméricos somente é feito através do SIG, tem-se um ambiente mais controlado.

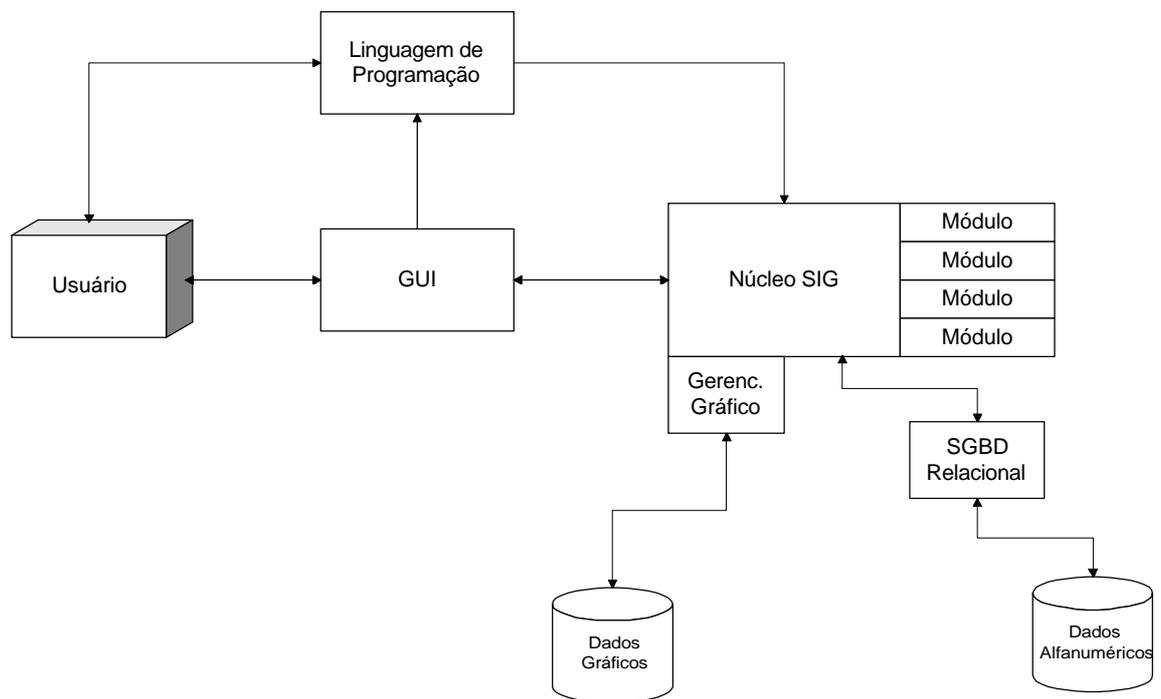


Figura 3.3 - Arquitetura Dual

Resumo das características principais:

- Semelhante ao anterior, porém com o uso de um gerenciador de bancos de dados alfanuméricos externo, tipicamente relacional, padrão de mercado

Exemplos: Genasys.

3.3.3 SIG Baseado em CAD

Uma extensão lógica do raciocínio que levou ao armazenamento de dados alfanuméricos em SGBD relacionais padrão de mercado seria a implementação do gerenciamento dos dados gráficos através de ferramentas também padrão de mercado. No caso, as ferramentas gráficas que melhor se adaptam às necessidades do SIG são os sistemas CAD (*Computer Aided Design*). Estas ferramentas tem seu uso bastante consolidado nas áreas de engenharia, arquitetura e semelhantes, e são naturais candidatas a ambientes de produção cartográfica. Como no caso anterior, ficou nítido para alguns desenvolvedores de SIG que a reimplementação das funções, típicas de sistemas CAD, de edição gráfica e de gerenciamento de arquivos gráficos seria “reinventar a roda”. Leve-se ainda em consideração o estágio de desenvolvimento dos sistemas CAD, já extremamente evoluídos e confiáveis.

Assim, tem-se a arquitetura apresentada na Figura 3.4, em que o núcleo do SIG trata principalmente da integração entre um gerenciador gráfico (CAD) e um gerenciador alfanumérico (SGBDR), além de implementar e tornar disponíveis funções geográficas básicas. Funções geográficas mais específicas são oferecidas em um esquema de módulos, como nos casos anteriores. O sistema dispõe de uma interface gráfica, em geral baseada na do CAD, buscando tornar o sistema mais familiar para aqueles usuários que já tivessem experiência com o CAD. Omitiu-se aqui, propositadamente, a referência a uma linguagem de programação. Embora os principais sistemas CAD disponham de linguagens de programação razoavelmente completas, estas têm acesso exclusivamente à funcionalidade do CAD. O SIG baseado em CAD terá, no máximo, uma macro-linguagem capaz de formular seqüências de comandos disponíveis no ambiente SIG, mas alguns não dispõem nem mesmo deste recurso.

Esta alternativa de arquitetura tem dois grandes problemas principais. O primeiro, e mais grave, é a grande facilidade que se tem em introduzir inconsistências no banco de dados geográfico, de forma semelhante à relatada no exemplo anterior. Aqui é ainda mais fácil: basta algum usuário ter acesso aos dados gráficos, por exemplo usando diretamente o software CAD para acessar os arquivos gráficos: se alguma entidade gráfica for deletada, o registro alfanumérico correspondente ficará isolado. O registro não será também deletado pelo SGBD relacional, pois o mesmo não tem conhecimento desta operação no CAD. Da mesma maneira, um usuário com acesso ao SGBD relacional pode deletar algum registro associado a um dado gráfico, causando o efeito inverso. Apenas o uso exclusivo dos dados através do núcleo do SIG pode pretender garantir a consistência gráfico-alfa.

O segundo problema com este enfoque está na utilização das estruturas de arquivo do CAD para armazenar os dados gráficos. Os sistemas CAD não dispõem de

recursos de indexação espacial, e sempre acessam seus arquivos de forma seqüencial. Assim, têm um desempenho que os impede de ter arquivos muito grandes, uma vez que o custo computacional de acesso a dados organizados seqüencialmente é muito alto. Desta forma, o usuário é obrigado a fracionar sua base gráfica em diversos arquivos, e a compor *manualmente* arquivos auxiliares para ajudar no processo de seleção de arquivos para utilização na tela. Trata-se de um custo operacional expressivo, em particular no caso de grandes bases de dados.

O principal ponto positivo dos SIG baseados em CAD está na grande facilidade de utilização dos recursos de edição. Isto faz com que este tipo de sistema seja especialmente adequado para trabalhos de entrada de dados, onde se pode controlar melhor o volume de dados que é manipulado de uma vez.

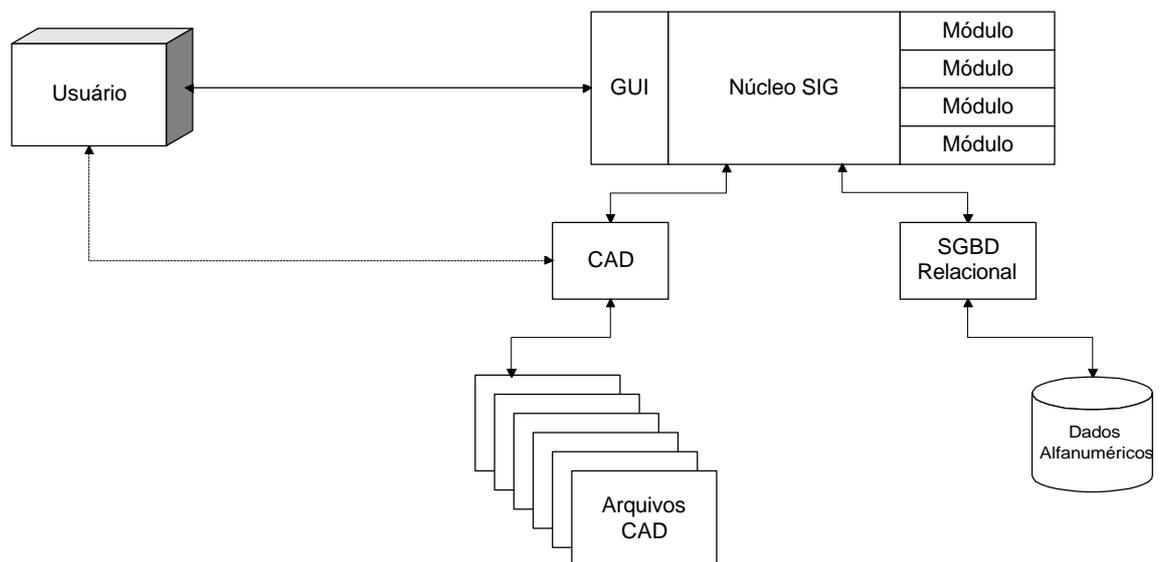


Figura 3.4 - SIG baseado em CAD

Resumo das características principais:

- Gerenciamento de dados gráficos feito por um pacote de CAD, geralmente externo ao SIG
- Gerenciamento de dados alfanuméricos feito por um gerenciador de bancos de dados relacional externo, geralmente padrão de mercado, externo ao SIG
- Possibilidade de manipulação direta dos arquivos gráficos utilizando o sistema CAD “por fora” do SIG

Exemplos: MGE/MicroStation, AutoCAD Map, dBMapa.

3.3.4 SIG Relacional

A combinação de problemas dos casos anteriores, em especial os problemas de gerenciamento de gráficos e as possibilidades de introdução de inconsistências nos bancos de dados geográficos, levaram à concepção de uma nova alternativa. A idéia principal consiste em utilizar os excelentes recursos de garantia de integridade, controle de concorrência (acesso simultâneo por vários usuários) e recuperação de falhas disponíveis nos SGBD relacionais para gerenciar dados geográficos.

Nos SIG relacionais (Figura 3.5), os dados gráficos são organizados em tabelas, de forma semelhante aos dados alfanuméricos. Um sistema de chaves é utilizado para relacionar estas tabelas, formando um esquema relacional cuja integridade é garantida pelo SGBDR. Aliás, esta tarefa é desempenhada com um nível de segurança excelente, tendo em vista o avançado grau de evolução dos SGBDR, aos quais são confiadas missões nos ambientes de aplicações convencionais bem mais críticas que o gerenciamento de dados geográficos.

Desta forma, toda a funcionalidade de gerenciamento de dados fica a cargo do SGBDR. No entanto, para realizar os tipos de consultas e operações mais frequentes no ambiente SIG, algumas extensões precisam ser feitas. A primeira delas refere-se à implementação de recursos de indexação espacial. Isto é feito em geral utilizando esquemas do tipo *quad-tree*, armazenando a associação de cada objeto geográfico com um nó da árvore em uma tabela, e fazendo com que exista uma indexação convencional alternativa baseada nesta associação. Outra extensão importante se refere à linguagem de consulta, que nos SGBD relacionais é a linguagem SQL. É necessário estender o SQL tradicional para incluir operadores geográficos, como “contém”, “contido em”, ou “vizinho a”. Estas extensões são implementadas no núcleo do SIG, que é responsável por traduzí-las em operações previamente existentes no SGBD. Esta tarefa está-se tornando mais fácil, na medida em que alguns desenvolvedores de SGBDR como a Oracle e a Informix estão incorporando facilidades geográficas a seus produtos. Existem ainda sistemas relacionais mais avançados, como o Postgres, que permitem a implementação de novas estruturas de indexação e novos métodos de acesso, o que favoreceria a implementação de SIG relacionais.

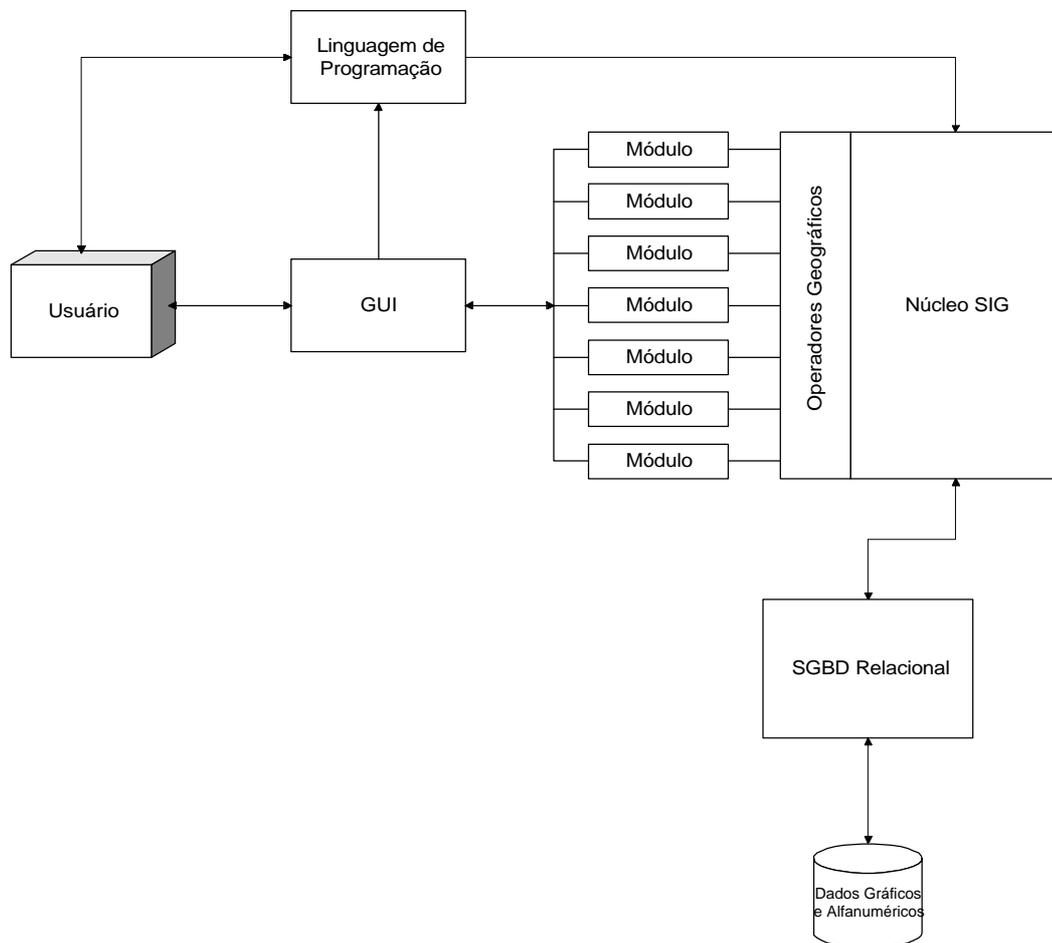


Figura 3.5 - SIG relacional

Resumo das características principais:

- Dados gráficos e alfanuméricos armazenados de forma integrada no banco de dados relacional, externo ao SIG
- Implementação de recursos de geoprocessamento (operadores espaciais, ferramentas de análise, etc.) apoiadas no gerenciador relacional, e apresentadas como extensões ou complementações ao modelo relacional
- Grande robustez de implementação, devido às garantias de integridade do esquema relacional
- Grande estabilidade, devido ao avançado grau de desenvolvimento dos SGBD relacionais

*Exemplos: Vision*GIS*

3.3.5 SIG Orientado a Objetos

Esta alternativa é bastante similar à anterior, porém introduz uma novidade: o armazenamento de dados geográficos utilizando objetos. Esta função é realizada por um SGBD orientado a objetos, que pode ser um produto genérico, de mercado (os mais encontrados são o *O₂* e o *ObjectStore*), ou um gerenciador proprietário. Toda a operação do SIG é baseada em um modelo de dados orientado a objetos, que contém toda a informação sobre cada classe de objetos, incluindo características gráficas, características alfanuméricas e também aspectos do comportamento do objeto (Figura 3.6).

Aproveitando estas características, a implementação do SIG com uma arquitetura cliente-servidor passa a ser mais natural, uma vez que o tráfego entre um “núcleo cliente” e um “núcleo servidor” pode consistir apenas de objetos, que circulam em uma rede. A comunicação entre o servidor e o banco de dados orientado a objetos pode, se não for uma ligação proprietária, ser implementada com base em padrões como o ODTP (*Object Data Transfer Protocol*) ou o CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*). Na prática, no entanto, a preferência ainda é pelas implementações proprietárias, com o núcleo servidor fortemente integrado ao gerenciador orientado a objetos.

Outro ponto de destaque nesta arquitetura é a linguagem de programação. Esta é em geral uma linguagem computacionalmente completa, dotada de todos os recursos necessários para fazer uso da maior riqueza semântica do modelo de dados orientado a objetos. Seria muito difícil utilizar alguma linguagem de consulta como SQL para acessar este tipo de banco de dados, e portanto a disponibilidade de uma linguagem poderosa é muito importante. Esta linguagem também poderá oferecer recursos para a construção ou para a customização da interface gráfica com o usuário, e também poderá ser usada em uma interface de linha de comandos para usuários mais experientes.

Existe a possibilidade de conexão do núcleo cliente a um SGBD relacional externo, desde que este atenda a alguns padrões, viabilizando a integração do SIG com aplicações convencionais externas. Observe-se que novamente é de responsabilidade das aplicações a garantia de integridade entre os dados mantidos pelo SIG, sob a forma de objetos, e os dados mantidos no SGBDR, existindo sempre a possibilidade de quebra de integridade pelo acesso exclusivo ao SIG ou ao SGBDR.

A utilização de conceitos de orientação a objetos nesta arquitetura a torna mais próxima do desejável em termos de sistemas abertos, uma vez que todas as iniciativas no sentido de estabelecer padrões de interoperabilidade em SIG são baseadas na padronização de objetos. No entanto, já foi demonstrado que é possível fazer o mesmo em relação a bancos de dados relacionais.

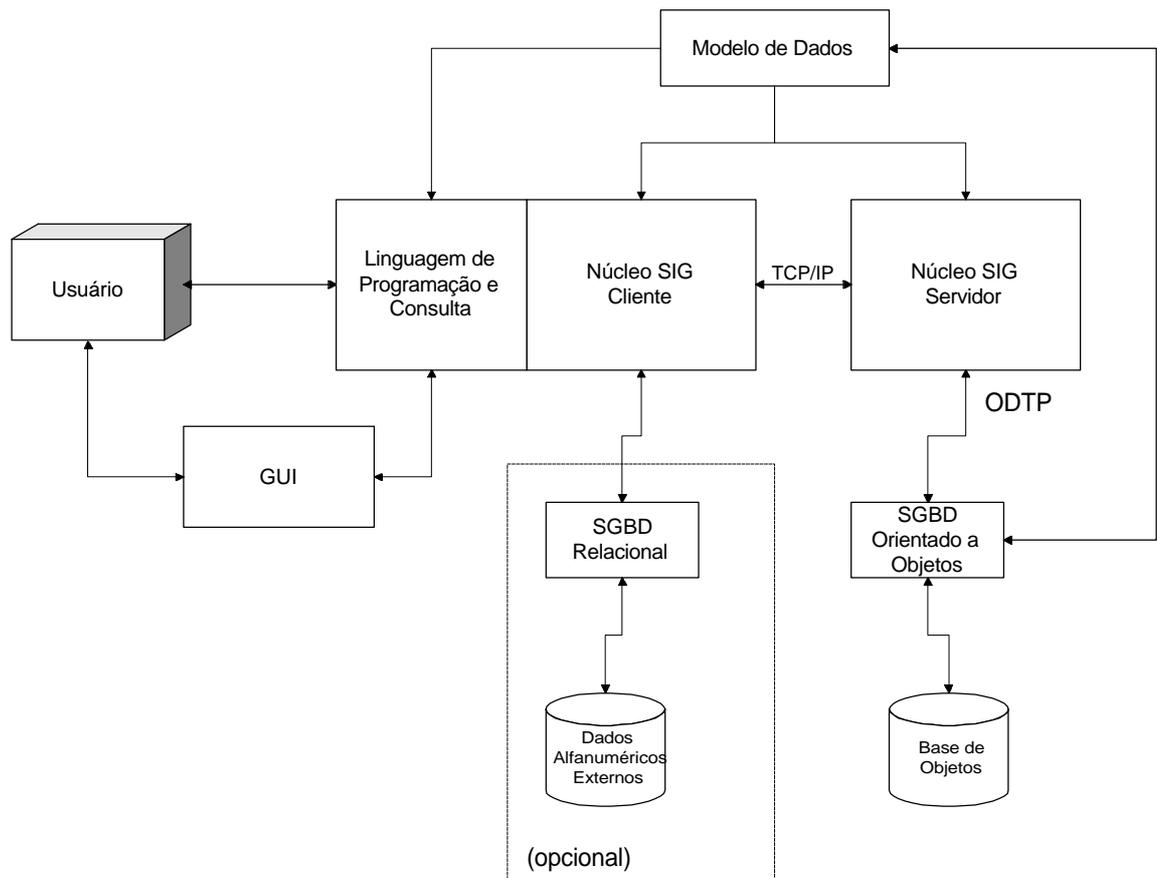


Figura 3.6 - SIG orientado a objetos

Resumo das características principais:

- Presença marcante de módulo de modelagem de dados, que dará personalidade às aplicações
- Possibilidade de conexão com gerenciador de bancos de dados relacional externo, mas a ênfase é no gerenciador de objetos, que é geralmente proprietário
- Tendência a um maior apoio em padrões, sistemas abertos e filosofia cliente-servidor

Exemplos: APIC, Smallworld

3.3.6 Desktop Mapping

Sistemas *desktop mapping* são uma classe de aplicações de geoprocessamento que se concentram em facilitar as atividades de apresentação de informações sob o formato de mapas. Não são, apesar disto, sistemas adequados para atividades de cartografia automatizada, pois não contam em geral com recursos muito sofisticados em termos de edição e entrada de dados. Também não são adequados para gerenciar um grande volume de informações, uma vez que sua estrutura de arquivos tende a ser bastante simples, e é freqüente a utilização direta de arquivos gráficos ou alfanuméricos de outros aplicativos, tais como AutoCAD, Excel, Access, dBASE e outros (Figura 3.7). Quando os dados são codificados no formato proprietário do sistema, no entanto, pode-se ter alguns recursos voltados à melhoria do desempenho, tais como indexação espacial.

O forte desta classe de aplicações está precisamente na facilidade de integração de dados de diversas fontes, além das excelentes facilidades para produção de mapas temáticos plotados. Como se trata de aplicações voltadas especificamente para o usuário final, ou seja, aquele profissional de uma determinada área de interesse que deseja produzir um mapa para compor um relatório, ou mesmo para facilitar alguma análise espacial, são em geral ferramentas desenvolvidas no ambiente Windows. Têm custos relativamente baixos, apresentando constante tendência de queda. No entanto, vêm nos últimos tempos apresentando a tendência a incorporar cada vez mais funções, de modo que alguns já estão-se intitulando *desktop SIG*.

A interface com o usuário, como no caso de outras aplicações Windows, pode ser customizada com o auxílio de uma linguagem de programação simples, em geral no estilo VisualBasic. Esta linguagem também permite a criação de alguns tipos de funções e aplicações limitadas.

A comunicação destes sistemas com outras aplicações pode em geral ser conseguida utilizando alguns dos recursos mais comuns do Windows, como OLE (*Object Linking and Embedding*), DDE (*Dynamic Data Exchange*) e ODBC (*Open Database Connectivity*).

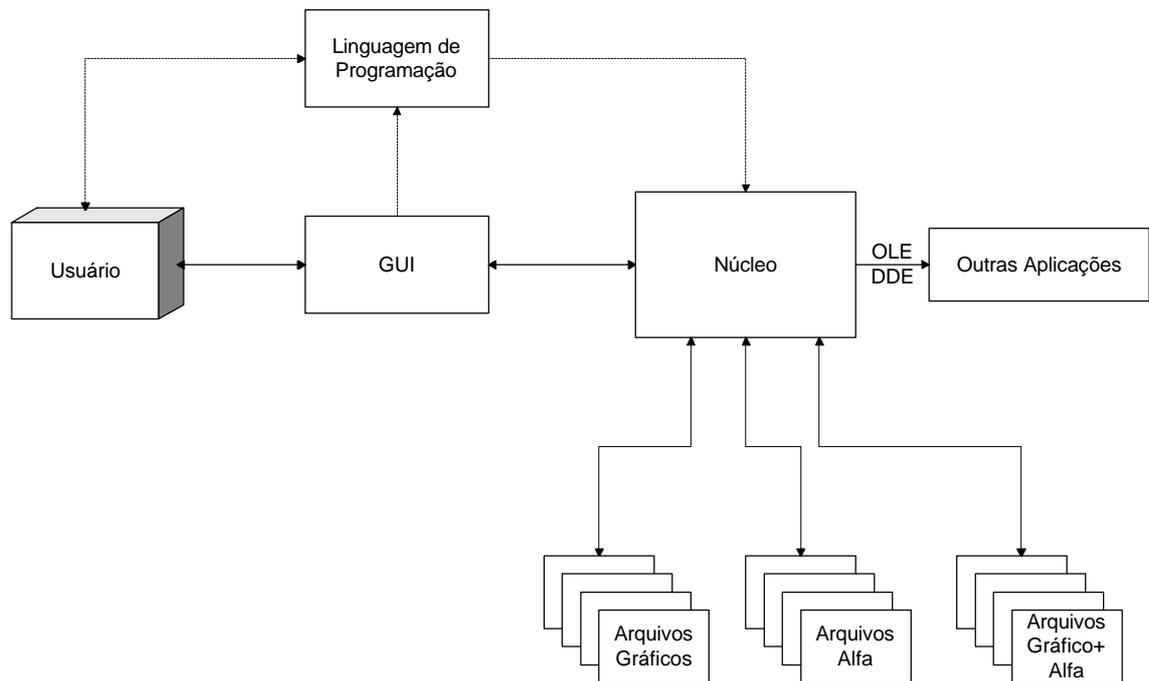


Figura 3.7 - Desktop mapping

Resumo das características principais:

- Geralmente baseado em micro, em ambiente Windows, concentra esforços em uma boa interface de usuário e em recursos para produção de mapas para apresentação
- Funcionamento utilizando arquivos externos, desestruturados e independentes
- Ausência de um forte gerenciador de informações gráficas ou alfanuméricas, mas pode em geral comunicar-se com gerenciadores existentes

Exemplos: MapInfo, Maptitude

3.3.7 SIG Baseado em Imagens

Esta é uma classe de aplicações em que o verdadeiro “banco de dados” está na imagem e seus atributos. Assim, não existe um SGBD propriamente dito, apenas um conjunto de arquivos de imagem, codificados de maneira conveniente, tanto em termos de ocupação de espaço em disco quanto em termos de facilidades de recuperação (Figura 3.8).

No entanto, muitas vezes é necessário associar um conjunto de informações alfanuméricas a uma imagem ou a partes dela. O recurso que é geralmente empregado por este tipo de SIG é a criação de objetos vetoriais, que podem ou não ser apresentados em sobreposição à imagem. Estes objetos podem ser dos tipos usuais, ou seja, pontos, linhas ou áreas, mas em no caso de áreas e linhas existe um “centróide”, que é um único ponto contido na linha ou área, e que é escolhido para ser o “ponto de referência” dos dados alfanuméricos correspondentes. Assim, cada elemento geográfico com possibilidade de associação a dados alfanuméricos é associado ao centróide, que por sua vez está representado no banco de dados alfanumérico, em geral relacional.

Estes sistemas podem ou não possuir linguagem de programação, uma vez que a funcionalidade que interessa mais diretamente ao usuário está mais ligada à área de processamento digital de imagens. No entanto, são dotados de interfaces gráficas com o usuário, que transmitem os comandos do usuário ao núcleo.

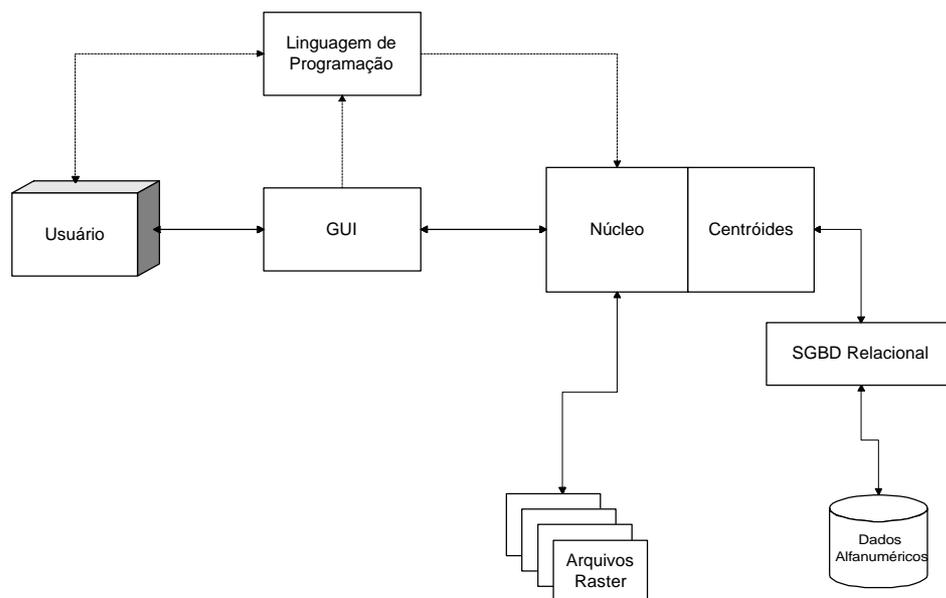


Figura 3.8 - SIG baseado em imagens

Resumo das características principais:

- Informações gráficas são geralmente armazenadas como arquivos independentes, devido aos grandes volumes
- Comunica-se com um banco de dados relacional externo por meio de “vetores” que são definidos sobre a imagem

Exemplos: SPANS, IDRISI, ERDAS.

3.3.8 SIG Integrado (Matrizes-Vetores)

Na área ambiental, onde é grande a necessidade de integração de dados de diferentes formatos, como imagens, mapas temáticos e modelos de terreno, uma das tendências vem sendo o desenvolvimento de tecnologias que permitam o tratamento simultâneo de dados matriciais (grades e imagens), com dados vetoriais. Devido à grande quantidade de armazenamento necessária para imagens, e dado que os SGBDs de mercado ainda não possuem suporte eficiente para este tipo de dados, os SIGs integrados são, na maior parte dos casos, uma extensão do modelo de "arquitetura dual" para incluir gerenciamento de arquivos gráficos no formato matricial ("raster").

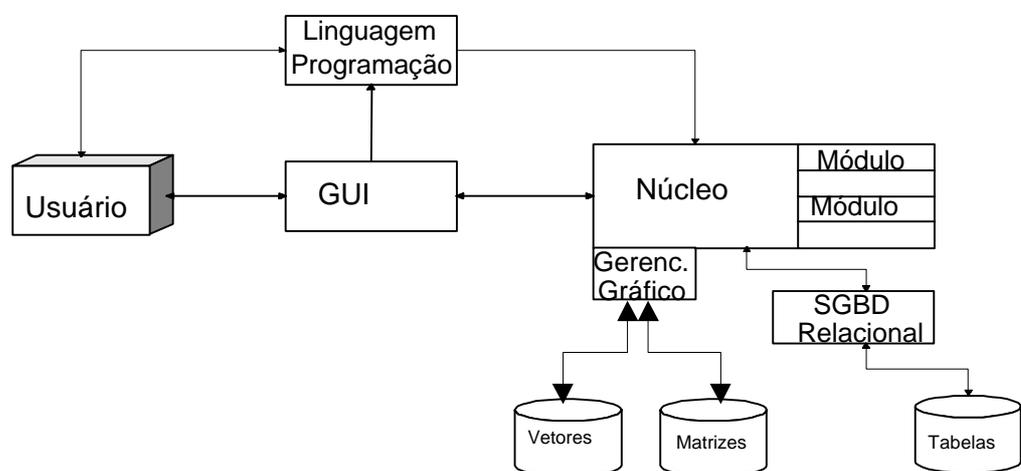


Figura 3.9 - SIG Integrado

Resumo das características principais:

- Gerenciamento em separado de dados gráficos e tabelas
- Armazenamento de gráficos em estruturas proprietárias
- Armazenamento de dados alfanuméricos em banco de dados relacional
- Capacidade de processar dados vetoriais, grades e imagens

Exemplos: SPRING, ARC/VIEW (com extensões "Spatial Analyst" e "Image Extension").

3.3.9 Acesso a Dados Geográficos via Internet

Uma das linhas de pesquisa e desenvolvimento em geoprocessamento que mais vem despertando o interesse da comunidade é o acesso a dados geográficos via Internet. Como em qualquer linha de desenvolvimento recente, existem diversos tipos de enfoques e nenhum vencedor claro.

Uma das alternativas mais adotadas consiste em oferecer ao usuário, através de um *browser*, um formulário para preenchimento. Neste formulário são solicitadas informações quanto à região geográfica de interesse (muitas vezes solicitando uma referência explícita a um número de mapa), à composição do mapa (camadas que deverão aparecer) e mesmo alguns elementos de composição visual (cores, espessura de linhas, cores ou hachuras de preenchimento). Quando o usuário termina o preenchimento do formulário, as informações são transmitidas para um servidor, que recupera os dados necessários e converte o mapa final para um formato de imagem, como GIF ou JPEG. Esta imagem é então inserida numa página Web criada instantaneamente, e transmitida para o usuário. Este processo é talvez o mais natural do ponto de vista dos *browsers*, uma vez que lida com a apresentação de imagens, coisa que qualquer *browser* é capaz de fazer. No entanto, é uma alternativa problemática, por diversos motivos. Em primeiro lugar, porque não deixa o usuário “navegar” interativamente pelo mapa. Além disso, a transmissão de imagens é em geral demorada, e realizada de forma repetitiva tende a sobrecarregar os recursos de rede. Por fim, existe o problema de sobrecarga no servidor, que precisa construir o mapa em formato imagem, geralmente a partir de um banco de dados vetorial, e transmiti-lo para o cliente. Note-se que qualquer operação simples, como *zoom* ou *pan*, exige a formação de um novo mapa-imagem e nova transmissão.

Outra alternativa é a que apresenta para o usuário um mapa chave, solicitando que indique, com o *mouse*, qual é a região de seu interesse. Esta abordagem permite um grau um pouco maior de flexibilidade, mas não resolve os problemas principais da alternativa anterior, ou seja, custos de processamento e transmissão, além de não

resolver completamente o problema de navegação. Em ambos os casos, o grau de interatividade com o usuário na escolha da região desejada é muito baixo, e o resultado está restrito a um modelo de fragmentação do espaço que foi previamente decidido.

Mais interessante do que a transmissão de imagens seria a transmissão de objetos geográficos com representação vetorial. Desta maneira, o usuário poderia ser livre para decidir a região de interesse, bem como para ativar ou desativar as camadas que deseja. Idealmente, os objetos vetoriais transmitidos seriam armazenados na memória da máquina cliente, para que pudessem ser reaproveitados no caso de operações de *zoom* ou *pan*, ganhando tempo para aumentar a interatividade. Outra possibilidade interessante é a aplicação ao mapa vetorial do conceito de “hipermapa”, simulando nos símbolos e objetos vetoriais disponíveis a operação dos *links* de hipertexto comuns nas páginas da Web. Assim, bastaria por exemplo clicar sobre o símbolo de um hospital para consultar seus dados alfanuméricos associados.

A transmissão de dados geográficos em formato vetorial pela Internet tem um obstáculo: nenhum dos *browsers*, as ferramentas de navegação na Internet por excelência, está preparado para receber e apresentar informações neste formato. Para que isto seja possível, existem duas alternativas. A primeira, que vem sendo adotada por diversos desenvolvedores de SIG, consiste em criar um *plug-in*, ou seja, um programa que funciona no computador do usuário, conectado ao *browser*. Este *plug-in* reconhece os dados vetoriais à medida em que chegam, geralmente agrupados em um arquivo com extensão padronizada, e os exibe na tela. Esta alternativa tem a desvantagem de exigir a transmissão (*download*) dos *plug-ins* a partir do *site* do desenvolvedor, o que pode ser uma operação demorada (os *plug-ins* mais comuns têm por volta de 1 Mbyte). Além disso, exige a execução de um procedimento de instalação. Como os *plug-ins* são específicos para os principais *browsers* do mercado, que estão em constante evolução, é preciso atualizá-los periodicamente.

A outra alternativa consiste em criar uma aplicação na linguagem Java [2], que será transmitida no momento do acesso e executada na máquina do usuário, dispensando procedimentos complicados de instalação ou mesmo a ocupação de área em disco. A aplicação desaparece da máquina do usuário no momento em que é desativada. Assim, novas versões não precisam ser distribuídas, pois estarão disponíveis instantaneamente a partir do momento de sua instalação no servidor. Os dados são recebidos e tratados objeto por objeto, facilitando a implementação de caches locais. Cada objeto precisa ser transmitido uma única vez, sendo que operações posteriores de *zoom* ou *pan* podem apenas utilizar os dados já presentes na cache. Um exemplo desta arquitetura está apresentado na Figura 3.9.

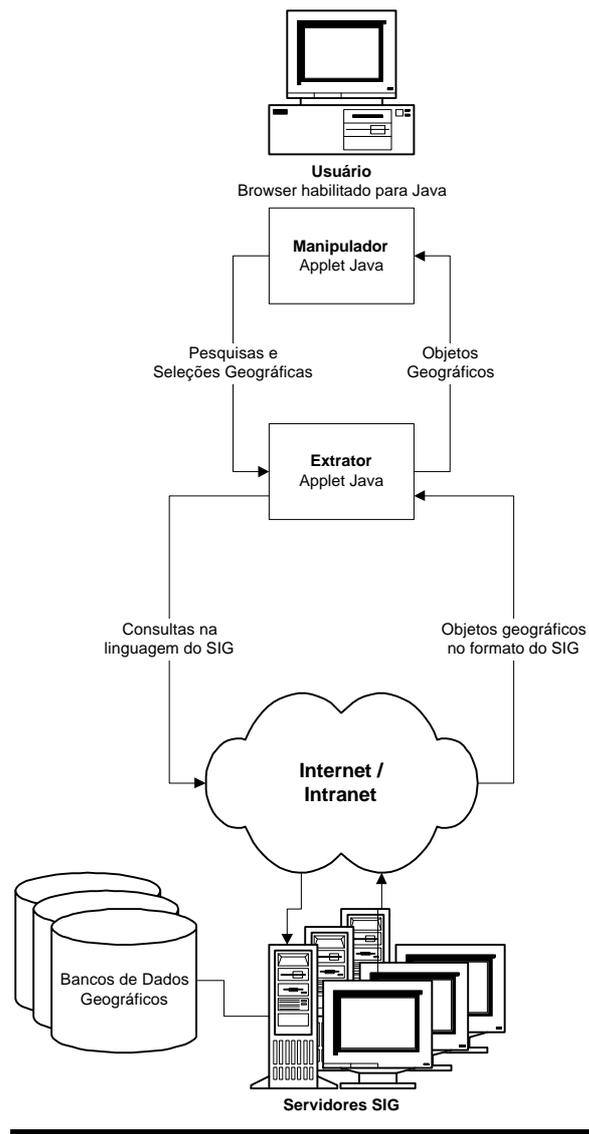


Figura 3.9 - Acesso a dados geográficos via Internet

3.3.10 Open GIS: Interoperabilidade em GIS

A quantidade de dados geográficos disponíveis em formato digital é bastante grande, e vem crescendo rapidamente. Durante o período em que estes dados geográficos vêm sendo coletados (aproximadamente nos últimos 30 anos), diferentes alternativas tecnológicas foram adotadas para a aquisição, o armazenamento, o processamento, a análise e a visualização destes dados, em geral em esforços isolados e independentes uns dos outros.

Com a evolução do geoprocessamento, é cada vez mais marcante a necessidade de se utilizar estes dados, cuja coleta e manutenção são bastante caros, para o maior número de aplicações diferentes possível. Por exemplo, se uma prefeitura mapeia em um GIS as ruas da cidade, porque não utilizar estes dados na companhia de energia elétrica, ou na companhia de telecomunicações? Muitas vezes isto não é possível, ou pelo menos é dificultado fortemente, pela adoção de diferentes plataformas de hardware e software, cada uma das quais utilizando um formato ou conjunto de formatos de armazenamento das informações geográficas digitais. Transferir dados de um formato para o outro nem sempre é simples, mas poderia ser realizado utilizando programas tradutores, capazes de ler as informações codificadas em um formato específico e regravá-las em um formato padrão, e vice-versa. No entanto, a experiência mostra que raramente se consegue uma tradução perfeita, livre de erros. Além disso, os formatos padronizados hoje utilizados têm uma capacidade muitas vezes insuficiente para representar todos os detalhes das informações geográficas que são necessários.

Outra situação que pode ocorrer é aquela em que todos os usuários dispõem do mesmo GIS, mas os métodos e padrões utilizados para a coleta e a manutenção dos dados inviabilizam sua utilização em conjunto. Por exemplo, um dos usuários pode ter um grau de exigência maior com relação à precisão cartográfica que os demais. Outros problemas que podem impedir ou inviabilizar o intercâmbio de informações incluem diferenças de sistemas de projeção ou de *datum*, unidades de medida, métodos para produção de estimativas, e ainda diferenças entre os conceitos utilizados por cada usuário na criação e manutenção de seus dados. Para completar, ainda poderão existir dificuldades no que diz respeito às políticas de disponibilização dos dados adotadas por cada usuário: mídia de gravação, política de comercialização de dados, limitações quanto ao repasse dos dados para terceiros, e assim por diante.

Todas estas dificuldades estão no caminho da interoperabilidade entre aplicações distintas de geoprocessamento, e ocorrem em todo o mundo. Para buscar uma solução para estes problemas, foi criado em 1994 o *Open GIS Consortium* (OGC), a partir da associação de representantes dos desenvolvedores de software, das universidades e dos diversos níveis de governo, provenientes de diversos países, especialmente os Estados Unidos e a Europa. Este consórcio está elaborando um padrão denominado OGIS (*Open Geodata Interoperability Specification*), que é uma especificação abrangente da arquitetura de software para acesso distribuído a dados geo-espaciais e a recursos de geoprocessamento em geral [1]. Esta arquitetura é composta de três partes principais:

- ***Open Geodata Model*** (OGM), que busca uma maneira comum de representar a Terra e fenômenos relacionados a ela, matematicamente e conceitualmente;

- **OGIS Services Model**, que é um modelo de especificação para a implementação de serviços de acesso a dados geográficos, incluindo seu gerenciamento, manipulação, representação e compartilhamento;
- **Information Communities Model**, um arcabouço para utilização do OGM e do OGIS Services Model para resolver não apenas os problemas técnicos de interoperabilidade, mas também os problemas inter-institucionais que interferem no processo.

A idéia principal por trás do OGIS é o estabelecimento de um padrão comum para transferência de dados geográficos entre aplicações, estabelecendo uma “camada” de padronização entre clientes e servidores de informações geográficas. Isto possibilitará o acesso a qualquer banco de dados geográfico (cujo gerenciador atenda ao modelo OGIS) por parte de qualquer aplicação, como um GIS, um CAD ou um software *Desktop mapping*. O servidor poderá mesmo ser um SGBD relacional, um SGBD orientado a objetos, ou mesmo o gerenciador geográfico proprietário de algum software, como o ARC/INFO ou o Vision. Assim, usuários de GIS que dispõem de um produto específico poderiam acessar dados mantidos em uma ampla variedade de produtos, através de uma interface padronizada.

3.4 FUNCIONALIDADE

3.4.1 Funcionalidade Básica

De modo geral, cada GIS foi originalmente projetado para resolver um conjunto específico de problemas, tendo depois evoluído para se tornar uma ferramenta de uso mais amplo. Esta vocação original dos softwares não limita, propriamente, seu escopo de aplicação, mas o fato é que cada um terá seus pontos fortes e pontos fracos. No entanto, existem funções que são características dos GIS, e que podem ser encontradas em qualquer software. O que varia, no caso, é a qualidade e a confiabilidade da implementação. De qualquer forma, a disponibilidade destes tipos de recursos pode ser suficiente para garantir o sucesso de muitas aplicações. Em geral, qualquer GIS é capaz de:

1. Representar graficamente informações de natureza espacial, associando a estes gráficos informações alfanuméricas tradicionais. Representar informações gráficas sob a forma de vetores (pontos, linhas e polígonos) e/ou imagens digitais (matrizes de pixels).
2. Recuperar informações com base em critérios alfanuméricos, à semelhança de um sistema de gerenciamento de bancos de dados tradicional, e com base em relações espaciais topológicas, tais como continência, adjacência e interceptação.
3. Realizar operações de aritmética de polígonos, tais como união, interseção e diferença. Gerar polígonos paralelos (*buffers*) ao redor de elementos ponto, linha e polígono.
4. Limitar o acesso e controlar a entrada de dados através de um modelo de dados, previamente construído.
5. Oferecer recursos para a visualização dos dados geográficos na tela do computador, utilizando para isto uma variedade de cores.
6. Interagir com o usuário através de uma interface amigável, geralmente gráfica.
7. Recuperar de forma ágil as informações geográficas, com o uso de algoritmos de indexação espacial.
8. Possibilitar a importação e exportação de dados de/para outros sistemas semelhantes, ou para outros softwares gráficos.
9. Oferecer recursos para a entrada e manutenção de dados, utilizando equipamentos como mouse, mesa digitalizadora e *scanner*.

10. Oferecer recursos para a composição de saídas e geração de resultados sob a forma de mapas, gráficos e tabelas, para uma variedade de dispositivos, como impressoras e *plotters*.
11. Oferecer recursos para o desenvolvimento de aplicativos específicos, de acordo com as necessidades do usuário, utilizando para isto alguma linguagem de programação, inclusive possibilitando a customização da interface do GIS com o usuário.

Todos estes recursos podem ser agrupados em categorias, para facilitar a comparação entre diferentes sistemas. Estas categorias básicas são: entrada de dados, gerenciamento de informações, recuperação de informações, manipulação e análise, e exibição e produção de saídas. Cada uma destas categorias será apresentada a seguir.

3.4.2 *Entrada de Dados*

Ao contrário de sistemas de banco de dados convencionais, o GIS é capaz de armazenar informações variadas, de natureza gráfica, como vetores e imagens. Para isto, é necessário que o GIS conte com módulos ou interfaces que permitam que o usuário possa incorporar dados ao GIS e visualizar graficamente estes dados. Além disto, o sistema precisa ser capaz de detectar falhas e incorreções nos dados gráficos, e sinalizá-los para o usuário antes de deixar que dados incorretos ou inconsistentes sejam incorporados ao banco de dados geográfico. Em resumo, o GIS precisa ser capaz de:

1. Permitir a digitalização de dados gráficos em formato vetorial, provendo os meios para associação (ou digitação) das informações alfanuméricas correspondentes. Para isto, precisa permitir a utilização de quaisquer tipos de dispositivos de entrada de dados, como mesas digitalizadoras, mouse, teclado (digitação de coordenadas), etc.;
2. Permitir a associação de imagens digitais ao banco de dados, através de recursos de georreferenciamento de imagens ou mesmo através da integração da imagem ao banco. Para isto, precisa ser capaz de converter ou traduzir arquivos de imagem codificados em diversos formatos distintos para o formato adotado por ele;
3. Realizar análises de consistência sobre os dados vetoriais, visando detectar incorreções na topologia ou inconsistências com relação ao modelo de dados. Estas incorreções incluem: erros de fechamento topológico (elementos poligonais), superposições indesejáveis, undershoots, overshoots, etc.;
4. Realizar procedimentos de “limpeza” ou correção sobre os dados adquiridos, visando melhorar sua qualidade e prepará-los para a incorporação ao banco de dados geográfico. Estes procedimentos incluem *edge matching*, eliminação de vértices desnecessários, suavização de curvas, etc.;

5. Receber, converter e tratar dados provenientes de outros sistemas de informação, geográficos ou não, gráficos ou não, a partir de arquivos de formato padronizado.

As funções de entrada de dados continuam a demandar uma fração desproporcionada dos recursos para a implantação de um GIS [11]. Seu custo é às vezes um impedimento para a adoção de GIS em organizações. O que distingue os vários enfoques com relação à entrada de dados é o grau de automatização alcançado. Processos manuais são bastante propensos a erros, apesar da sofisticação dos dispositivos e software disponíveis, e a solução destes erros por procedimentos automáticos é lenta e custosa. A digitalização por processos mais automatizados (digitalização semi-automática e automática) é economicamente interessante e vai se tornar cada vez mais viável, à medida em que cresce o custo de mão-de-obra e decresce o custo de equipamentos e software.

3.4.3 Gerenciamento e Recuperação de Informações

Uma vez formada a base de dados geográficos, o GIS precisa ser capaz de gerenciá-la. Isto significa ser capaz de:

- manter a consistência da base de dados através das operações realizadas pelos usuários;
- controlar o acesso concorrente (simultâneo) aos dados;
- garantir a integridade da relação gráfico-alfa;
- executar operações de backup e recuperação de informações;
- garantir a recuperação total ou parcial do banco em caso de falhas;
- garantir a segurança no acesso às informações contidas no banco, impedindo acessos não autorizados e limitando o acesso a dados sensíveis.

De modo geral, todas as tarefas acima são típicas de sistemas gerenciadores de bancos de dados de primeira linha. No caso de GIS, existe a complexidade adicional da incorporação de dados gráficos e da necessidade de garantia da integridade gráfico-alfa.

Naturalmente, o GIS precisa garantir aos usuários o acesso eficiente e rápido às informações que ele gerencia. Para isto, é necessário dispor de alguns recursos que viabilizem a execução da tarefa, notadamente recursos e técnicas que organizem a informação no banco de dados de maneira inteligente e que privilegiem a eficiência na recuperação de informações. Estas técnicas incluem a indexação espacial, que procura organizar as informações por proximidade geográfica. Também são necessários recursos que facilitem a formulação de consultas por parte do usuário. Estes tipicamente incluem uma linguagem de pesquisa, como o SQL, enriquecido por comandos e operadores de

natureza espacial, e recursos de interface gráfica com o usuário, que procuram evitar que o usuário tenha que decorar seqüências de comandos e dominar a sintaxe de uma linguagem complexa.

3.4.4 Manipulação e Análise

As funções de manipulação e análise de dados geográficos podem ser agrupadas de acordo com o tipo de dado tratado (correspondente a uma geometria distinta): *análise geográfica, processamento de imagens, modelagem de terreno, redes, geodésia e fotogrametria*, produção cartográfica. A seguir apresentaremos uma breve descrição destas funções.

- *Análise Geográfica*: permite a combinação de informações temáticas. Pode ser realizada no domínio vetorial ou domínio matricial (“raster”). Um conjunto importante de procedimentos de análise geográfica foi definido por Tomlin (1990). Denominado “Álgebra de Mapas”, estas definições são a base de implementações de operadores de análise em diferentes sistemas.

Estas funções incluem:

- Reclassificação;
 - Intersecção (“overlay”);
 - Operações, booleanas e matemáticas entre mapas; e
 - Consulta ao banco de dados.
-
- *Processamento Digital de Imagens*: tratamento de imagens de satélite e de “scanners”. Com o advento de Satélites de Alta Resolução e de técnicas de Fotogrametria Digital, as imagens de satélite e aerotransportadas estão se transformando cada vez mais úteis para estudos ambientais e cadastrais. Entre as funções necessárias estão:
 - Realce por modificação de histograma;
 - Filtragem espacial;
 - Classificação estatística por máxima verossimilhança;
 - Rotação espectral (componentes principais);
 - Transformação IHS-RGB; e
 - Registro.

- *Modelagem Numérica do Terreno*: Permite cálculo de declividade, volume, cortes transversais, linha de visada. Fundamental para aplicações de engenharia, o conjunto básico consta de:
 - Determinação do modelo (grade regular ou triangular) a partir de pontos espaçados ou linhas;
 - Geração de mapas de contorno (isolinhas);
 - Geração de mapas de declividade e de aspecto;
 - Visualização 3D (com imagens e temas);
 - Cálculo de volumes; e
 - Análise de perfis.

- *Geodésia e Fotogrametria*: Permite a realização, por software, de procedimentos de restituição e ortorectificação digital, antes, executados por equipamentos analógicos. Fundamental para uso em aplicações de cartografia automatizada e atualização de mapeamentos.

- *Modelagem de Redes*: O pacote mínimo disponível nos sistemas comerciais consiste tipicamente de cálculo de caminho ótimo e crítico. Este pacote básico é insuficiente para a realização da maioria das aplicações, pois cada usuário tem necessidades completamente distintas. No caso de um sistema telefônico, uma questão pode ser: “quais são todos os telefones servidos por uma dada caixa terminal?”. Já para uma rede de água, pode-se perguntar: “Se injetarmos uma dada porcentagem de cloro na caixa d’água de um bairro, qual a concentração final nas casas?”. Deste modo, um sistema de modelagem de redes só terá utilidade para o cliente depois de devidamente adaptado às suas necessidades. Esta adaptação pode levar de seis meses a vários anos. Isto impõe uma característica básica para esta aplicação, ou seja, os sistemas devem ser versáteis, maleáveis, e adaptáveis. No caso das aplicações de redes, a ligação com banco de dados é fundamental. Toda a informação descritiva está guardada no banco de dados, pois os dados espaciais têm formatos relativamente simples. Mais do que em outras aplicações de SIG’s, é na área de redes que o uso de soluções mais modernas como SGBD’s orientados-a-objetos está se impondo.

3.4.5 Exibição e Produção Cartográfica

Os enfoques adotados pelos GIS com relação à saída de dados tendem a se concentrar em duas categorias: a que prioriza a produção e a que prioriza os recursos de consulta. Na primeira, a ênfase é na produção automatizada de mapas em papel, tabelas e relatórios, enquanto na segunda o interesse gira em torno da resposta interativa do sistema às demandas do usuário.

No caso de plotagem, algumas SIG's dispõem de ferramentas para produção de cartas, com recursos muitas vezes altamente sofisticados de apresentação gráfica. Estas ferramentas permitem a definição interativa de uma área de plotagem, colocar legendas, textos explicativos e notas de crédito. Uma biblioteca de símbolos é também atributo fundamental de um sistema de produção. Os pacotes mais sofisticados dispõem de controladores para dispositivos de gravação eletrônica a laser, o que assegura a produção de mapas de alta qualidade.

3.5 NECESSIDADES DE APLICAÇÕES DE GEOPROCESSAMENTO

Numa visão bastante geral, podemos dividir o setor de Geoprocessamento no Brasil em seis segmentos:

- *Cadastral*: aplicações de cadastro urbano e rural, realizadas tipicamente por Prefeituras, em escalas que usualmente variam de 1:1.000 a 1:20.000. A capacidade básica de SIG's para atender este setor é dispor de funções de consulta a bancos de dados espaciais e apresentação de mapas e imagens.
- *Cartografia Automatizada*: realizada por instituições produtoras de mapeamento básico e temático. Neste caso, é essencial dispor de ferramentas de aerofotogrametria digital e técnicas sofisticadas de entrada de dados (como digitalizadores ópticos) e de produção de mapas (como gravadores de filme de alta resolução).
- *Ambiental*: instituições ligadas às áreas de Agricultura, Meio-Ambiente, Ecologia e Planejamento Regional, que lidam com escalas típicas de 1:10.000 a 1:500.000. As capacidades básicas do SIG's para atender a este segmento são: integração de dados, gerenciamento e conversão entre projeções cartográficas, modelagem numérica de terreno, processamento de imagens e geração de cartas.

- *Concessionárias/Redes*: neste segmento, temos as concessionárias de serviços (Água, Energia Elétrica, Telefonia). As escalas de trabalho típicas variam entre 1:1.000 a 1:5.000. Cada aplicação de rede tem características próprias e com alta dependência de cada usuário. Os SIG's para redes devem apresentar duas características básicas: a forte ligação com bancos de dados relacionais e a capacidade de adaptação e personalização. O pacote básico disponível com os SIG's deste segmento é insuficiente para a realização da maioria das aplicações, pois cada usuário tem necessidades completamente distintas. Assim, os usuários deste setor realizam significativos desenvolvimentos nas linguagens de aplicação do SIG escolhido.
- *Planejamento Rural*: neste segmento, temos as empresas agropecuárias que necessitam planejar a produção e distribuição de seus produtos. As escalas de trabalho típicas variam entre 1:1.000 a 1:50.000. Cada aplicação tem características próprias e com alta dependência de cada usuário. Os SIG's devem apresentar duas características básicas: a forte ligação com bancos de dados relacionais e a capacidade de adaptação. O pacote básico disponível com os SIG's deste segmento é insuficiente para a realização da maioria das aplicações, pois cada usuário tem necessidades completamente distintas. Assim, os usuários deste setor realizam significativos desenvolvimentos nas linguagens de aplicação do SIG escolhido.
- *Business Geographic*: neste segmento, temos as empresas que necessitam distribuir equipes de vendas e promoção ou localizar novos nichos de mercado. As escalas de trabalho típicas variam entre 1:1.000 a 1:10.000. Cada aplicação tem características próprias e com alta dependência de cada usuário. As ferramentas de SIG devem prover meios de apresentação dos bancos de dados espaciais para fins de planejamento de negócios. Em especial, os SIG's devem ser adaptados ao cliente, com ferramentas de particionamento e segmentação do espaço para a localização de novos negócios e alocação de equipes.

Pode-se constatar que cada segmento apresenta características próprias e requer soluções específicas, fato nem sempre compreendido pelos usuários. Na área de Geoprocessamento, a distância entre a compra do software e um resultado operacional por parte do usuário é muito grande, pois envolve aspectos como a geração de dados geográficos, disponibilidade de metodologias de trabalho adequadas e mecanismos de divulgação dos resultados obtidos.

Com base na discussão apresentada nesta seção, a Tabela 4.1. apresenta os requisitos típicos de cada grupo de usuário, considerando grandes áreas de aplicação. Não é supérfluo advertir de que se trata de uma indicação de caráter geral e que cada

usuário deverá examinar em detalhe suas necessidades e compará-las com as características dos sistemas disponíveis no mercado.

Tabela 4.1.

Necessidades típicas de aplicações de Geoprocessamento

APLICAÇÃO	ANG	PDI	MNT	RED	BDG	MAP	GEO
Cadastral	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cartografia	-	✓	✓	-	(✓)	✓	✓
Ambiental	✓	✓	✓	(✓)	(✓)	✓	(✓)
Concession.	-	-	-	✓	✓	-	(✓)
Rural	-	✓	✓	(✓)	✓	✓	-
Business	-	-	-	✓	✓	✓	-

Códigos:

ANG = análise geográfica

BDG = consulta a BD. georreferenciados

PDI = processamento digital de imagens

MAP = produção cartográfica

MNT = modelos numéricos de terreno

GEO = geodésia e fotogrametria

RED = modelagem de redes

Legenda: ✓ = normalmente necessário - = usualmente não necessário.

(✓) = necessário para usos específicos .

3.6 DISPONIBILIDADE E CARACTERÍSTICAS DE GIS DO MERCADO

Atualmente, existem representantes brasileiros para praticamente todos os principais sistemas de informação geográfica, disponíveis principalmente nos Estados Unidos e Europa. A tabela abaixo lista alguns dos mais conhecidos sistemas GIS e *desktop mapping* comerciais, indicando as formas de armazenamento de informações gráficas e alfanuméricas, e o tipo de equipamento necessário. Foram intencionalmente deixados de fora os sistemas CAD que podem eventualmente ser utilizados em cartografia automatizada ou coisa semelhante, e também os sistemas dedicados ao sensoriamento remoto. Todos os softwares abaixo relacionados possuem condições para interligação de dados gráficos com dados alfanuméricos, armazenados em bases de dados proprietárias ou não.

GIS Fabricante	Estruturas de Dados	Banco de Dados	Equipamentos	Observações
APIC APIC Systèmes	Vetorial Matricial	Orientado a objetos	UNIX, Windows	Produzido na França, tem muitas instalações na Europa
ARC/INFO ESRI	Vetorial topológica Matricial	Relacional	UNIX, Windows	Produtos complementares incluem o Arc/CAD (apoiado em AutoCad) e o Arc/View (ferramenta de consulta)
AutoDesk World (AutoDesk)	Vetorial	Relacional	Windows	Capaz de ler diretamente arquivos de diversos GIS
DBMapa MaxiData	Vetorial	xBASE	Windows	Apoiado no MaxiCAD
Genasys Genasys	Matricial Vetorial	Relacional	UNIX, Windows	
GIS Plus Caliper	Vetorial	Relacional	Windows	O TransCAD, especializado em transportes, é baseado no GIS Plus
IDRISI Clarkk University	Matricial	Proprietário	Windows	Muito voltado para Aplicações Ambientais
MapInfo MapInfo	Vetorial	Proprietário, xBASE	Windows	Principalmente utilizado como ferramenta de Desktop Mapping
Maptitude Caliper	Matricial Vetorial	Relacional	Windows	Mais usado como desktop mapping
MGE Intergraph	Vetorial Matricial	Relacional	UNIX, Windows	Baseado no sistema de CAD MicroStation
SPRING INPE	Matricial Vetorial	Relacional	UNIX, Windows	Permite uma integração entre vetores e imagens
Vision*GIS System House	Vetorial Matricial	Relacional	UNIX	pioneiros no armazenamento de gráficos dentro do banco de dados relacional

3.6.1 Critérios para a Escolha de um GIS

De modo geral, cada software foi originalmente projetado para resolver um conjunto específico de problemas em geoprocessamento. Esta vocação original dos softwares não limita, propriamente, seu escopo de aplicação, mas o fato é que cada um terá seus pontos fortes e pontos fracos. Não se pode dizer que qualquer um deles é perfeitamente adequado para qualquer aplicação, nem que corresponde perfeitamente aos objetivos a que teoricamente atende.

Sendo assim, como escolher um GIS adequado às suas necessidades? O melhor caminho é o de focalizar os esforços na identificação destas necessidades, graduando sua importância para a aplicação. Desta forma, será possível analisar objetivamente os softwares candidatos a resolver o problema, pontuando suas aptidões de acordo com a escala de prioridades previamente composta. Conforme já dito, não se deve esperar encontrar um sistema que preencha perfeitamente as necessidades do projeto, pois este sistema provavelmente não existe. A compreensão deste fato deve levar a uma maior flexibilidade na elaboração das especificações para aquisição do software.

Conforme foi visto, a grande variedade de GIS disponíveis no mercado brasileiro exige que um eventual comprador esteja bem a par de suas necessidades, para que seja capaz de especificar o software com sucesso. Características que devem ser investigadas em cada software candidato, de acordo com o interesse, e para testar sua adequação às necessidades do projeto, incluem:

1. Possibilidades de customização da interface com o usuário (redefinição da estrutura de menus e diálogos; inclusão de funções desenvolvidas pelo usuário)
2. Flexibilidade da modelagem de dados
3. Existência ou não de linguagem de programação para desenvolvimento de aplicativos; complexidade e completeza da linguagem de programação
4. Existência ou não de versão em português; disponibilidade de documentação e/ou material de treinamento em português
5. Armazenamento dos dados em base de dados geográfica contínua ou necessidade de fracionamento em mapas
6. Existência ou não de restrições e controles de integridade na conexão gráfico-alfa
7. Existência ou não de sistemas de indexação espacial, para recuperação rápida de informações gráficas; tipo de sistema de indexação espacial
8. Disponibilidade de aplicações prontas, desenvolvidas por terceiros, na área de interesse do projeto

9. Capacidades de importação e exportação de dados
10. Possibilidades de operação em redes heterogêneas de equipamentos (utilização simultânea de equipamentos de diversos fabricantes diferentes)
11. Capacidades de produção de saídas: mapas, cartas, mapas temáticos, gráficos, relatórios, etc.
12. Recursos para conversão de dados
13. Capacidades de operação simultânea por diversos usuários
14. Aderência a padrões de fato ou de direito, principalmente nas áreas de bancos de dados e intercâmbio de informações
15. Recursos de gerenciamento de backups e recuperação de dados
16. Existência ou não de linguagem de consulta à base gráfica/alfanumérica
17. Recursos de processamento de polígonos (operações de união, interseção, etc.)
18. Recursos de detecção e correção de falhas nos dados gráficos (edge-matching, eliminação de undershoots e overshoots, etc.)
19. Variedade de tipos de dispositivos de saída (plotters e impressoras) e de entrada (scanners, mesas digitalizadoras, etc.)
20. Confiabilidade comercial e técnica do representante e sua equipe de suporte.

3.6.2 Tendências em Software GIS

Dentro dos caminhos trilhados pelos GIS nos últimos anos, algumas tendências parecem ser definitivas. As principais estão listadas a seguir.

Software de Baixo Custo

A primeira delas é o direcionamento dos produtores de software GIS para o desenvolvimento de alternativas de software bastante simplificados. A idéia é promover uma popularização do uso da informação espacial, através de ferramentas simples e baratas, apoiadas em microcomputadores, que geralmente não funcionam sozinhas, mas acopladas em rede a servidores de dados espaciais mais poderosos. Aumenta a capilaridade, e portanto o alcance, do GIS dentro da organização, a custos bastante reduzidos.

Uso de Imagens

Outra tendência observada é a intensificação do uso de imagens digitais como informação complementar à informação vetorial. Cada vez mais, o uso de imagens (*raster*) torna-se economicamente interessante e tecnicamente viável, pois a evolução do hardware fez com que os custos de armazenamento e processamento de grandes volumes de imagens fossem drasticamente reduzidos. Em especial, espera-se um incremento no uso de ortofotos digitais e imagens de satélite, estas últimas com impulso maior a partir do lançamento de satélites com sensores de resolução mais alta.

Orientação a Objetos

A orientação a objetos é uma tendência mundial em termos de programação e desenvolvimento de sistemas. Aplicados à área de bancos de dados, os conceitos de orientação a objetos levam à definição mais racional, mais próxima do mundo real, de modelos e estruturas de dados. Isto é especialmente benéfico no caso dos GIS, uma vez que as informações que manipulam, devido às suas características espaciais, são difíceis de modelar utilizando as técnicas tradicionais [6]. Modelos de dados geográficos são mais intuitivos para o analista e para o usuário, e seu uso ajudará a reduzir o tempo de desenvolvimento de aplicativos geográficos.

Padronização do Intercâmbio de Dados Geográficos

Mais que uma tendência, a padronização do intercâmbio de dados geográficos tornou-se uma necessidade. Como a tendência de cada organização é adotar o GIS que melhor atende às suas necessidades, a inexistência de normas e padrões para troca de informação geográfica faz com que seja muito mais difícil compartilhar dados e racionalizar esforços de levantamento e tratamento de informações entre usuários de sistemas distintos. Algumas propostas de solução vêm sido colocadas, mas ainda será necessário algum tempo até que este problema seja resolvido.

Dados Geográficos na Internet

Diversos desenvolvedores de GIS têm lançado produtos para prover acesso, via Internet, a bases de dados geográficas. Considerando a crescente popularização da Internet, e a necessidade dos órgãos públicos em viabilizar o acesso do cidadão à informação, este caminho parece ser bastante importante.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DE DADOS EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Este Capítulo possui três objetivos fundamentais. O primeiro visa realizar uma investigação sobre a forma como o conhecimento geográfico foi modelado e implementado em três SIGs de mercado: MGE, Arc/Info e SPRING. O segundo objetivo visa descrever os conceitos que envolvem o OPENGIS, mais especificamente *feição* e *coverage*. O terceiro busca realizar uma comparação entre os três SIGs apresentados, tendo como referência os conceitos do OPENGIS.

4.1 - MGE

4.1.1 - Conceitos e Fundamentos

O MGE, “Modular GIS Environment”, é um sistema gerenciador de dados geográficos que possibilita capturar, armazenar, recuperar, analisar e apresentar dados espaciais (Intergraph,1994).

O banco de dados geográfico construído por este sistema implementa uma arquitetura dual onde os mapas (informações gráficas) e tabelas (informações não gráficas) são armazenados em ambientes diferentes.

4.1.2 - Arquitetura do Sistema

Este sistema possui como característica fundamental a modularidade. São diversos pacotes que se agregam visando atender um propósito específico de trabalho. Existem três módulos primários sem os quais não se consegue desenvolver qualquer trabalho. São eles:

1) MGE Basic Nucleus (MGNUC): trata-se do ambiente que permite o MGE compilar e integrar todas os outros módulos e aplicações. Este módulo oferece funções básicas para o gerenciamento de projetos, ferramentas para consulta de dados, apresentação de dados geográficos, e se utiliza de sistemas de coordenadas de projeção.

2) MGE Basic Administrator (MGAD): componente que oferece ferramentas de gerenciamento de banco de dados para preparar o acesso aos dados de um projeto em um ambiente multi-usuário ou mono-usuário. O MGAD oferece uma configuração essencial e rotinas de gerenciamento para funcionalidades disponíveis no MGE Basic Mapper (MGMAP). O MGAD é necessário para um ambiente de rede local, quando um banco de dados relacional é configurado como parte do sistema MGE para tratar dados não espaciais ou alfanuméricos.

3) MGE Base Mapper (MGMAP): Contém funcionalidades que permitem capturar, generalizar, ajustar, manipular e validar dados do projeto em um ambiente interativo ou automático e funções para transformar descrições de localização em posição geográfica (espacialização).

Além destes módulos primários, existem também os módulos básicos que são a plataforma sobre o qual são executados módulos primários. São eles:

1) MicroStation: componente que oferece um completo ferramental gráfico para desenhar vetores geométricos que representam dados espaciais. Por exemplo, uma estrada pode ser uma série de linhas.

2) Relational Interface System (RIS): trata-se do software responsável pela comunicação com o banco de dados relacional. Este módulo torna o banco

de dados relacional transparente ao usuário e permite que a interfaces do MGE composta por menus acesse o banco de dados utilizado.

3) Relational Data Base (RDB): trata-se do SGBD utilizado para armazenar informações descritiva dos atributos que usualmente estão associadas aos dados gráficos provenientes do MicroStation. Por exemplo, pode-se armazenar o *nome* e o *tipo do pavimento* como atributos em um banco de dados relacional que descreve uma *estrada*. O MGE suporta muitos SGBD relacionais. São eles: INFORMIX, INGRES, ORACLE, SYBASE e DB2.

A Figura 4.1 abaixo ilustra a arquitetura do sistema MGE.

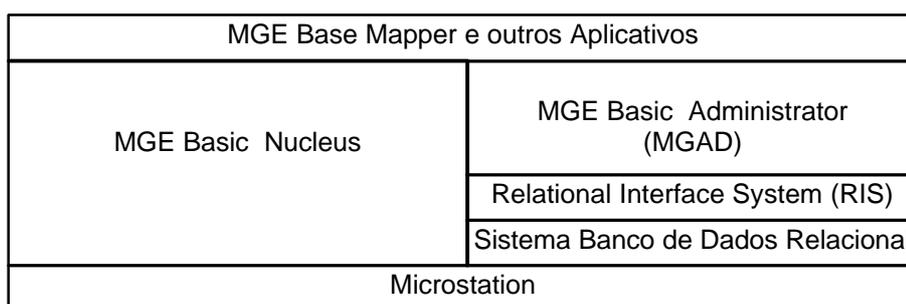


Fig. 4.1 - Arquitetura do Sistema MGE.

FONTE : adaptada de Intergraph (1994).

4.1.3 - Projeto

Um projeto no MGE combina todas as fontes de informações geográficas. Um projeto está associado a uma área de estudo e é uma coleção de informações geográficas (mapas e tabelas) relacionadas.

No projeto, as informações são estruturadas conforme sua origem. As feições geográfica são agrupados em categorias, os elementos alfanuméricos são armazenados em tabelas em um sistema gerenciador de banco de dados

relacional. Para isto deve existir um esquema que reflete esta estruturação no banco de dados. A seguir são apresentados esses conceitos mais detalhadamente.

4.1.3.1 - Esquema

Cada projeto MGE pode ter seu próprio esquema (uma coleção de tabelas e privilégios de acesso do projeto ao banco de dados) ou vários projetos podem compartilhar um esquema. Caso se esteja trabalhando sobre um ambiente multiusuário, torna-se possível usar esquemas residentes em sistemas remotos.

4.1.3.2 - Categorias e Classes de Feições

Em um projeto MGE os fenômenos geográficos são representados por categoria, classes de feições e feição geográfica. Cada feição geográfica, representada por um ponto, uma linha ou um polígono, é materializada em um mapa ou arquivo .DGN e deverá pertencer a uma classe de feição. As classes de feições são agregadas em categorias. A Figura 4.2 ilustra esta lógica.

4.1.3.3 - Representação da Informação Gráfica

As informações gráficas no MGE são armazenadas em arquivos de projeto no MicroStation (.DGN), também usualmente denominados como mapas digitais. Um elemento geográfico é representado sobre o mapa como uma feição geográfica. Os tipos de feições representadas no MGE são ponto, linha, fronteira de área¹ e identificador de área²:

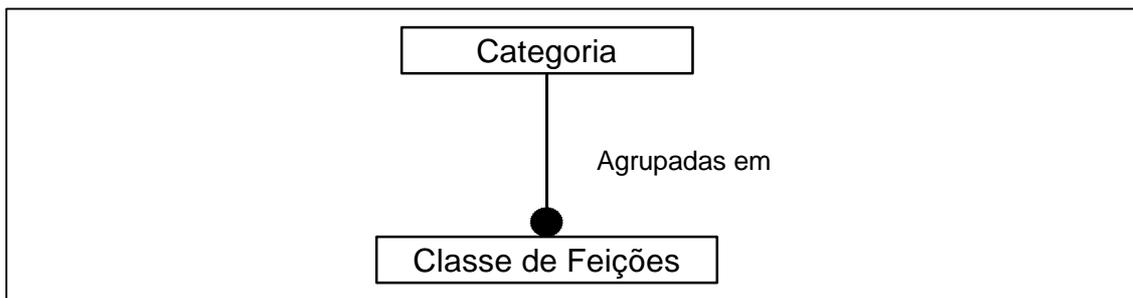


Fig. 4.2 - A representação de fenômenos geográficos no MGE: classe de feição e categoria.

- **Ponto:** Um ponto representa a localização de um elemento geográfico, tal como um poste ou hidrante, que é tão pequeno que não pode ser representado como uma linha ou área. Um ponto pode ser representado sobre o mapa como um ponto MicroStation (linha de tamanho zero), nó texto, texto, ou elemento de célula.

- **Linha:** Trata-se de um conjunto de pontos conectados. Ruas, rios são tipicamente feições lineares.

- **Fronteira de Área:** Trata-se de um conjunto de linhas fechadas sobre uma região geográfica, como a fronteira de uma lago ou a fronteira de uma cidade. As fronteiras são compartilhadas por áreas adjacentes, sendo que o elemento gráfico não necessita ser duplicado.

- **Identificador de Área:** Este tipo de feição contém informações sobre os atributos de uma área, e devem ser localizados em algum lugar no interior da fronteira da área.

¹ Traduzido do inglês 'area boundary'.

² Traduzido do inglês 'area centroid'.

No MGE deve-se criar tabelas com atributos para conter essas informações e ligá-las às feições. Um identificador de área pode ser apresentado sobre o mapa como um ponto, nó texto, texto ou elemento célula.

- **Indefinido:** Este tipo de feição pode ser tudo que o usuário do sistema determinar. Uma grade é um exemplo de uma feição indefinida.

4.1.3.4 - Representação da Fronteira não Espacial

As informações não espaciais no MGE ou atributos descritivos, conforme definido em no tópico 2.2.4.1 Arquitetura Dual, são armazenadas em tabelas em um SGBD relacional. Por exemplo, em um mapa de edificações é possível associar, a todas as ocorrências, dados alfanuméricos tais como: endereço, número de andares, nome da construtora, data de finalização da construção, etc.

O MGE permite aos usuários executar esta associação pela criação dos atributos na tabela, pelo cadastro dos dados, e pela ligação com as classes de feições.

A associação dos valores de um ou mais atributos ligados a uma classe de feição é chamado de definição de atributos. O MGE deixa o usuário definir o atributo automaticamente para as feições quando elas são digitalizadas (digitalização inteligente) ou, posteriormente, identificando-as uma a uma e cadastrando-as.

4.1.4 - Modelagem de Dados no MGE

Identificou-se, até este ponto, alguns conceitos gerais que refletem como o MGE interpreta os dados geográficos e os trata computacionalmente. Este item abordará com um grau maior de detalhe as estruturas internas de armazenamento e a manipulação dos dados geográficos.

De uma forma geral todos os dados deverão estar organizados em um projeto. O projeto constitui-se da seguinte hierarquia: projeto, índices, categorias (nível de índice), classe de feições (nível de feições) e atributos. A Figura 4.3 ilustra esta hierarquia.

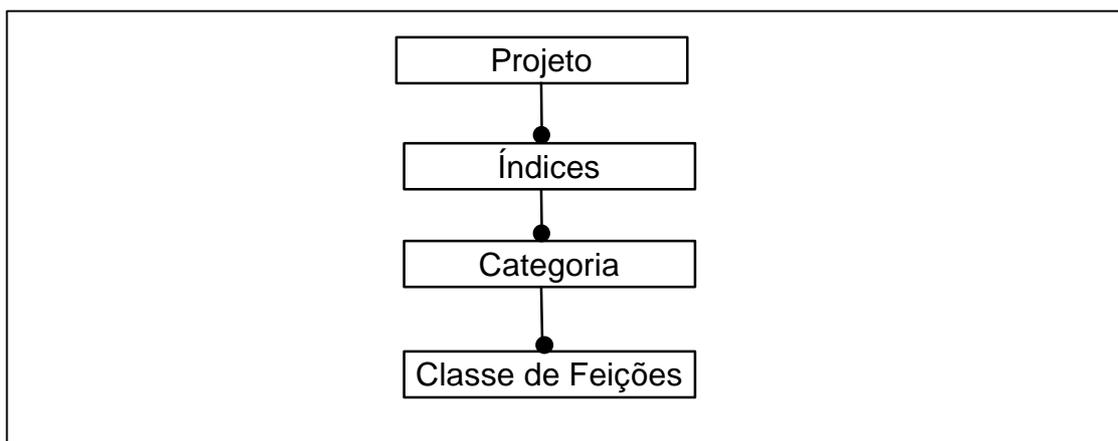


Fig. 4.3 - Organização Hierárquica de Dados Geográficos no MGE.

Um projeto é organizado por índices, que são denominados como arquivos de índices geográficos. Esses índices são arquivos (.dgn) que contêm formas geométricas que envolvem as classes de feições materializadas sobre o mapa.

Um índice pode ser composto por até 63 categorias. Cada categoria componente pertence a um único nível do índice.

Uma categoria contém qualquer número de classes de feições ou temas relacionados, que por sua vez agregam as feições geográficas materializadas em mapas. Um mapa é simplesmente um arquivo de projeto (dgn) que contém feições geográficas. Cada feição geográfica é classificada em uma classe de feição. Uma classe de feição pode ou não ter associada uma tabela de atributos definida pelo usuário, no qual contém informação não gráfica sobre cada feição geográfica.

Para exemplificar alguns destes conceitos vejamos o exemplo de modelagem e estruturação no MGE da Figura 4.4. É mostrado um exemplo de um projeto onde que modelou-se uma realidade natural e uma realidade artificial que ocorreu como decorrência da intervenção do homem. (Intergraph, 94) adaptado.

Um projeto necessita de um conjunto de dados que incluem arquivos de mapas, arquivo de índices geográficos, banco de dados com as tabelas predefinidas, arquivos de suporte e arquivos padrão.

Os arquivos de mapas são arquivos no formato 'dgn' que contêm as feições digitalizadas. Cada feição é um elemento do MicroStation com pelo menos um atributo de ligação para a tabela de feição e opcionalmente, uma ligação com uma tabela de atributos definida pelo usuário. Um mapa também contém um sistema de coordenada MGE. A Figura 4.5 modela esta lógica.

O limite espacial de um mapa é denominado *índice geográfico*. Um nível em um arquivo índices geográficos contém os limites espaciais dos mapas que compõem uma categoria. Podem existir tantos níveis quantos forem o número de categorias existentes. O nível e o nome do arquivo de índice para uma categoria são armazenados na tabela de categoria na banco de dados. A Figura 4.6 ilustra a idéia.

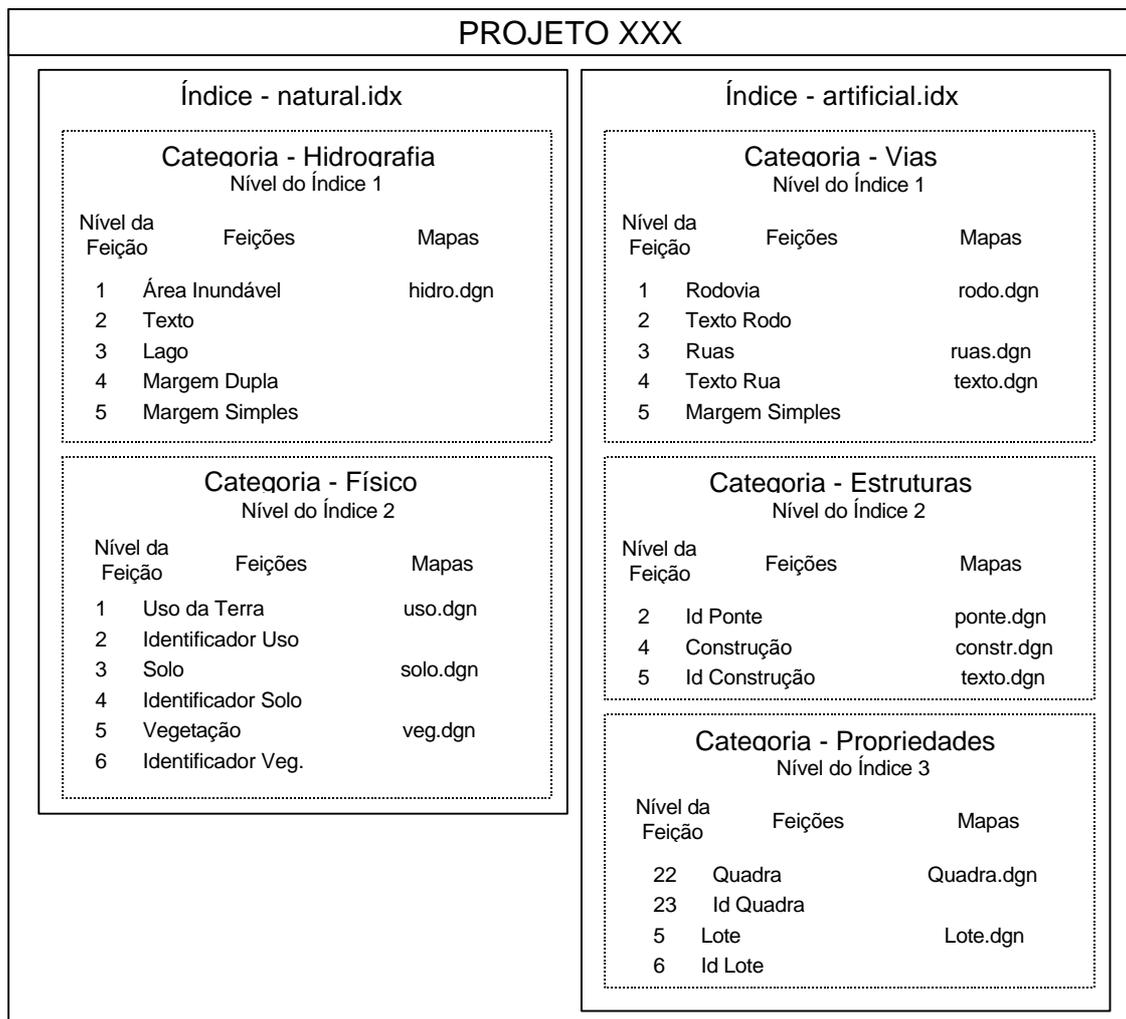


Fig. 4.4 - Exemplo de organização dos dados no MGE.

FONTE : adaptada de Integraph (1994).

O objetivo do arquivo de índices geográficos é, como o próprio termo “índice” sugere, servir de uma primeira aproximação para definir a área geográfica de interesse. Após ser realizada esta aproximação, através de ferramentas de “zoom” por exemplo, sobre os arquivos de índices geográficos que armazenam somente os limites espaciais envolventes do conjuntos de feições geográficas, carrega-se, em detalhes, todas as feições geográficas. Um segundo objetivo é a organização que se impõe ao projeto no sentido de

referenciar categorias com determinadas semelhanças em um mesmo arquivo de índice geográfico.

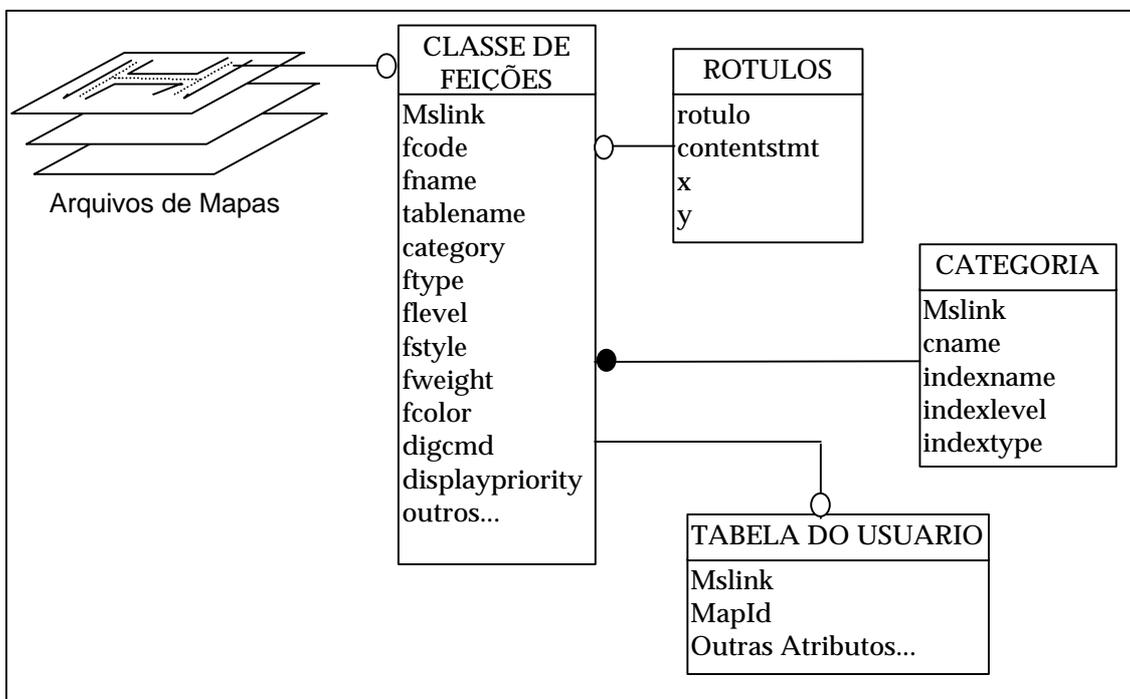


Fig. 4.5 - Modelo de Dados implementado no MGE para arquivo de mapas.

A utilização deste mecanismo é tanto conveniente e importante quanto for a dimensão e volume de dados gráficos do projeto. A Figura 4.7 reflete o modelo de dados implementado para suportar isto.

4.1.5 - Topologia no MGE

Os arquivos de projeto originais, no fomato "dgn" provenientes do Microstation, não possuem topologia para análise espacial. Por isto é preciso fazer uso de diversos processos do MGE para construir a "inteligência topológica" ou arquivos topológicos.

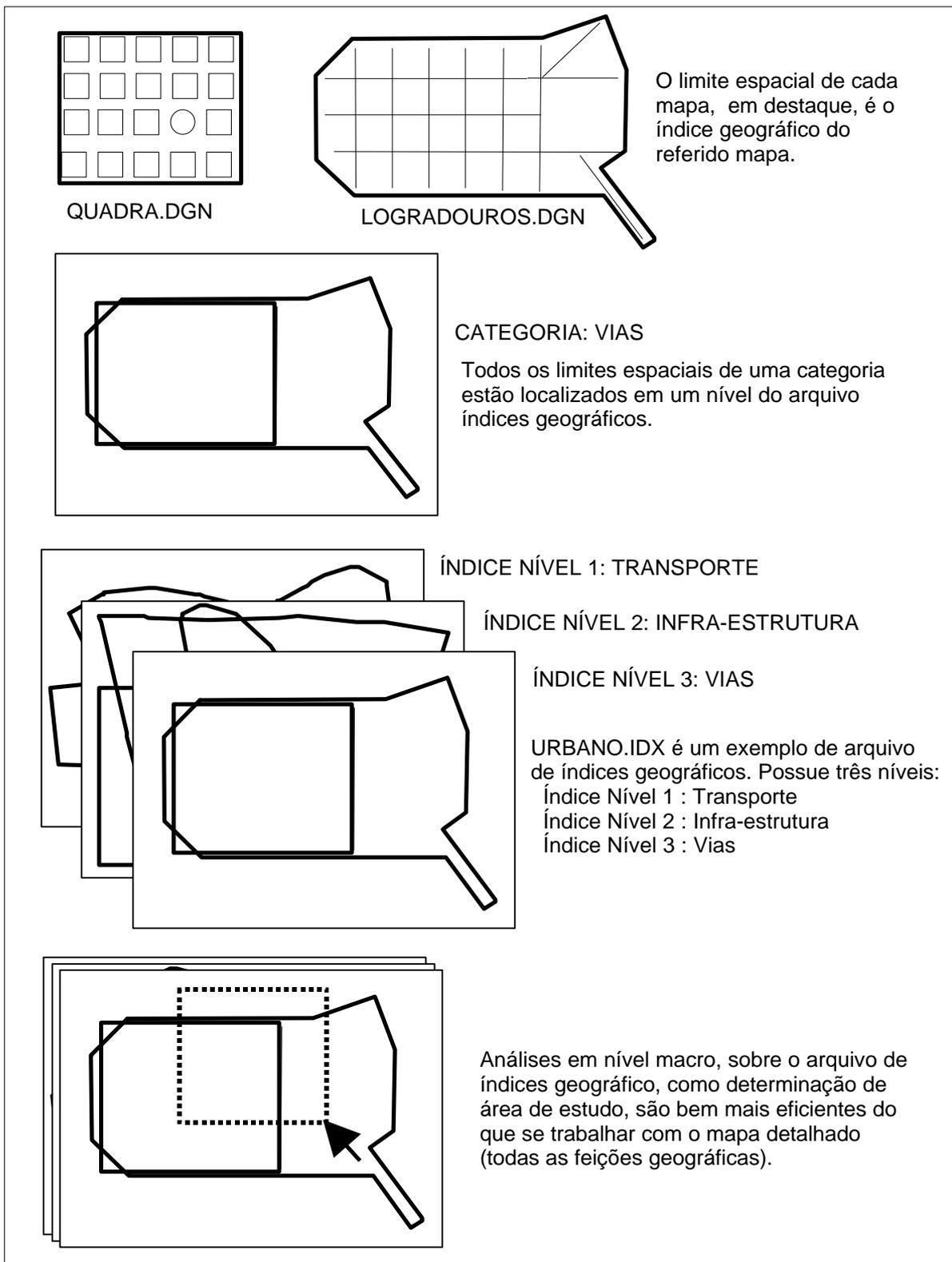


Fig. 4.6 - Ilustração do conceito de índices geográficos.

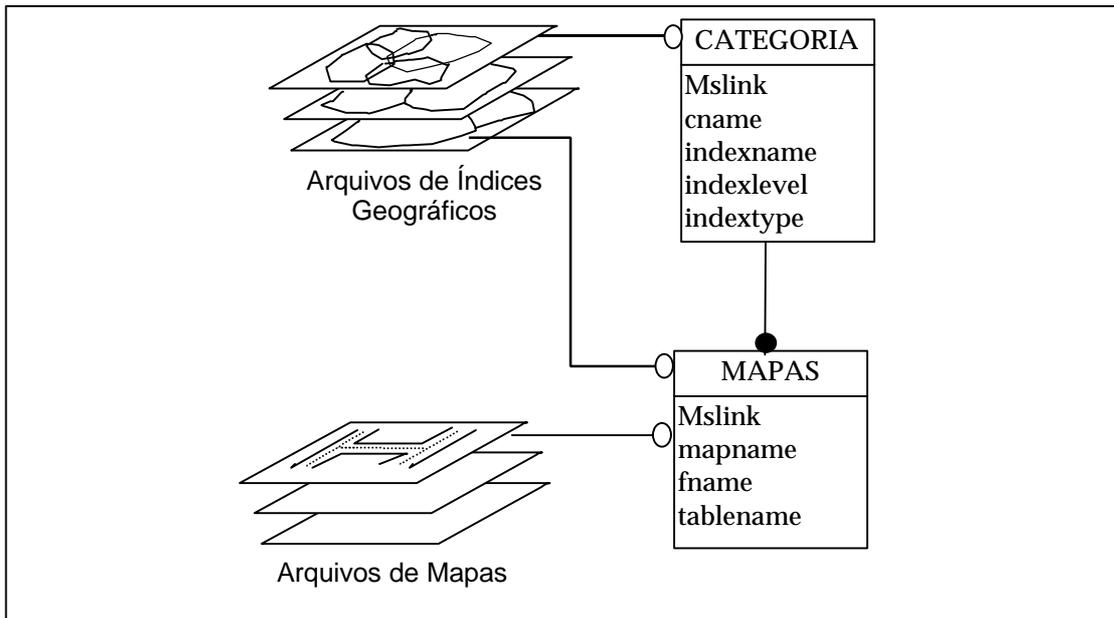


Fig. 4.7 - Modelo de dados do MGE que reflete o conceito de arquivo de índice geográfico.

A definição de topologia empregada pelo MGE pode ser vista conforme já descrita no tópico 2.2.5 Topologia em SIG.

Existem duas formas para se criar estes arquivos. Na primeira todos os arquivos no formato “dgn”, deverão passar, um a um, pelos processos de criação da topologia. Na segunda, somente as feições geográficas contidas na área delimitada³ pelo usuário deverão passar pelo referido processo.

O aplicativo do MGE responsável pela análise espacial vetorial é o “MGE analyst” (MGA). Através dele cria-se um arquivo com a topologia dos diversos mapas temáticos. Os mapas são então “cruzados”, utilizando-se ferramentas do referido aplicativo, resultando informações derivadas, como mostra o exemplo na Figura 4.8.

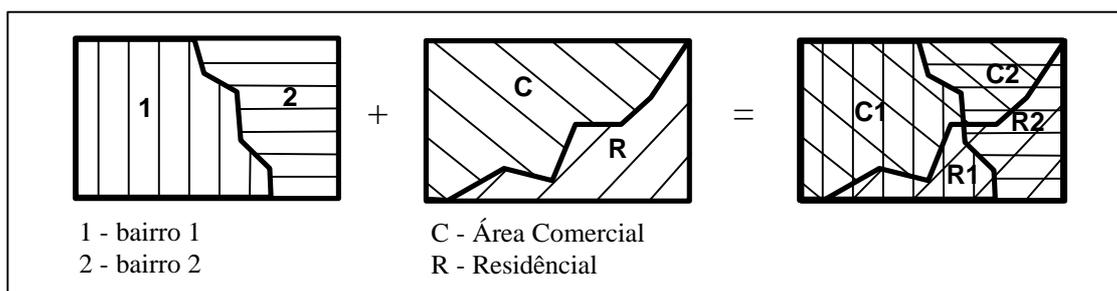


Fig. 4.8 - Exemplo de análise espacial no MGE.

4.2 - ARC/INFO

O Arc/Info suporta três modelos de dados para representar computacionalmente as feições geográficas. Feições geográficas são entidades do mundo real que podem ocorrer naturalmente como rios e vegetação, ou podem ser construções como ruas, infra-estrutura subterrânea e prédios, ou podem ser subdivisões da terra como municípios, propriedades e divisões políticas. Os modelos suportados são: modelo de dados vetorial, modelo de dados matricial, e o modelo de dados de rede irregular triangular (TIN).

4.2.1 - Conceitos e Fundamentos

O Arc/Info implementa um modelo de dados híbrido chamado geo-relacional que representa feições geográficas. Uma feição geográfica é representada no SIG por dois tipos de informação: localização e descrição.

³ Proveniente do inglês fence.

A principal estrutura para representar o modelo de dados vetorial do Arc/Info é a *Coverage* (ESRI, 94). Esta estrutura suporta o modelo geo-relacional vetorial. Antes de avançarmos neste conceito, torna-se necessário explicitar alguns fundamentos típicos do modelo de dados vetorial.

O dado de localização (espacial) é armazenado usando uma estrutura de dados vetorial ou matricial como definido no tópico 2.2.3. O dado descritivo de cada feição geográfica é armazenado em um conjunto de tabelas. Os dados espaciais e descritivos são ligados de tal forma que ambos os conjuntos de informação estão disponíveis ao usuário (ESRI, 94).

4.2.2 - Modelo de Dados Vetorial

O modelo de dados vetorial representa as feições geográficas assim como o mapa. Os pontos representam feições geográficas tão pequenas que não podem ser mostradas como linhas ou áreas, por exemplo poços, telefones públicos e postes. As linhas representam feições geográficas que não podem ser apresentadas como áreas, por exemplo ruas, rios e contornos de elevação. As áreas representam feições geográficas homogêneas tal como estados, municípios, propriedades e tipos de solos. Um sistema de coordenadas cartesianas x,y referencia as localizações do mundo real.

No modelo de dados vetorial cada localização é armazenada com coordenada x,y . Pontos são armazenados como uma única coordenada. Linhas ou arcos são armazenadas como uma série ordenada de coordenadas x,y . Áreas ou polígonos são armazenadas como uma série de coordenadas de x,y que define um ou mais segmentos de linha ou arco que se fecham para formar uma área ou polígono.

À cada uma das feições representadas está associada um identificador único. Portanto a lista de coordenadas de cada feição está associada com o identificador da feição. A Figura 4.9 ilustra a definição.

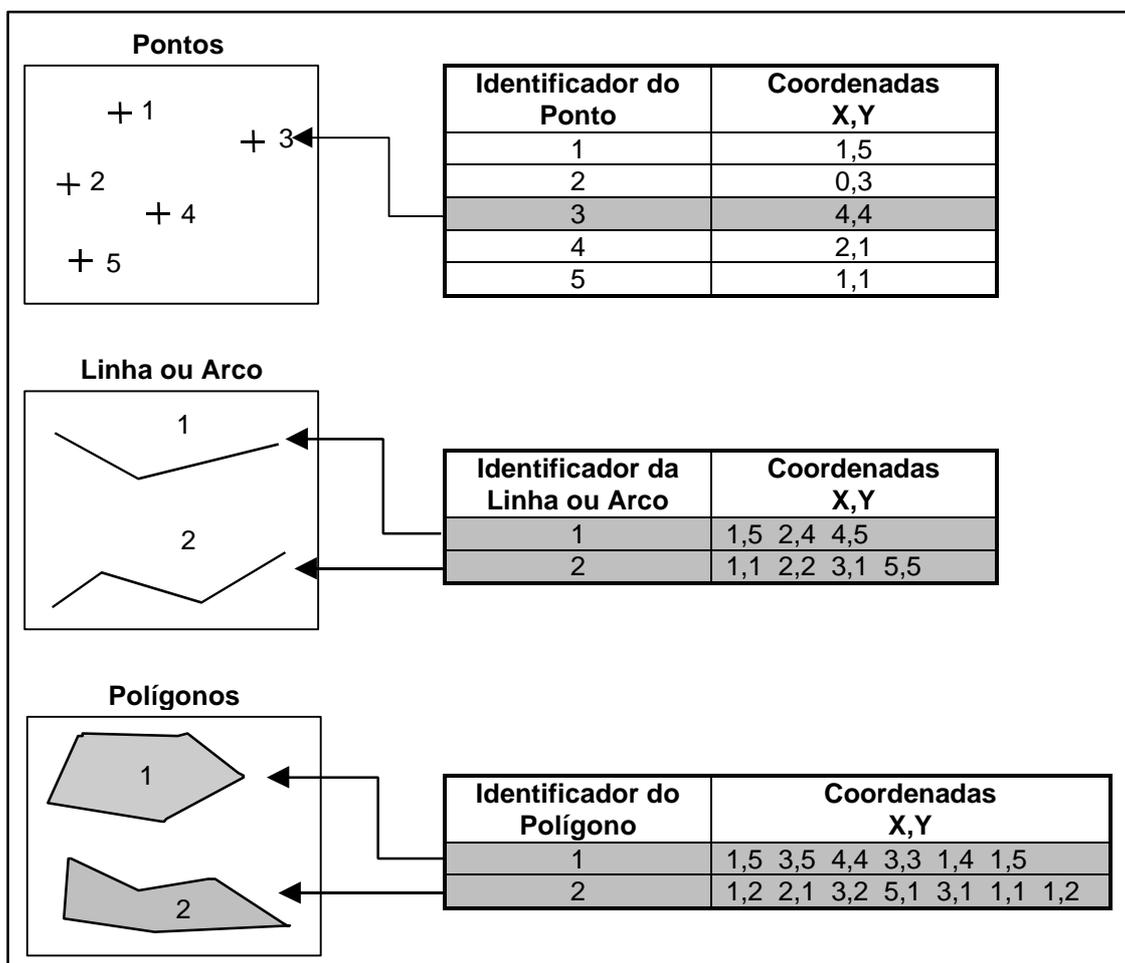


Fig. 4.9 - Ilustração da representação computacional de dados vetoriais no Arc/Info.

FONTE : adaptada de ESRI (1994).

4.2.2.1 - Topologia no Arc/Info

O conceito de topologia implementado no Arc/Info é baseado na estrutura Arc-Nó, descrita no tópico 2.2.5.1, e implementa os três conceitos: *Conectividade*, *Definição de Área* e *Contiguidade*, já apresentados no capítulo 2.

4.2.2.2 - Regiões

As regiões suportam a modelagem de relacionamentos complexos entre feições geográficas representadas como polígonos. Uma região é representada por um conjunto de polígonos. Por exemplo, uma região de floresta e uma outra região de floresta destruída pelo fogo são representadas por polígonos que indicam as áreas de florestas antes do incêndio e as áreas destruídas após o incêndio. Neste caso, pode ocorrer sobreposição dos polígonos que compõem as duas regiões modeladas. Outro caso é o das ilhas que formam um arquipélago. Por exemplo, o país Japão é uma região representada por vários polígonos.

Assim como ponto, linha e polígono, à cada região é dado um identificador único e o cálculo da área e perímetro são mantidos.

Construir regiões com polígonos é similar a construir polígonos com arcos. Assim como o polígono é uma lista de arcos, uma região é um lista de polígonos. Porém existe uma distinção importante: a ordem dos polígonos não é relevante. A Figura 4.10 ilustra o conceito de região.

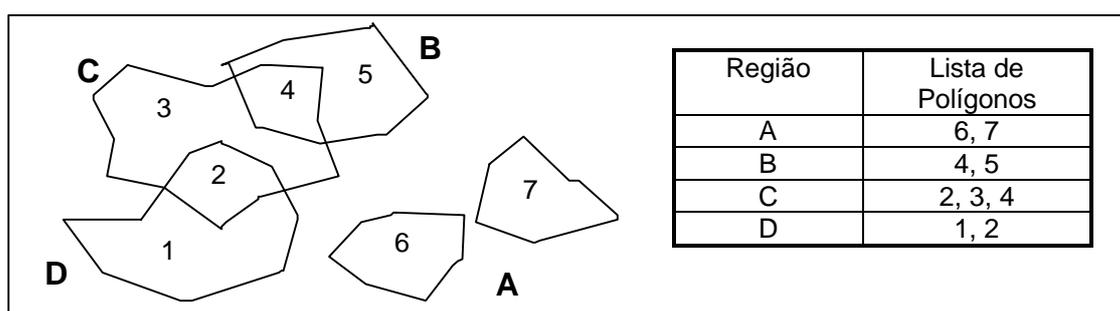


Fig. 4.10 - Ilustração do conceito de região.

FONTE : adaptada de ESRI (1994).

4.2.2.3 - Rotas

As rotas definem caminhos ao longo de um conjunto de feições lineares existentes. As rotas baseiam-se em arcos. Como exemplos de utilização pode-se citar, para o caso de rota de um ponto a outro, o caminho de casa para a escola ou, no caso de um circuito que começa e termina em um mesmo ponto, uma rota de ônibus.

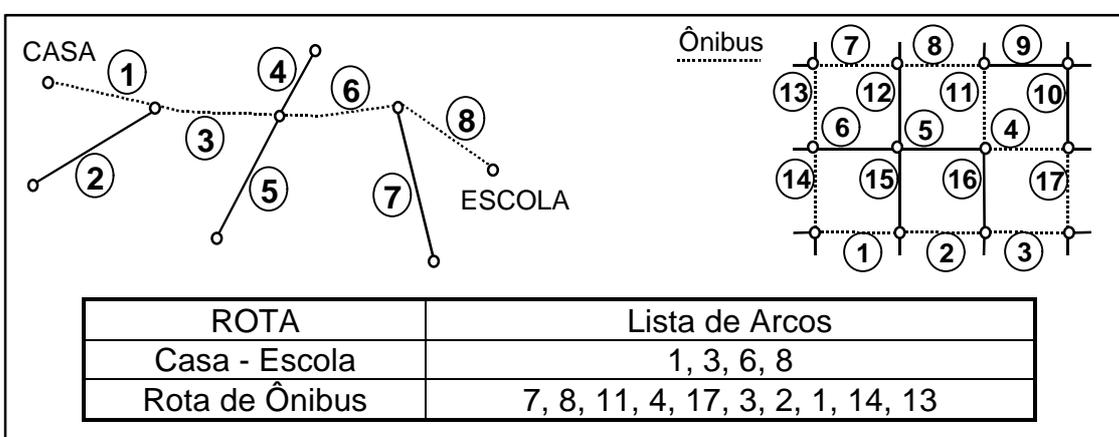


Fig. 4.11 - Ilustração do conceito de rota.
 FONTE : adaptada de ESRI (1994).

O modelo de dados vetorial implementado pelo Arc/Info está alicerçado no conceito de topologia. O armazenamento organizado, e a leitura indexada do dados fornecem ao sistema a possibilidade de realizar manipulações espaciais à qualquer momento.

4.2.2.4 - Representação das Informações Descritivas

Até agora apresentamos as formas de representação das feições geográficas baseadas no conceito de topologia. No entanto, é necessário apresentar a forma de representação das informações descritivas associadas às feições

geográficas. O mecanismo de ligação entre as duas representações também é abordado.

Os atributos descritivos associados às feições geográficas são armazenados da mesma forma que as coordenadas. O arquivo com os dados descritivos é denominado de *tabela de atributos*. Cada *linha* desta tabela é chamada de contém as informações descritivas de uma única feição. As colunas ou campos definidas na tabela são as mesmas para cada linha.

A ligação entre as feições geográficas e a tabela de atributos é garantida pelo modelo geo-relacional implementado pelo Arc/Info. Na prática um identificador único materializa a ligação entre as coordenadas das feições geográficas e os atributos descritivos, mantendo uma correspondência um para um, entre o registro espacial e o registro de atributos.

Uma vez que esta conexão é estabelecida, pode-se apresentar as informações descritivas sobre o mapa e armazenar novas informações descritivas. A Figura 4.12 ilustra a representação.

No exemplo da Figura 4.12, a coluna denominada “polígono” armazena o identificador único que estabelece a ligação entre os dados espaciais e os dados descritivos. Neste caso, o polígono com identificador “A” tem seus atributos espaciais descritos na tabela “Topologia Polígono-Arco” e os atributos descritivos ou não espaciais descritos pela “Tabela de Atributos de Polígonos”. Nesta tabela pode-se criar tantos atributos quantos forem necessários para descrever devidamente o dado espacial, ou fazer uso de outras tabelas que possuam um atributo em comum com a “Tabela de Atributos de Polígonos” como é o caso da “Tabela de Propriedade”. Neste último caso faz-se uso de funções típicas de um ambiente relacional tais como “Join” entre tabelas, para se acessar todos os atributos.

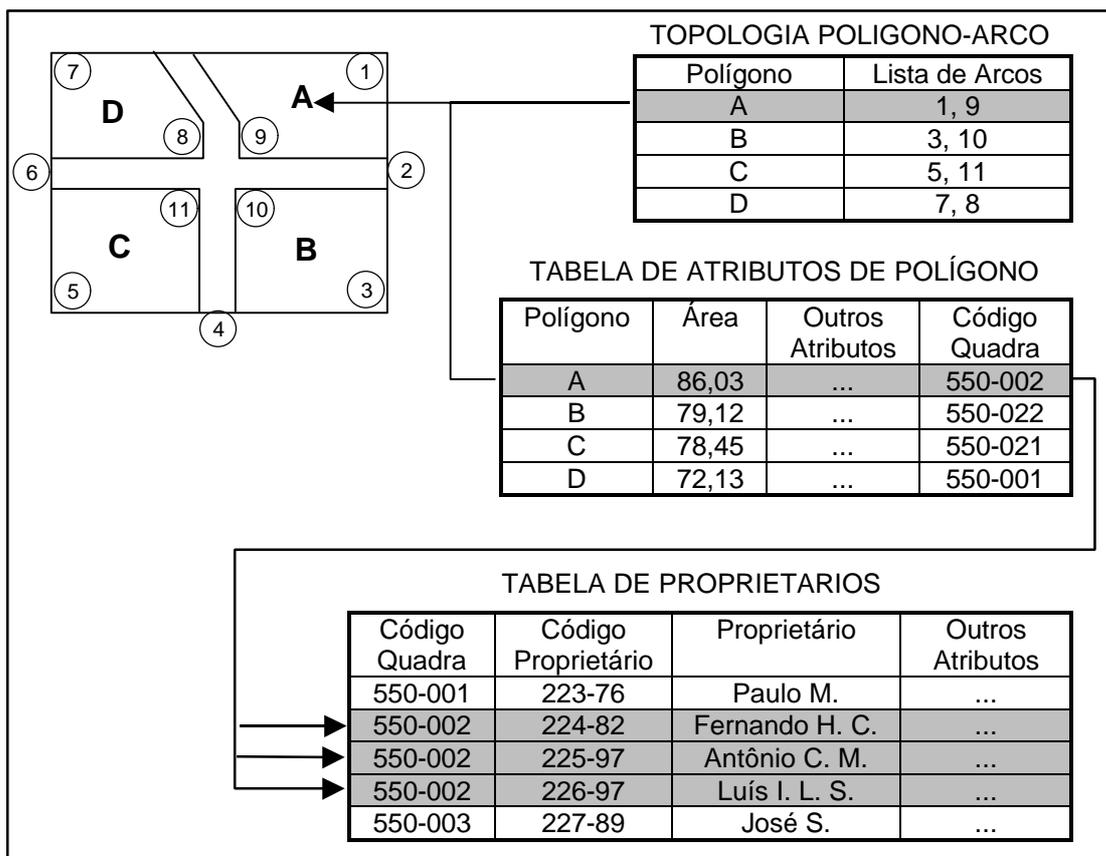


Fig. 4.12 - Ilustração da representação das informações descritivas.

FONTE : adaptada de ESRI (1994).

O Arc/Info gerencia três tipos de tabelas de atributos. O primeiro tipo consiste das tabelas de atributo das feições geográficas, que abrange as tabelas de topologia para polígono, arco, nó, ponto, rota, região, na Figura 4.12 é indicada como TOPOLOGIA POLÍGONO-ARCO. O segundo tipo consiste dos arquivos de dados INFO, que são similares às tabelas provenientes dos SGBD relacionais de mercado, na Figura 4.12 é indicada como TABELA DE ATRIBUTOS DE POLÍGONO. E o terceiro tipo consiste das tabelas de atributos externas cuja fonte são os próprios SGBDR tais como ORACLE, INGRES, INFORMIX, SYBASE, indicada também na Figura 4.12 como TABELA DE PROPRIETARIOS.

4.2.3 - Coverage⁴

Para a organização dos dados no Arc/Info, visando representar a realidade geográfica, é utilizado o conceito de *coverage*. *Coverage* é uma estrutura para o armazenamento de dados vetoriais. Ela representa um único conjunto de objetos geográficos tal como, ruas, propriedades, tipos de solos ou padrões de florestas. Uma *coverage* suporta o modelo geo-relacional onde contempla tanto dados espaciais quanto os atributos para as feições geográficas.

Uma *coverage* contém um conjunto de feições, onde cada uma é representada por uma classe de feição como arco, nó, ponto, anotações ou polígono. A combinação das classes de feições presentes em uma *coverage* depende do fenômeno geográfico a ser representado. A Figura 4.14 ilustra esta idéia.

Conforme o modelo geo-relacional, uma feição geográfica em uma *coverage* é identificada por um único número. O dado espacial e o atributo são ligados por este número.

4.2.4 - Outras Representações

Além do modelo de dados vetorial, tendo a *coverage* como o principal método de representação no Arc/Info, existem o modelo de dados matricial e o modelo de rede irregular triangular.

⁴ Palavra proveniente do inglês cujo significado direto é cobertura. Aplicada à área de geoprocessamento pode-se traduzir como sendo área de estudo coberta. Pela ampla utilização achamos prudente manter o termo em inglês neste trabalho.

O modelo de dados matricial representa as feições geográficas como uma fotografia materializada por uma grade regular de pontos. Cada ponto desta grade é denominado “célula” ou “pixel”. As células possuem valores que podem representar três interpretações: uma classificação, como o tipo de vegetação por exemplo; uma medida da quantidade de luz refletida pela Terra proveniente de uma imagem de satélite; e finalmente uma medida de elevação.

Portanto o método utilizado para representar o modelo de dados vetorial é a grade regular ou “grid”. Para maiores detalhes ver Esri (1994).

O modelo de rede irregular triangular ou “TIN”⁵ é uma outra estrutura utilizada para representar superfícies contínuas, assim como a grade regular. O TIN representa a superfície por uma série de pontos ligados de forma triangular. Cada três pontos, que geram um triângulo, podem ocorrer em qualquer localização geográfica, daí decorre a irregularidade, diferença básica da grade regular. Além disto os relacionamentos topológicos entre os triângulos são criados e armazenados por este modelo. Para maiores detalhes ver Esri (1994).

4.3 - SPRING

4.3.1 - Apresentação

O SPRING, Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas, desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para ambientes UNIX e Windows (em desenvolvimento) possui as seguintes características (SPRING, 1998A):

⁵ Proveniente de abreviatura em inglês “Triangulated Irregular Network”

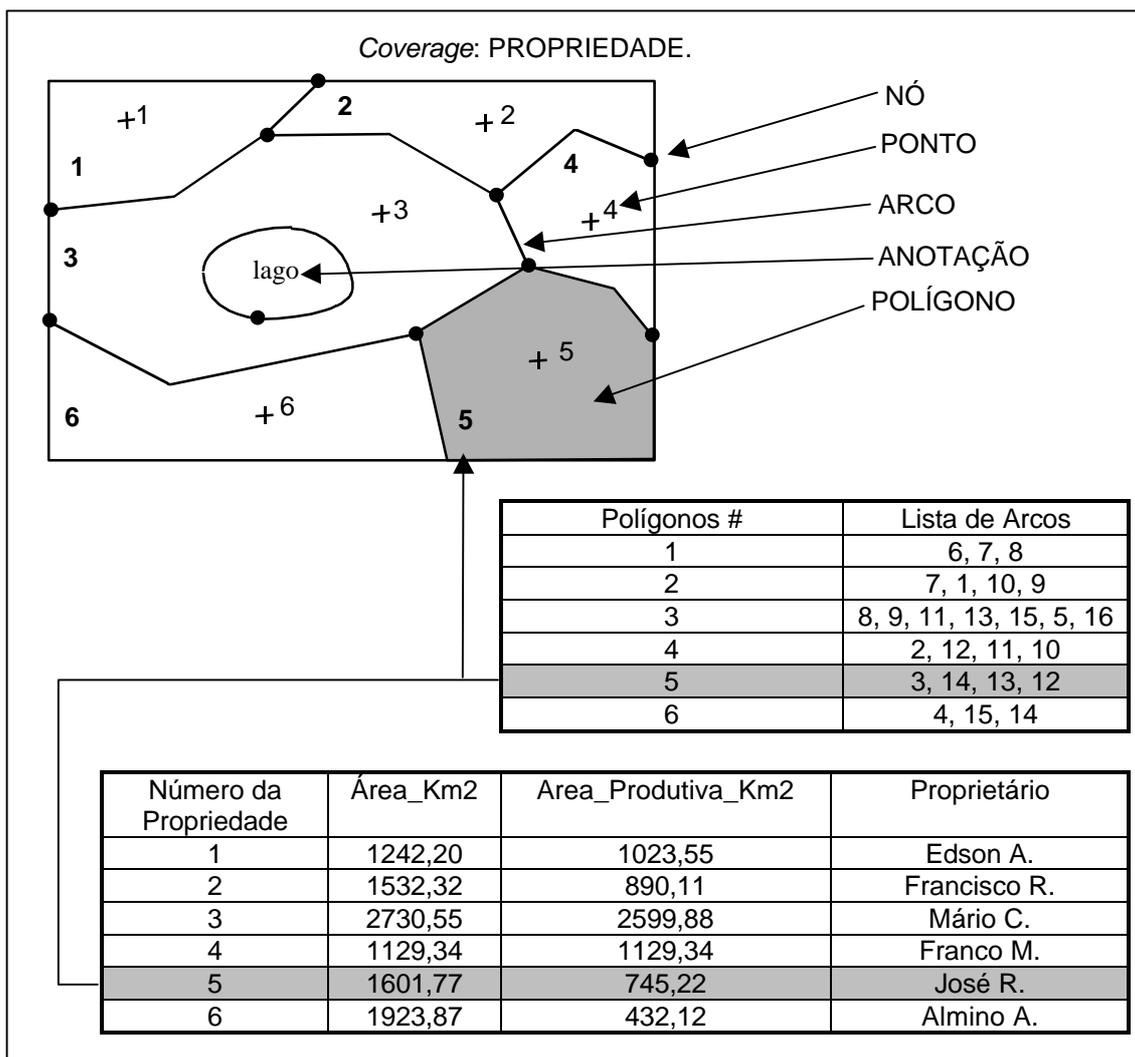


Fig. 4.13 - Exemplo de uma coverage: Propriedade.

- opera como um banco de dados geográfico sem fronteiras e suporta grande volume de dados (sem limitações de escala, projeção e fuso), mantendo a identidade dos objetos geográficos ao longo de todo banco;
- administra tanto dados vetoriais como dados matriciais, e realiza a integração de dados de sensoriamento remoto;
- provê um ambiente de trabalho amigável e poderoso, através da combinação de menus e janelas com uma linguagem espacial facilmente

programável pelo usuário (LEGAL - Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), e

- consegue escalonabilidade completa, isto é, é capaz de operar com toda sua funcionalidade em ambientes que variem desde micro-computadores a estações de trabalho RISC de alto desempenho.

O desenvolvimento de uma nova geração de sistemas de processamento de imagens e geoprocessamento no INPE iniciou-se em 1991, e teve seu primeiro resultado concreto em 1993, com o lançamento da versão 1.0 do SPRING. A evolução do sistema SPRING durante estes anos levou ao lançamento em 1996 da versão 2.0.

Seguindo uma estratégia de utilizar sistemas competitivos e no estado da arte, o INPE está migrando o sistema para o ambiente de microcomputadores (MS-Windows), gerando assim o SPRING For Windows. Este produto mostra-se altamente promissor, uma vez que incorpora todas as funcionalidades e vantagens do SPRING/UNIX em um ambiente simples e de larga utilização no mercado.

4.3.2 - Arquitetura do Sistema

O sistema SPRING é composto por três módulos IMPIMA, SPRING e SCARTA. Segue suas definições (SPRING, 1998B):

- IMPIMA : executa leitura de imagens digitais de satélite, gravadas pelo INPE, através dos dispositivos CD-ROM (Compact Disc - Read Only Memory), CCT (Computer Compatible Tapes), "streamer" (60 ou 150 megabytes) e DAT (Digital Audio Tape - 4 ou 8mm) adquiridas a partir dos sensores TM/LANDSAT-5, HRV/SPOT e AVHRR/NOAA. Converte as

imagens dos formatos BSQ, Fast Format, BIL e 1B para o formato GRIB (Gridded Binary).

- **SPRING** : é o módulo principal de entrada, manipulação e transformação de dados geográficos, executando as funções relacionadas à criação, manipulação e consulta ao banco de dados, funções de entrada de dados, processamento digital de imagens, modelagem numérica de terreno e análise geográfica de dados. As funções da janela principal, na barra de menus, estão divididas em: Arquivo, Editar, Exibir, Imagem, Temático, Numérico Cadastral, Rede, Objetos e Utilitários. Para cada opção há um menu (janela de diálogo) associado às operações específicas.
- **SCARTA** : edita uma carta e gera arquivo para impressão a partir de resultados gerados no módulo principal SPRING, permitindo a apresentação sob a forma de um documento cartográfico. Permite editar textos, símbolos, legendas, linhas, quadros e grades em coordenadas planas ou geográficas. Permite exibir mapas em várias escalas, no formato varredura ou vector, através do recurso "O que você vê é o que você tem" (What You See Is What You Get, Wysiwyg).

O banco de dados geográfico construído pelo SPRING implementa uma arquitetura dual onde as representações dos dados espaciais e as informações descritivas (dados não espaciais) são armazenados em ambientes diferentes.

As representações gráficas se utilizam de arquivos convencionais do tipo binário onde são armazenados as coordenadas x, y que definem a geometria de um objeto geográfico ou campo do SPRING. Este armazenamento é realizado segundo algoritmo R-tree para prover uma indexação dos dados.

Os atributos descritivos destes objetos ou campos são armazenados em tabelas em um banco de dados relacional.

Um identificador único é responsável pela ligação dos dois componentes.

Com a evolução do SPRING, sistemas gerenciadores de banco de dados relacionais foram adotados, para implementar uma estratégia para portabilidade de software. Hoje a visão estática, é implementada em SGBDR de mercado tais como CODEBASE e ORACLE.

A visão funcional e dinâmica representada pelos métodos das classes modeladas no SPRING e as ligações e associações entre seus objetos foram implementadas pela linguagem de programação C++.

4.3.3 - Modelo Conceitual do SPRING

A realidade geográfica é representada no SPRING por uma modelo conceitual baseado no paradigma orientado por objetos. A persistência dos dados é realizada em um ambiente dual conforme exposto anteriormente.

Na busca de um melhor detalhamento e compreensão do modelo de conceitual implementado pelo SPRING, além da documentação disponível na Internet, foram construídos e aplicados dois tipos de questionários. Um questionário foi dirigido aos desenvolvedores, e o outro foi aplicado aos usuários do sistema. A íntegra dos questionários está no Apêndice A.

Como resultado desta pesquisa, além da tabulação das respostas apresentadas no Apêndice B, a discussão, principalmente com os desenvolvedores do sistema ajudou-nos a compreender a semântica do

modelo orientado por objetos apresentado na Figura 4.14, representada pela técnica TMO.

O Banco de Dados Geográfico é definido no SPRING por um nome e um caminho (path) que devem ser fornecidos pelo usuário. O sistema criará no caminho indicado um diretório, que corresponde fisicamente ao seu banco. Tudo que for criado e definido para este banco será armazenado debaixo deste diretório. Após criar um Banco de Dados é necessário ativá-lo para que se possa prosseguir. Somente um Banco de Dados pode estar ativo de cada vez (SPRING, 1998E)

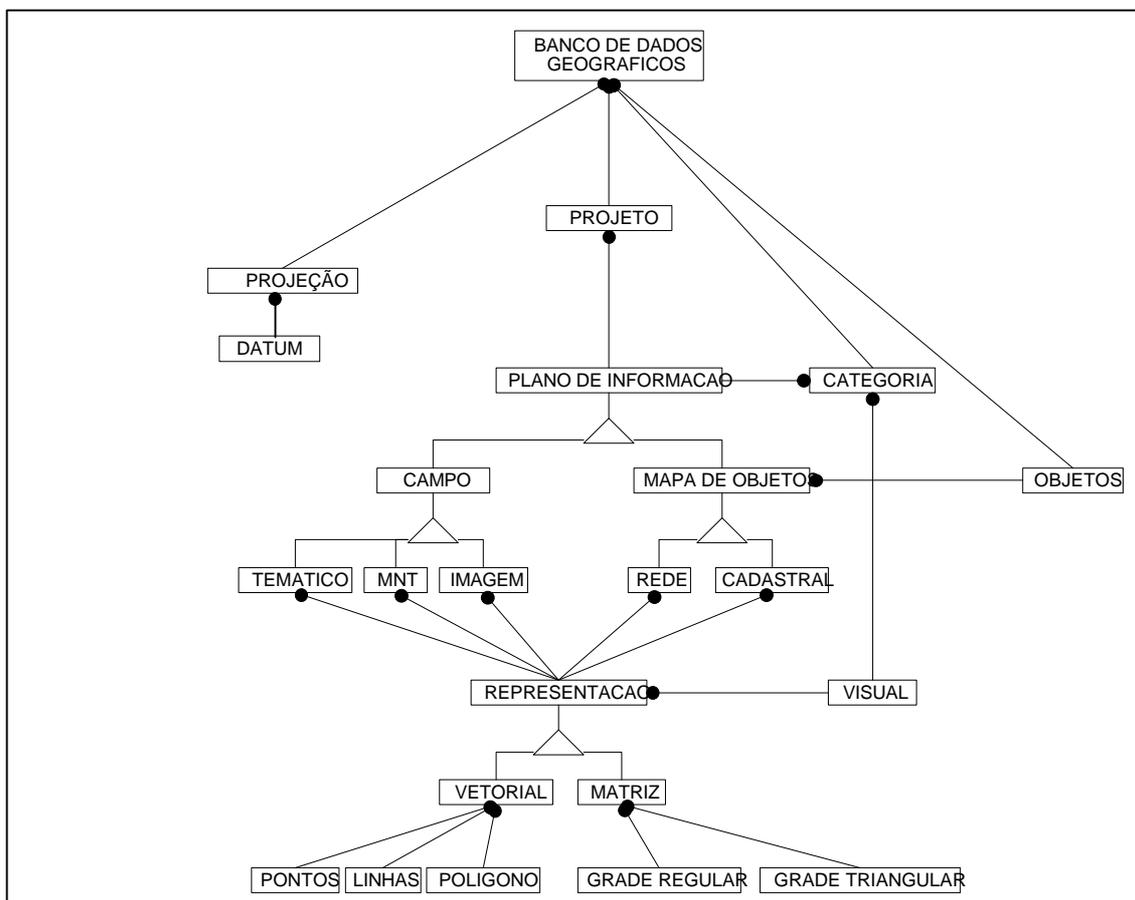


Fig. 4.14 - Modelo Orientado por Objetos do SPRING.

As Categorias e Classes Temáticas devem ser definidas a priori, para que cada tipo de dado a ser tratado pelo SPRING seja associado a uma categoria. Cada categoria pertence a um modelo de dados (Temático, Numérico, Imagem, Cadastral, Redes e Objeto). O usuário não precisa definir todas as categorias de imediato, mesmo porque, muitas vezes não se sabe tudo que será necessário para chegar no seu objetivo. A qualquer momento pode-se acrescentar ou definir novas categorias. Apenas nas categorias do modelo Temático é necessário definir classes. Classes temáticas definem o modo (visual) como pontos, linhas e áreas serão apresentadas no monitor (cor, hachura, preenchimento, etc).

Um projeto define a área física de trabalho. Para criar um projeto deve-se fornecer um nome, projeção e retângulo envolvente. Ao se fazer isso, um subdiretório, embaixo do diretório correspondente ao banco, será criado, e todos os dados referentes à uma dada região serão armazenados nele. A condição para criar um projeto é apenas ter um banco ativo, não sendo necessário definir as categorias. Pode-se ter quantos projetos se desejar, mas somente um pode estar ativo de cada vez.

Os planos de informações (PIs) são armazenados dentro de um projeto. Os PIs representam mapas de solos, mapas de estradas, imagens, etc., que estejam na mesma área geográfica de estudo definido pelo retângulo envolvente. Um PI é criado fornecendo-se um nome, a categoria à qual ele pertencerá (previamente definida), a escala (quando PI Temático, Numérico ou Cadastral) e a resolução (quando PI Numérico ou Imagem), desde de que tenha um Banco de Dados e um Projeto ativos. Pode-se ter quantos PIs se desejar da mesma categoria ou não, mas apenas um estará ativo.

Um dado no SPRING pode estar representado no formato matricial e/ou vetorial, dependendo do modelo (categoria) ao qual ele pertence. Para editar

pontos, linhas e áreas no formato vetorial, pode-se utilizar uma mesa digitalizadora, para transferir os dados do mapa para computador, ou importar arquivos de outros softwares ou formatos. Para dados matriciais pode-se utilizar leitura de imagens gravadas em formatos específicos, interpolar grades (matrizes) numéricas ou mesmo converter dados da representação vetorial para matricial.

Uma vez que tem-se os dados (PIs) editados, pode-se obter outros dados através de análises, cruzamentos, etc., por meio de funções específicas do software ou de uma linguagem de programação para mapas.

No SPRING as feições geográficas do mundo real são modeladas por dois grandes tipos de dados: geo-objetos e geo-campos. A seguir é mostrada, com maior detalhe, os tipos de dados suportados pelo SPRING provenientes dos tipos de plano de informação (SPRING, 1998C):

- 1)** Os tipos de dados cadastrais, sub-tipo de geo-objetos, descrevem a localização de elementos de sistemas de informação de cadastro urbano ou rural, e utilizam a topologia arco-nó-polígono para armazenamento. Um item específico sobre a estrutura topológica implementado pelo SPRING será apresentado à frente.
- 2)** Os dados do tipo rede, sub-tipo de geo-objetos utilizam a topologia arco-nó, e armazenam a localização e a simbologia associadas a estruturas linearmente conectadas. Informações adicionais neste tipo de mapas incluem direções de fluxo e segmentação dinâmica.
- 3)** Os dados do tipo mapa temático, sub-tipo de geo-campos, representam uma dada região geográfica R, associando a cada ponto do espaço um

tema de um mapa (p.ex. um mapa de solos é caracterizado pelo conjunto {latosolo roxo, litosolo, cambisol, ...})

4) Os tipos de dados numéricos, sub-tipo de geo-campos, de associam para cada ponto do espaço, de uma região geográfica, um valor real (p. ex. um mapa de campo magnético, um modelo numérico de terreno);

5) O tipo de dados denominado de Imagem de satélite, sub-tipo de geo-campo, é obtida através de discretização da resposta recebida por um sensor (passivo ou ativo) para todos os pontos de uma dada região geográfica.

Seja qual for o tipo de dado ele possui uma representação gráfica que pode ser vetorial ou matricial, excluindo o caso dos objetos não espaciais. É evidente que para cada plano de informação especializado, ou tipo de dados tratado, existe uma representação mais utilizada. No entanto o sistema oferece mecanismos de conversão entre os dois tipos de representações possíveis.

Na representação vetorial, a parte gráfica do objeto espacial ou campo, é implementada usando uma das três geometrias básicas: pontos, linhas e polígonos. Já na representação matricial, a realidade geográfica é implementada por dois métodos: grade regular ou grade triangular irregular.

Para finalizar a descrição da semântica do modelo orientado por objetos do SPRING, existe o conceito de “visual” que é associado à categoria e à representação gráfica dos objetos e campos. O visual define as propriedades tais como cor, espessura de linha, estilo da linha, etc. que pode ser pré-definida para as categorias, podendo ser específico para uma dada representação gráfica de um determinado objeto. Desta forma, todo o plano de informação de uma dada categoria “herda” estas propriedades de visual da

categoria. Além disto, o sistema permite ao usuário modificar o visual específico de cada representação gráfica alterando o visual herdado pela referida categoria.

4.3.4 - Topologia no SPRING

O conceito de topologia implementado no SPRING é baseado na estrutura Arco-Nó, descrita no item 2.3.1 Estrutura de dados arco-nó, e implementa os três conceitos topológicos importantes: *Conectividade*, *Definição de Área* e *Contiguidade*, já apresentados pelo itens 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 respectivamente.

4.4 O - Padrão OPEN GIS

O desenvolvimento do assunto deste tópico tem como objetivo, além de apresentar e elucidar alguns resultados alcançados por esta organização, servir de marco de referência para uma comparação entre os três SIGs apresentados anteriormente.

4.4.1 - Conceito

O Consórcio OPEN GIS - OGC é uma organização sem fins lucrativos dedicada a tornar os sistemas de geoprocessamento abertos (OGC, 1998). O OGC almeja a integração completa de dados geográficos e recursos de geoprocessamento através do uso de sistemas de informação geográficas interoperáveis.

O comitê técnico do consórcio está em processo de estabelecer uma especificação que define uma arquitetura de software abrangente para sistemas abertos de geoprocessamento. Os sistemas construídos baseados nesta especificação serão capaz de praticar a interoperação entre aplicações

em uma rede local, e serão capaz, também, de navegar sobre um ambiente heterogêneo e distribuído, como a Internet, e de acessar dados geográficos heterogêneos e recursos de geoprocessamento.

Para a criação dessa especificação, o consórcio OPEN GIS utiliza-se de um processo de consenso entre seus membros. Tal consenso é traduzido para uma especificação abstrata e uma especificação de implementação para cada um dos componentes de software relacionados aos Sistemas de Informação Geográfica.

Através dos grupos de trabalho formados pelos membros do consórcio, o modelo essencial (isto é, a descrição formal do mundo real) e a especificação do modelo (isto é, a descrição de como o sistema representará o mundo real), são desenvolvidos. O modelo essencial e a especificação do modelo, juntas, são denominadas de “especificação abstrata”.

Quando a especificação abstrata está suficientemente madura, os membros do OGC constroem os requisitos para uma proposta de especificação de implementação. As respostas desta proposta fornecem uma especificação de implementação para uma plataforma neutra, incluindo uma linguagem de definição de interface.

Quando todos os membros do OGC chegam a um consenso, a proposta de especificação de implementação passa a ser parte da base de especificações da OGC. Então, para cada software indicado pelos membros será verificada a conformidade com as especificações de implementação. Caso atenda às especificações, o software passará a ter o certificado OGC.

4.4.2 - O Conceito de Comunidade de Informação Geo-espacial

Uma comunidade de informação geo-espacial (CIG) é uma coleção de sistemas ou indivíduos que compartilham informações espaciais, definições, interesses e tecnologia.

Os indivíduos que não pertencem à mesma comunidade de informação e querem compartilhar informações são impedidos de fazê-lo por três motivos:

- ignorância da existência da informação fora de sua comunidade;
- modelagem do fenômeno sem interesse mútuo e
- modelagem do mesmo fenômeno em duas representações distintas, em dois CIG diferentes, fazendo com que uma representação não reconheça a outra e vice-versa.

A especificação OGC visa superar estas limitações. O OGC capacita os CIG a articular seus domínios de interesse, ao fornecer duas novas tecnologias que objetivam:

- anunciar sua existência e suas informações para que estes outros CIGs possam descobri-lo e acessá-lo, sempre que exista o interesse de compartilhar informações, e
- preservar a semântica quando ocorre a transferência de dados de um CIG para outro.

A aplicação e o amadurecimento da tecnologia OGIS deverão resultar no crescimento do tamanho e formalismo do CIG, além de incrementar a disponibilidade de informações pelo referido CIG. Esta tendência pode ser

acompanhada com uma redução gradual do número de CIGs distintos, à medida que estes apliquem o padrão OGIS.

Para formalizar um projeto do mundo real em um CIG, serão brevemente apresentados os diversos níveis de abstração para modelar os fatos do mundo real como coleções de feições no OPEN GIS. Existem duas tecnologias fundamentais para modelar fatos do mundo real: feições com geometria (*features*) e *coverage*. Os conceitos relativos a estes dois termos serão introduzido em tópicos mais à frente.

Nove níveis de abstração são identificados, com oito interfaces entre elas. Os níveis de abstração, seus nomes, as linguagem utilizadas, suas interfaces e os métodos que suportam a navegação através da interface são todos apresentados na Figura 4.15.

Os nove níveis podem ser vistos em OGIS (1998B) com detalhe. Os cinco primeiro níveis de abstração, do nível do “mundo real” para o nível do “visão do mundo”, objetivam gerar a abstração dos fatos do mundo real e não são diretamente implementados em um software. Os quatro últimos níveis, do nível “pontos do OGIS” até o nível “coleções de feições do mundo OGIS”, visam gerar modelos matemáticos e simbólicos do mundo e são diretamente implementáveis no software. Assim, o modelo essencial gerado ao final dos quatro últimos níveis dá uma especificação abstrata para as suas implementações. O nível final é a abstração da realidade especificada em uma linguagem de coleções de feições OGIS.

4.4.3 - Feição e Conceitos Associados

Feição é definida na documentação do OGIS como sendo uma representação abstrata do mundo real, ou seja, o átomo da representação geográfica.

Este conceito geral é especificado e adotado pelo OGIS somente dentro do contexto da Comunidade de Informação Geoespacial e será apresentado a seguir.

A feição OGIS é compreendida pela comunidade como sendo uma classe abstrata sobre a qual se derivam duas sub-classes principais responsáveis pela sua representação. São elas: feição com geometria e *coverage*. A Figura 4.16 ilustra a idéia.

4.4.3.1 - Noção Geral de Informação Geo-espacial

Informação geo-espacial é qualquer coisa que pode ser aprendida olhando em um mapa, não em qualquer mapa, mas em mapas novos, criativos, e com anotações. Um mapa pode ser interpretado como uma metáfora do mundo real. Uma imagem de satélite é aceita por esta comunidade como um tipo de mapa, bem como as coleções estruturadas de exemplos de fenômenos da Terra (OGIS 1998A).

A informação geo-espacial digital é a informação geo-espacial codificada na forma digital. A codificação é feita por recursos computacionais aplicados para automatizar processos da informação geo-espacial tais como: armazenamento, transmissão, análises e assim por diante.

O modelo OGIS, não trata, por agora, o caso de mapas que representam a variação temporal de fenômenos geográficos.

A unidade básica da informação geo-espacial é chamada de feição. Feições podem ser definidas recursivamente como variações delas próprias. Por

exemplo, dependendo da aplicação ou interesse da informação, qualquer item a seguir pode ser uma feição:

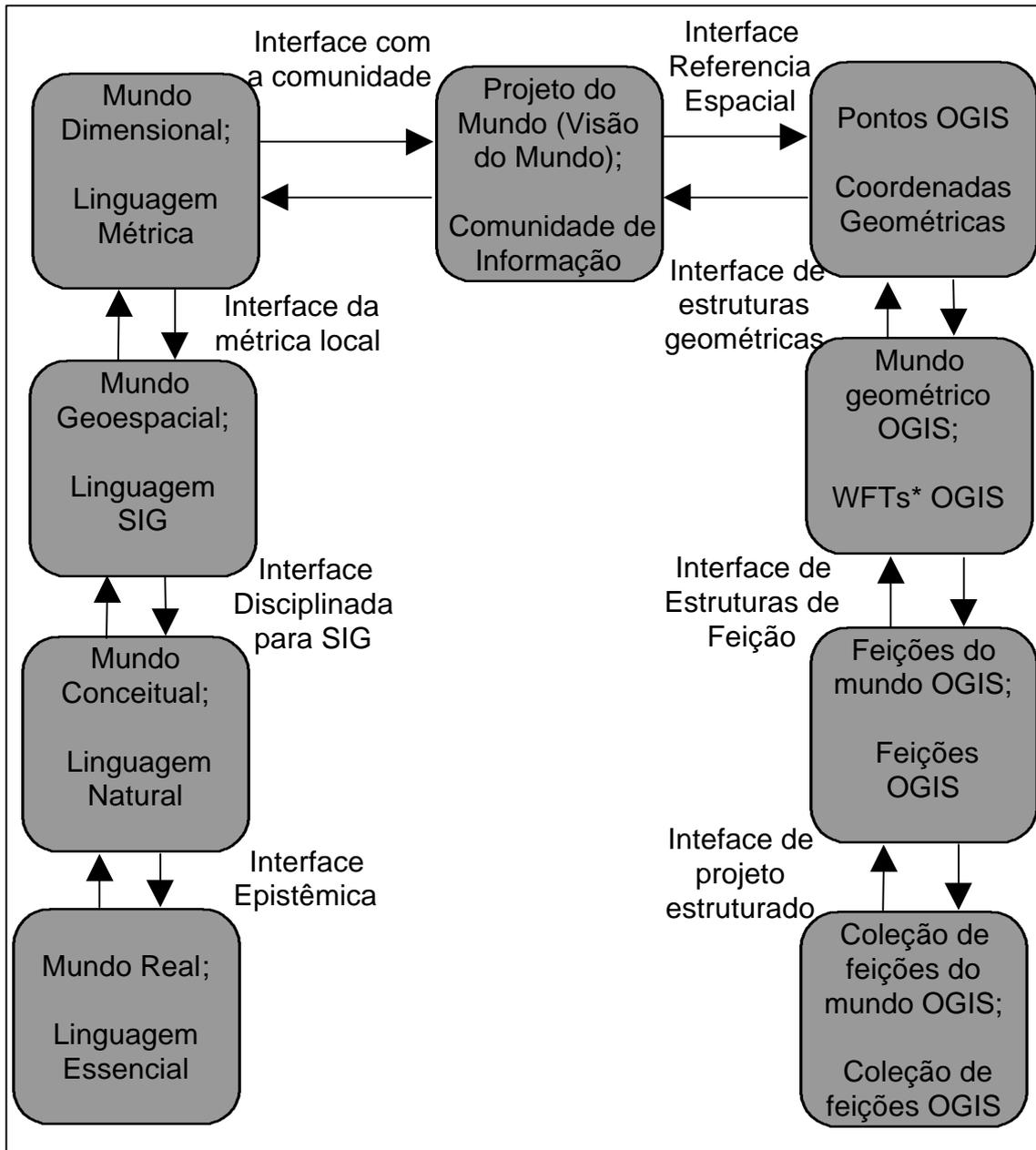


Fig. 4.15 - Os nove níveis de abstração definidos pelo OGIS.

FONTE : adaptada de OGC (1998A).

(*) "Well-Known-Types", ou seja, tipos bem conhecidos.

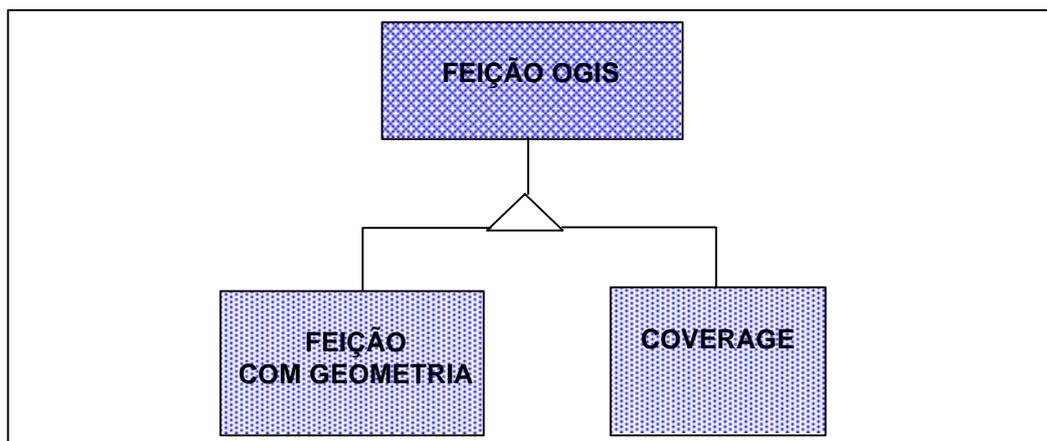


Fig. 4.16- Feição OGIS e seus subtipos.

FONTE : adaptada de OGC (1998B).

- um segmento de uma rodovia entre duas intercessões consecutivas;
- uma rodovia constituída de muitos segmentos;
- uma imagem de satélite georeferenciada;
- um pixel de uma imagem de satélite georeferenciada;
- uma rede de drenagem e
- uma rede triangular irregular.

Existem diferentes maneiras para criar a representação digital da informação geo-espacial. Esta riqueza de alternativas tem se tornado mais um problema do que um benefício. A variedade de estruturas de dados e formatos do SIGs torna a área confusa e aparentemente caótica, e atualmente tem criado obstáculos para os usuários.

A especificação abstrata que está sendo criada pelo OGIS tem o objetivo de colocar ordem neste caos.

4.4.3.2 - Especificação Abstrata de Feições

4.4.3.3 - Tipos de Feições

Até o presente momento o consenso existente sobre a definição de feição geográfica é apresentada, resumidamente, no parágrafo a seguir.

Uma feição pode ser composta por outras feições. Uma feição pode ser derivada de um tipo principal de feição. Uma feição deve ser instanciada de um tipo, quando solicitada por um cliente OPEN GIS e enviada a ele em um formato "bem conhecido".

O termo "bem conhecido" neste contexto significa: definido usando significados compreendidos pelos clientes OPEGIS. Isto pode ser definido explicitamente em uma especificação de implementação, mas provavelmente alguns significados são disponíveis pela tecnologia de distribuição que será utilizada (ex.: SQL, CORBA IDL.) (OGIS 1998A).

4.4.3.4 - Atributos de Feições

A uma feição são associados atributos. Cada atributo é distinto por um nome e um valor dentro do domínio de valores do atributo. Nomes e domínios de atributos associados são definidos pelo tipo do atributo.

Um subconjunto de atributos de uma feição pode ser geométrico (isto é, do tipo geométrico). Este subconjunto pode representar a extensão espacial de uma feição, ou pode ser vazio para feições de outros tipos.

4.4.3.5 - Identidade das Feições

Uma feição tem um identificador único dentro de um domínio e independe do valor de qualquer ou de todos os seus atributos associados.

4.4.3.6 - Persistência de Feições

Uma feição é geralmente persistente. Um consenso sobre o conceito de persistência está ainda em amadurecimento no OPENGIS. Esta é uma área onde é necessário trabalhos futuros.

4.4.3.7 - Instância de Feições

Uma feição pode ser referenciada como uma instância de feição.

4.4.3.8 - Coleção de Feições

Os membros do consórcio OGIS ainda não chegaram a um consenso em muitos assuntos sobre as coleções de feições. A seguir apresenta-se estes assuntos em discussão relacionado ao tema coleção de feição.

- uma feição pode ser uma composição de outras feições;
- uma área pode ser uma feição composta de feições contidas nela e
- uma feição pode ser “dividida” por limites de áreas, e pode ser reagrupada como uma única feição quando solicitada por uma interface ou por um serviço.

No entanto o mundo real, em alguns casos, é visto como uma coleção de feições que necessitam ser modeladas. Este mundo real inclui:

- projetos com limites bem definidos e feições que atendam certos critérios;

- produtos provenientes de agências governamentais, tais como SDTS e arquivos similares;
- bancos de dado de SIG e
- persistência e não persistência de coleções de feições presentes em um espaço de trabalho de um SIG.

Apesar destas dúvidas, a especificação do consórcio OPEN GIS expõe as seguintes características sobre coleção de feições em consenso.

- uma coleção de feições é uma instância de feição que agrupa outras feições;
- uma coleção de feições é também uma feição e por isso possui um tipo, identificador, um conjunto de atributos associados e podem participar de certos processos, e
- a utilização de coleção de feições inclui a representação lógica ou física de feições; feições complexas ou compostas; o resultado de uma consulta; uma coleção de feição criada para determinado propósito.

4.4.4 - Feição com Geometria

Feição com geometria é uma forma de representação dos fenômenos geográficos que ocorrem na Terra. Estes fenômenos geográficos, também denominados de feições geográficas, estão posicionados no mundo real em um sistema de coordenadas da Terra. A representação destes fenômenos no sistema de informação geográfica (SIG) se dará pelo “mapeamento” do seu posicionamento no sistema de coordenadas adotado pelo SIG. A Figura 4.17 ilustra a idéia.

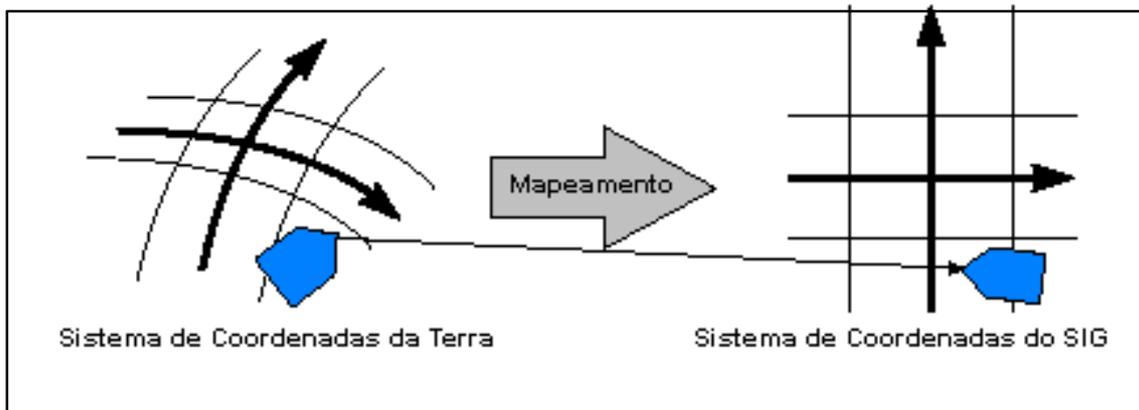


Fig. 4.17 - Uma forma de representação de feições geográficas.

FONTE : adaptada de OGC (1998C).

As feições geográficas são compostas por informações que as posicionam em coordenadas relativas da Terra, ou relativas a algum outro sistema. A técnica mais comum para representar o posicionamento e a forma de uma feição geográfica é a geometria (OGC, 1998C).

Portanto, estas feições geográficas são vistas como um ponto, um polígono ou alguma outra representação geométrica. Os SIGs fornecem tecnologia para a representação destas geometrias no seu sistema de coordenadas.

4.4.4.1 - Geometria

Geometria é a combinação de coordenadas geométricas e um sistema de referência. A coordenadas geométricas consistem de quatro itens:

- 1) Uma sequência de coordenadas (pontos), todas provenientes de um mesmo sistema de referência.
- 2) Uma coleção de geometrias, todas provenientes de um mesmo sistema de referência.

3) Um algoritmo de interpretação que usa estas geometrias e coordenadas para construir uma entidade geométrica que define uma geometria no tempo e no espaço. Uma entidade geométrica pode ser composta de outras entidades geométricas, e uma entidade geométrica pode ser compartilhada, como componente, por outras entidades.

4) Um sistema de referência espaço-temporal para dar à geometria uma melhor interpretação do mundo real.

A representação geométrica da feição geográfica segue critérios e especificações para garantir a sua manipulação por operadores topológicos tais como: interior, adjacência, intersecção, união, subtração, disjunção, dentro de, contido em, sobreposição, etc.. Para uma especificação em detalhes destes critérios e operadores topológicos consultar (OGIS, 1998C).

4.4.5 - Coverage

As *coverages* em SIG, incluindo o caso de imagem de satélite, são metáforas de duas ou mais dimensões de fenômenos de uma área da superfície da Terra. Constituem a segunda forma de representação de feições geográficas.

Fundamentalmente, *coverages* fornecem uma visão n-dimensional, onde n é usualmente 2 e ocasionalmente 3 ou maior, de um espaço de feições geográficas. Esta visão deverá ser geo-espacialmente registrada com a Terra.

É útil utilizar a seguinte analogia: o domínio espacial de uma *coverage* é como uma “view port” sobre a tela de um vídeo, e existe uma função (FUNÇÃO_C) que associa as cores de uma “viewport” aos fenômenos reais que ela busca representar.

As *coverages* tem a capacidade de modelar e tornar visível os relacionamentos espaciais entre fenômenos da Terra e a sua distribuição espacial.

4.4.5.1 - Propriedades

Uma *coverage* possui uma propriedade denominada de “Função_Coverage” cujo valor é uma FUNCAO_C. A FUNCAO_C é uma função que tem um domínio espacial e seu intervalo de valores é um conjunto de tuplas homogêneas. Este intervalo pode ser simplificado para ser uma coleção de vetores homogêneos (que são coordenadas numéricas).

Um domínio espacial pode ser qualquer geometria ou uma coleção de geometrias. Usualmente, a geometria é acompanhada por uma referência em um sistema espacial, e seus pontos estão associados às localizações. Normalmente um domínio espacial inclui retângulos fechados, conjuntos de pontos, grades, triângulos, e outras coleções de geometrias.

Uma *coverage* pode ter mais que uma propriedade FUNCAO_C como valor.

O intervalo de valores de uma FUNCAO_C é um conjunto de valores usualmente representados como uma coleção de vetores.

FUNCAO_C: (Geometria no domínio espacial) -> (v1, v2, v3, ..., vn)

Por exemplo, uma FUNCAO_C pode associar a cada ponto valores de temperatura, pressão, umidade, e velocidade do vento de noite. Neste caso, todo ponto é mapeado para um vetor de 4 dimensões.

Uma *coverage* é projetada para representar uma única feição ou um conjunto de feições. Por exemplo, uma *coverage* pode ter um domínio espacial que contenha um único município ou um único país. Em um outro caso uma

coverage pode ser tratada para modelar uma única feição (país), ou como uma coleção de feições (coleção de municípios).

A Figura 4.18 ilustra os diversos subtipos de *coverage* prevista no OGIS.

Para um maior detalhamento sobre os tipos de *coverage* apresentados e suas propriedades ver OGIS (1998B).

Como decorrência deste estudo sobre a especificação OPEN GIS, concluímos preliminarmente, que ainda existem muitos pontos a serem amadurecido e consolidados e que qualquer interpretação desta especificação pode ser considerada uma “aproximação”. Neste sentido elaboramos e propomos um modelo semântico orientado por objetos que, segundo nosso entendimento, mais se aproxima ao estágio atual da especificação OPEN GIS. A Figura 4.19 apresenta este modelo.

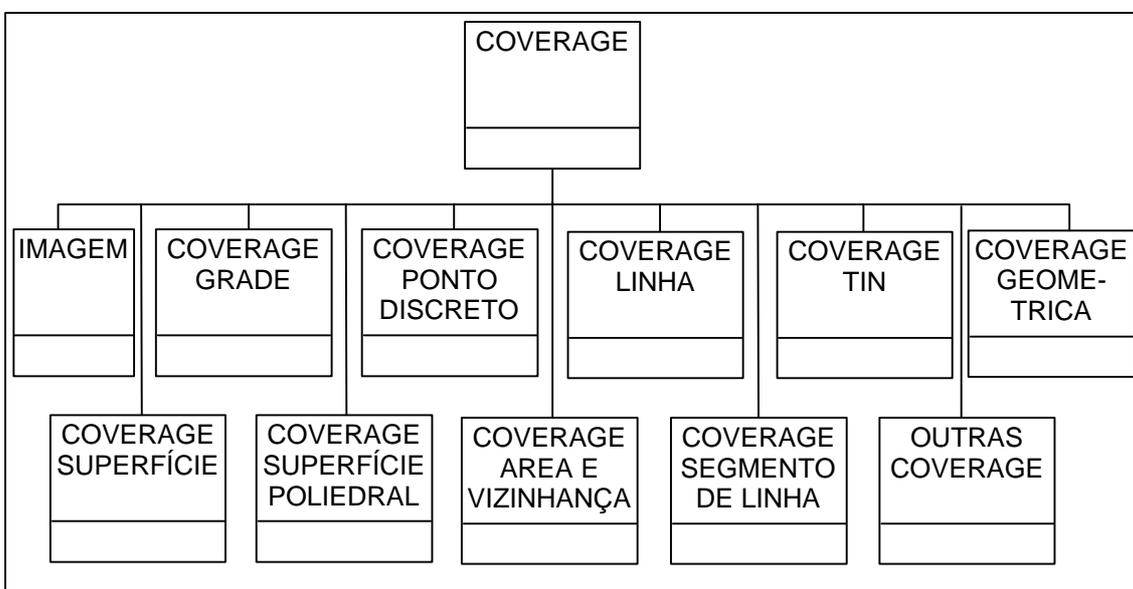


Fig. 4.18 - Subtipos de Coverage.

FONTE : adaptada de OGC (1998B).

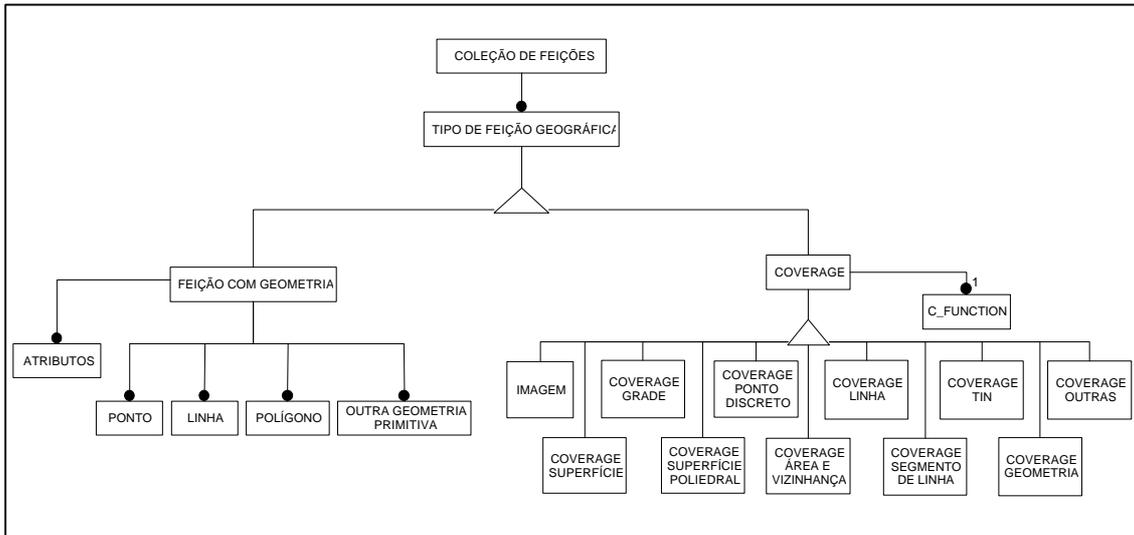


Fig. 4.19 - Modelo semântico que se aproxima da especificação OPEN GIS.

4.5 - Comparação entre os SIGs e o padrão OGIS

Este item tem a pretensão de realizar uma comparação entre os três SIGs apresentados, tomando como referência dois conceitos do OGIS: feição com geometria e *coverage*. Trata-se de um desenvolvimento onde será buscado mostrar até onde cada um destes sistemas aderem a esses dois conceitos.

4.5.1 - MGE e OGIS

4.5.1.1- Feição com Geometria

O conceito de feição geográfica é apresentada pelo MGE como sendo a representação dos fenômenos geográficos do mundo real e possui informações descritivas no banco de dados. A representação geométrica de cada feição é materializada em um mapa. Cada feição com geometria possui um identificador e é classificada em uma classe de feição que compõe uma categoria. A definição de que feição com geometria pode ser composta por

outras feições com geometria pode ser contemplada por este item através do mecanismo existente entre categoria de feições que podem ser compostas por classes de feições.

4.5.1.2 - Coverage

O MGE não captura a visão semântica do modelo OGIS que considera as diferentes especialização do conceito *coverage*. Alguns subtipos de *coverage* no MGE são tratados de forma independente por módulos específicos como é o caso de grade irregular triangular e grade regular. Neste caso a aderência ao modelo OGIS é parcial.

4.5.2 - Arc/Info e OGIS

4.5.2.1 - Feição com Geometria

O modelo de dados vetorial é responsável por representar as feições geográficas através do modelo geo-relacional onde a parte gráfica é especializada pelas geometrias ponto, linhas e polígonos, e a parte descritiva é representada por tabelas de atributos no SGBD relacional. Apesar da parte gráfica possuir uma representação geométrica, ela somente pode ser materializada no sistema através de uma estrutura denominada *coverage*. Não é possível conceber feição com representação geométrica sem a existência de *coverage*. Portanto concluímos que o Arc/info adere parcialmente ao conceito de feição com geometria.

4.5.2.2 - Coverage

Coverage, no Arc/Info, é definido como o método primário para representar o modelo de dados vetorial, assim como “GRID” é o método para representar o

modelo de dados matricial, e o “TIN” é o método para representar o modelo de dados de rede irregular triangular. Devido à existência de um sub-tipo de *coverage* denominado *coverage* geométrica, deduzimos que este sub-tipo é o mais próximo correspondente à estrutura *coverage* do ARC/INFO.

Já o modelo de dados matricial e o modelo de dados de rede irregular triangular são contemplados no OGIS como sub-tipos de *coverage*: *coverage* grade e *coverage* TIN respectivamente. No Arc/Info estes modelos possuem representações específicas, no caso: “GRID” e “TIN”. Portanto para este item a aderência é parcial.

4.5.3 - SPRING e OGIS

4.5.3.1 - Feição com Geometria

No SPRING, as feições geográficas do mundo real são modeladas por dois grandes tipos de dados: geo-objetos e geo-campos. Os geo-objetos representam feições geográficas com identidades únicas e possuem uma descrição no banco de dados. Além disto eles são representados por uma ou mais geometrias no sistema, como é o caso de uma representação de um mesmo geo-objeto em duas escala diferentes: em uma ela pode ser um ponto em outra pode ser um polígono.

Portanto a definição de geo-objetos adere à definição de feição com geometria do OGIS. Ressalve-se porém, que a da feição com geometria que pode ser composta por outras feições com geometria, conceito este não encontrado no referido sistema

4.5.3.2 - Coverage

A definição de geo-campos implementada pelo SPRING representa a distribuição espacial das feições geográficas no mundo real. Dentro deste contexto, o geo-campo e suas especialidades contemplam a definição de *coverage* do OGIS.

A Tabela 4.1 mostra um resumo das comparações realizadas anteriormente tendo como referência o conceito OGIS para feição com geometria e *coverage*.

4.5.4 - Uma Breve Conclusão

Sob o ponto de vista semântico nenhum dos sistemas apresentados adere por completo ao padrão OGIS. Pode-se citar, para exemplificar esta afirmação, os seguintes fatos:

- 1)** No MGE, a noção de especialização de tipos de feições, representada por categoria e classes de feições, não é contemplada pelo OGIS de forma explícita e direta.
- 2)** No Arc/Info existe a noção de *coverage* e não contempla a idéia de feição com geometria como entidade independente da *coverage*. A noção de *coverage* no Arc/Info pode ser mapeado parcialmente para o conceito de *coverage* geométrica no OGIS.
- 3)** A separação explícita entre feição geográfica e sua geometria, presente no SPRING, não é disponível diretamente no OGIS.

Como a especificação do padrão OGIS é um processo em evolução, isto é, não se esgotou até o momento destas análises, é possível que em versão mais avançadas no futuro, tais fatos poderão ser contemplados de forma explícita.

**TABELA 4.1 - QUADRO COMPARATIVO ENTRE OS TRÊS SIGS E OS
CONCEITOS FEIÇÃO COM GEOMETRIA E COVERAGE DO OGIS**

SIGs		Feição c/ Geometria	Coverage
Arc/Info	aderência	LIMITADA(*)	PARCIAL
	detalhe	As feições com geometria somente se materializam com a existência das <i>Coverages</i> . Não há o conceito uma feição com geometria que pode ser composta por outras feições com geometria	O modelo de dados vetorial adere ao sub-tipo Coverage Geométrica, o modelo de dados de Grade Regular adere ao sub-tipo de Grade Coverage, e o modelo de dados de grade irregular triangular adere ao sub-tipo TIN coverage.
MGE	aderência	PARCIAL	LIMITADA
	detalhe	Não há o conceito uma feição com geometria que pode ser composta por outras feições com geometria.	O modelo de dados matricial e de grade triangular irregular possui método de representação específico. Existem os módulos específicos para a representação de feições geográfica distribuídas espacialmente.
SPRING	Aderência	PARCIAL	PARCIAL
	detalhe	Geo-objetos e suas especialidades. Não tem o conceito uma feição com geometria que pode ser composta por outras feições com geometria	Geo-Campos e suas especialidades. Porém não suporta a noção de vetor de valores para cada ponto.

(*) As classes de avaliação adotadas são: TOTAL, PARCIAL e LIMITADA

FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS DA CIÊNCIA DA GEOINFORMAÇÃO

Gilberto Câmara

Antônio Miguel Vieira Monteiro

José Simeão de Medeiros

5.1 DA NECESSIDADE DE CONCEITOS

A tecnologia de sistemas de informação geográfica evoluiu de maneira muito rápida a partir da década de 70. Como este desenvolvimento foi motivado desde o início por forte interesse comercial, não foi acompanhado por um correspondente avanço nas bases conceituais da geoinformação; como resultado, o aprendizado do Geoprocessamento tornou-se singularmente dificultado. Ao contrário de outras disciplinas (como Banco de Dados), não há um corpo básico de conceitos teóricos, que sirva de suporte para o aprendizado da tecnologia, mas uma diversidade por vezes contraditória de noções empíricas. Muitos livros-texto e cursos são organizados e apresentados em função de um sistema específico, sem fornecer ao aluno uma visão sólida de fundamentos de aplicação geral.

As raízes deste problema estão na própria natureza interdisciplinar (alguns diriam *transdisciplinar*) da Ciência da Geoinformação. Ponto de convergência de áreas como Informática, Geografia, Planejamento Urbano, Engenharia, Estatística e Ciências do Ambiente, a Ciência da Geoinformação ainda não se consolidou como disciplina científica independente; para que isto aconteça, será preciso estabelecer um conjunto de conceitos teóricos, de aplicação genérica e independentes de aspectos de implementação.

Para estabelecer as bases epistemológicas da Ciência da Geoinformação, será preciso – em primeiro lugar – identificar as fontes de contribuição teórica nas quais poderemos buscar bases para a reflexão. Este trabalho propõe tomar o conceito de *espaço geográfico* como uma noção-chave, a partir do qual podemos construir os fundamentos teóricos desta nova disciplina científica. Consideramos que, apesar de seu caráter interdisciplinar, o fundamento básico da Ciência da Geoinformação é a *construção de representações computacionais do espaço*. Assim, ao revisar as principais concepções da Geografia, na perspectiva da construção de sistemas de informação, estaremos contribuindo não apenas para a fundamentação teórica do Geoprocessamento, como ainda buscando inspiração para o projeto das novas gerações de GIS.

Ao fazer uma revisão das diferentes concepções de *espaço geográfico*, não pretendemos estabelecer juízo de valor, mas estabelecer como a tecnologia de GIS permite a expressão computacional destes conceitos e o que estas diferentes escolas nos podem ensinar sobre as limitações atuais do Geoprocessamento. Para tanto, selecionamos alguns autores

representativos de diferentes correntes da geografia. No caso da Geografia Regional¹, partimos dos conceitos de (Hartshorne, 1936). Para a Geografia Quantitativa (no Brasil também chamada de Teórica), tomamos como base (Harvey, 1969) e (Chorley and Haggett, 1967). No caso da Geografia do Tempo, utilizamos (Hägerstrand, 1967). Nossa discussão da Geografia Crítica está baseada nos trabalhos de (Santos, 1996) e (Harvey, 1989). Para esta revisão, utilizamos ainda os trabalhos de (Christofolletti, 1985) (Moraes, 1995) e (Corrêa, 1995).

5.2 A GEOGRAFIA IDIOGRÁFICA DE HARTSHORNE E O GEOPROCESSAMENTO

Em seu livro “Os Princípios e a Natureza da Geografia”, Hartshorne procurou consolidar um base teórica para os estudos geográficos baseada no conceito da “unicidade”. Na sua visão, o objeto de estudo da Geografia seria “o estudo de fenômenos individuais” e a “a preocupação com o único na geografia não está limitada ao fenômeno mas também se aplica a relacionamentos entre os fenômenos” (Hartshorne, 1936).

O conceito de “unidade-área” é apresentado em por (Hartshorne, 1936) como elemento básico de uma sistemática de estudos geográficos, denominada pelo autor de “estudos de variação de áreas”. Na visão de Hartshorne, uma *unit-area* é uma partição do espaço geográfico, definida pelo pesquisador em função do objeto de estudo e da escala de trabalho, que apresenta características individuais próprias; estas “unidade de área” seriam a base de um sistema de classificação e organização do espaço. A partir da decomposição do espaço em “unidades de área”, o pesquisador poderá relacionar, para cada uma destas partições, as correspondentes características físicas e bióticas que a individualizam em relação a todas as demais componentes do espaço. Hartshorne chamou esta abordagem de “Geografia Idiográfica”.

Hartshorne argumenta que o caráter de cada área seria dado pela integração das diferentes variáveis geográficas, tomadas em conjunto. (Moraes, 1995) assim exemplifica o método proposto por Hartshorne:

“O pesquisador seleciona dois ou mais fenômenos (p.ex. clima, produção agrícola, tecnologia disponível), observa-os, relaciona-os; repete várias vezes este procedimento, tentando abarcar o maior número de fenômenos (tipo de solo, destino da produção, número de cidades, tamanho do mercado consumidor, hidrografia, etc.). Uma vez de posse de vários fenômenos agrupados e interrelacionados, integra-os. (...) Este processo pode ser repetido várias vezes, até o pesquisador compreender o caráter da área enfocada (...)

O pesquisador pode parar na primeira integração, e reproduzir a análise (tomando os mesmos fenômenos e fazendo as mesmas interrelações) em outros lugares. As

¹ No caso das denominações das diferentes escolas de Geografia, adotamos a terminologia de 24. MORAES, A. C. R. **Geografia: Pequena História Crítica**. São Paulo, Hucitec, 1995..

comparações das integrações obtidas permitiriam chegar a um padrão de variação daqueles fenômenos tratados”.

A proposta de Hartshorne contribuiu para dar uma base metodológica para o uso do conceito de “unidade de área” em Geoprocessamento. A representação computacional correspondente aos conceitos de “unidade de área” em Hartshorne é o polígono fechado, que delimita cada região de estudo e um conjunto de atributos, tipicamente armazenados num banco de dados relacional. Um procedimento típico para aplicar a abordagem de Hartshorne em um ambiente de GIS seria:

- Tomando-se como base uma representação pictórica do espaço (como uma foto aérea ou imagem de satélite) e levantamentos preliminares de campo, realiza-se uma delimitação de unidades-área na região de estudo.
- Como alternativa, utilizam-se dados de cartografia temática e análises booleanas do tipo “SE...ENTÃO” para produzir um mapa de interseções dos diversos conjuntos de interesse. Estas interseções delimitam as unidades-área.
- Através de levantamentos de campo ou da integração de dados já disponíveis, como mapas pedológicos e vegetação, caracteriza-se cada unidade-área com os atributos que a singularizam das demais unidades. O resultado é um banco de dados geográficos com unidades-área delimitadas por polígonos, com um conjunto de atributos para cada unidade.
- Através de ferramentas de consulta (por atributos e espacial) do GIS, pode-se inferir as relações conjuntas entre as diversas unidades-área.

Do ponto de vista da representação computacional, o conceito de “unidade-área” de Hartshorne é equivalente aos conceitos de *unidade de paisagem* (Tricart, 1977)) e *land-unit* (Zonneveld, 1989), todos baseados no conceito-chave de delimitação de unidades homogêneas. Numa visão geral, pode-se dizer que a atual geração de GIS permite a realização dos conceitos de Hartshorne (e equivalentes), com poucas limitações.

5.3 A GEOGRAFIA QUANTITATIVA E O GEOPROCESSAMENTO

A base da Geografia Quantitativa (também chamada nos países de língua inglesa de *New Geography*) é a busca da aplicação do método hipotético-dedutivo que caracteriza as ciências naturais nos estudos geográficos. Típico desta perspectiva é o livro *Explanation in Geography* (Harvey, 1969), que propunha uma aplicação dos paradigmas de generalização e refutação, amplamente utilizados por disciplinas como Física, Química e Biologia, para os estudos geográficos. A lógica subjacente ao método hipotético-dedutivo é a de que existe uma realidade externa à nossa existência, e esta realidade pode ser capturada (ainda que de forma aproximada) utilizando os princípios da lógica e da matemática. Através de estudo e análise, os fenômenos podem ser explicados através de teorias científicas, que devem ser passíveis de experimentação e portanto, de refutação (Popper, 1975).

Ao criticar a falta de teorias explícitas na Geografia Idiográfica, os geógrafos desta escola passaram a utilizar teorias disponíveis em outras disciplinas científicas (Christofoletti, 1985). Na perspectiva da Geografia Quantitativa, é preciso construir modelos a ser utilizados na análise dos sistemas geográficos; estes modelos, construídos de forma teórica, devem ser verificados e validados com dados de campo a partir de técnicas estatísticas (Chorley and Haggett, 1967). Neste contexto, o estudo dos padrões de distribuição espacial dos fenômenos (eventos pontuais, áreas e redes) passa a formar uma base para estudos quantitativos do espaço.

A Geografia Quantitativa coloca grande ênfase em técnicas de Análise Espacial e Geoestatística (Bailey and Gattrel, 1995) e assim, conceitos advindos da Estatística Espacial passam a fazer parte do repertório dos geógrafos. Em particular, sobressai a idéia de *autocorrelação espacial* (Goodchild, 1988), como expressão básica da dependência entre observações no espaço em regiões vizinhas. Outro forte conceito oriundo da teoria estatística é a noção de *processo estacionário*, que indica uma área de trabalho na qual as relações entre as medidas são função da distância. Estes conceitos permitem a construção de superfícies, a partir de amostras de campos, com o uso de procedimentos geoestatísticos como a krigagem, ao qual podemos associar medidas de *incerteza*. Inicialmente propostas para a modelagem de recursos naturais (Goovaerts, 1997), as técnicas de estatística espacial vem sendo cada vez mais utilizadas para análise espacial de dados sócio-econômicos (Anselin, 1988) (Getis and Ord, 1996).

Vale notar que a caracterização de vizinhanças e processos estacionários é feita no *espaço absoluto* (ou cartesiano), definido a partir das relações espaciais típicas como as relações topológicas, direcionais e de distância. Alternativamente, (Harvey, 1969) advoga o uso do *espaço relativo* (ou *espaço das redes*), definido a partir das relações de *conectividade* entre os objetos, relações estas que implicam custos – dinheiro, tempo, energia – para se vencer a fricção imposta pela conexão (Corrêa, 1995). Entre os fenômenos geográficos representados no espaço relativo, incluem-se relações como fluxo de pessoas ou materiais, conexões funcionais de influência, comunicação e acessibilidade os objetos estabelecem relações entre si que dependem da conectividade.

A Geografia Quantitativa também tem buscado suporte computacional na Inteligência Artificial, em áreas como Redes Neurais, Autômatos Celulares e Lógica Nebulosa (“fuzzy logic”) (Burrough and Frank, 1996; Openshaw and Openshaw, 1997). No caso da lógica nebulosa (para citar um exemplo), a motivação básica parte das limitações das representações exatas (tipicamente realizadas por meio de polígonos). No dizer de Burrough:

“Os limites desenhados em mapas temáticos (como solo, vegetação, ou geologia) raramente são precisos e desenhá-los como linhas finas muitas vezes não representa adequadamente seu caráter. Assim, talvez não nos devamos preocupar tanto com localizações exatas e representações gráficas elegantes. Se pudermos aceitar que limites precisos entre padrões de vegetação e solo raramente ocorrem, nós estaríamos livres dos problemas de erros topológicos associados como superposição e interseção de mapas”(Burrough, 1986)

Com a escola Quantitativa, os estudos geográficos passam a incorporar, de forma intrínseca, o computador como ferramenta de análise. Neste sentido, o aparecimento, em meados da década de 70, dos primeiros sistemas de informação geográfica (GIS), deu grande impulso a esta escola. Ainda hoje, em países como os Estados Unidos, em que a Geografia Quantitativa é a visão dominante, os GIS são apresentados como as ferramentas fundamentais para os estudos geográficos, como indica o recente estudo da “National Academy of Sciences” (National Research Council, 1997).

De uma forma bastante geral, pode-se dizer a forma privilegiada de representação computacional associada à Geografia Quantitativa são as *superfícies*, que no computador correspondem a grades regulares e malhas triangulares e as *redes*, representadas por *matrizes de interação espacial*. As *superfícies* podem ser computadas a partir de dados de campo e também “dissolvendo-se” os limites poligonais que correspondem às unidades-área.

As *redes* são representadas através de matrizes de interação espacial, nas quais cada localidade onde se originam e destinam fluxos é representada por um ponto no espaço e os fluxos entre estas entidades são indicados como entradas numa matriz origem-destino. A partir desta matriz, pode-se computar modelos de alocação de recursos, usualmente apenas baseados em fluxos de recursos ou fluxos de transporte. Dentre estes modelos, destacam-se os *modelos gravitacionais*, assim chamados porque baseados na idéia de “atração” entre localidades a partir de “massas” atribuídas aos atributos destas localidades e da distância entre elas.

Apesar da forte relação entre os conceitos da Geografia Quantitativa e o Geoprocessamento, apenas a partir de meados da década de 90, os GIS passam a dispor de representações computacionais adequadas à plena expressão dos conceitos desta escola. As técnicas de geostatística ainda estão em processo de integração aos principais sistemas de informação geográfica, e os processos de modelagem e propagação de incerteza (Heuvelink, 1998) ainda precisam ser plenamente incorporados aos GIS.

Adicionalmente, a tecnologia atual de Geoprocessamento ainda enfatiza a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática. No entanto, um significativo conjunto de fenômenos espaciais, tais como escoamento de água da chuva, planejamento urbano e dispersão de sementes, entre outros, são inerentemente dinâmicos e as representações estáticas utilizadas em GIS não os capturam de forma adequada. Deste modo, um dos grandes desafios da Ciência da Informação Espacial é o desenvolvimento de técnicas e abstrações que sejam capazes de representar adequadamente fenômenos dinâmicos.

Para representar os conceitos de modelos espaço-temporais, apenas a representação de superfícies em grades regulares não é suficiente. As leis que governam a dinâmica dos processos (sejam estes físicos ou sociais), precisam ser expressas através de equações iterativas, que incorporadas ao ambiente de GIS, permitem a simulação de fenômenos espaço-temporais (Burrough, 1998). Nos anos recente, o desenvolvimento de técnicas de modelagem dinâmica tem tomado duas grandes direções:

- modelos de processos físicos, tipicamente associados a problemas hidrológicos ou ecológicos, como os disponíveis no ambiente *PCRaster* (Wesseling, Karssenberget al., 1996).
- modelos de sistemas sócio-econômicos, que variam desde modelos de micro-escala baseados em autômatos celulares (Couclelis, 1997) a modelos multi-escala que incorporam efeitos de variáveis exógenas (White and Engelen, 1997).

Deste modo, o desafio de incorporação da Geografia Quantitativa ao GIS ainda não está plenamente realizado. Especialmente no caso de modelos para processos espaço-temporais, os GIS ainda se comportam mais como “sistemas cartográficos de informação” do que como “sistemas de informação geográfica”, devido à natureza estática de suas representações computacionais. Esperamos que os próximos anos tragam avanços substanciais nestas técnicas, especialmente no caso de modelagem dinâmica.

5.4 A GEOGRAFIA CRÍTICA E O GEOPROCESSAMENTO

5.4.1 Introdução

A ênfase da Geografia Quantitativa no uso de grandezas mensuráveis para caracterização do espaço geográfico vem sendo objeto de fortes críticas nas últimas duas décadas. Estas críticas argumentam que, apesar dos resultados obtidos no estudo dos padrões espaciais, as técnicas da Geografia Quantitativa não conseguem explicar os processos sócio-econômicos subjacentes a estas distribuições, nem capturar o componente das ações e intenções dos agentes sociais (Harvey, 1988). A visão desta nova escola (aqui chamada de Geografia Crítica, adotando a terminologia de (Moraes, 1995)) é ainda motivada pelo contexto de uma diferenciação ideológica. Para os críticos mais extremados, a Geografia Quantitativa estaria comprometida com uma grande visão ideológica associada à expansão do capitalismo, e os muitos teóricos da Geografia Crítica tomam por base a filosofia marxista na construção de seus conceitos.

Vale ressaltar que não pretendemos realizar, no contexto deste artigo, que busca examinar os conceitos básicos da Ciência da Informação Espacial, uma análise comparativa entre a Geografia Crítica e a Geografia Quantitativa. Importa considerar aqui a relevância conceitos teóricos de espaço apresentados pelos proponentes da Geografia Crítica para o projeto de uma nova geração de GIS. Neste contexto, estaremos analisando, conceitos propostos por David Harvey, Manuel Castells e Milton Santos.

Em especial, Milton Santos é um dos geógrafos mais empenhados em apresentar novos conceitos de espaço geográfico. Em seus trabalhos, Santos dá especial ênfase ao papel da tecnologia como vetor de mudanças da sociedade e condicionante da ocupação do espaço, no que denomina o “meio técnico-científico-informacional”. Apesar de enfatizar a contribuição da tecnologia para a Geografia, Santos não examina em detalhe o problema do uso direto de ferramentas tecnológicas como GIS em estudos geográficos. Mesmo assim, seus

conceitos são extremamente relevante para a definição de uma epistemologia da Ciência da Informação Espacial, como se verá a seguir.

No caso de Milton Santos, é preciso considerar que o próprio autor apresenta diferentes concepções do espaço geográfico, ao longo de sua carreira. Deste modo, examinaremos nas próximas seções três concepções distintas (mas complementares) de espaço em Milton Santos. Na seção 4.2, a noção que “*o espaço é organizado pelas relações de forma, função, estrutura e processo*” (Santos, 1985), na seção 4.3, a idéia que “*o espaço é um sistema de fixos e fluxos*” (Santos, 1978) e na seção 4.4, o mais recente conceito: “*o espaço é um sistema de objetos e um sistema de ações*” (Santos, 1996).

5.4.2 Milton Santos e as Dualidades Forma-Função e Estrutura-Processo

Em seu livro “Espaço e Método”, (Santos, 1985) utiliza os conceitos de *forma, função, estrutura e processo* para descrever as relações que explicam a organização do espaço. A *forma* é o aspecto visível do objeto, referindo-se, ainda, ao seu arranjo, que passa a constituir um padrão espacial; a *função* constitui uma tarefa, atividade ou papel a ser desempenhado pelo objeto; a *estrutura* refere-se à maneira pela qual os objetos estão inter-relacionados entre si, não possui uma exterioridade imediata - ela é invisível, subjacente à forma, uma espécie de matriz na qual a forma é gerada; o *processo* é uma estrutura em seu movimento de transformação, ou seja, é uma ação que se realiza continuamente visando um resultado qualquer, implicando tempo e mudança. Para citar o autor:

“Forma, função, estrutura e processo são quatro termos disjuntivos associados, a empregar segundo um contexto do mundo de todo dia. Tomados individualmente apresentam apenas realidades, limitadas do mundo. Considerados em conjunto, porém, e relacionados entre si, eles constroem uma base teórica e metodológica a partir da qual podemos discutir os fenômenos espaciais em totalidade”. (Santos, 1985).

A relevância deste conceito de espaço para a Ciência da Informação Espacial é mais conceitual do que prática, pois aponta essencialmente para limitações dos sistemas computacionais de representação de informação. Nesta perspectiva, pode-se afirmar que as técnicas atuais de Geoprocessamento não conseguem resolver de forma plena as dualidades *forma-função* e *estrutura-processo*, pois o uso de representações computacionais geométricas (como polígonos ou grades regulares) e de modelos funcionais (cadeias de Markov, modelos de difusão espacial) sempre implica numa materialização das noções de espaço. Na atual geração de GIS, podemos caracterizar adequadamente a *forma* de organização do espaço, mas não a *função* de cada um de seus componentes; podemos ainda estabelecer qual a *estrutura* do espaço, ao modelar a distribuição geográfica das variáveis em estudo, mas não capturarmos, em toda a sua plenitude, a natureza dinâmica dos *processos* de constante transformação da natureza, em conseqüência das ações do homem.

Mesmo quando utilizamos ferramentas de modelagem dinâmica (Couclelis, 1997; Burrough, 1998), e realizamos aproximações dos processos físicos e urbanos de uso e

transformação do espaço, a ênfase das representações computacionais é sempre nos aspectos *estruturais* do espaço (como no uso de autômatos celulares para modelar transições do uso do solo urbano).

Deste modo, as dualidades *forma-função* e *estrutura-processo* apontam para deficiências estruturais de todas os sistemas de informação, no atual estágio do conhecimento. Para remover estes limites, será preciso avançar muito na direção de técnicas de Representação do Conhecimento e Inteligência Artificial (Sowa, 2000), o que leva a considerações mais genéricas (e fora do escopo deste artigo) sobre as próprias limitações do computador enquanto tecnologia de processamento da informação. O leitor interessado deve referir-se a (Penrose, 1989) e (Searle, 1984).

5.4.3 Harvey, Castells, Santos: A Compressão do Espaço-Tempo e a Geografia da Redes

Em “*A Condição Pósmoderna*” (Harvey, 1989), David Harvey faz uma análise abrangente das novas relações de produção da sociedade atual. Para Harvey, a mudança cultural mais importante nos anos recentes é aquela provocada pelo impacto na experiência humana com os novos conceitos de espaço e tempo. Ele lembra que do século XVI ao XIX a velocidade média das diligências e dos navios a vela era de 20 km/h. A partir de meados do século XIX, as locomotivas a vapor chegavam a 100 km/h. Com os aviões a jato a partir de meados do século XX, alcançamos 800 Km/h. Atualmente, com as telecomunicações, podemos trocar documentos e realizar reuniões com pessoas em outros lugares do mundo de forma simultânea.

Segundo Harvey, a compressão do espaço-tempo é uma componente essencial das novas formas de produção capitalista, em que o capital financeiro adquire autonomia com relação ao capital industrial e à própria governabilidade das nações. Neste cenário, o fluxo internacional de recursos (feito quase exclusivamente com suporte de telecomunicações) restringe o poder regulador dos Estados de uma forma inédita na História.

Quais as conseqüências deste conceito para a Ciência da Informação Espacial? Observemos que a maior parte das técnicas de Análise Espacial (Bailey and Gattrel, 1995) está baseada no conceito de *proximidade*. Medidas como o variograma e os indicadores locais e globais de autocorrelação espacial fazem uso implícito da “lei de Tobler”: “no mundo, todas as coisas se parecem; mas coisas mais próximas são mais parecidas que aquelas mais distantes” (Tobler, 1979). A compressão do espaço-tempo subverte esta lógica previsível de organização do espaço e estabelece um substancial desafio conceitual para sua representação computacional. Do ponto de vista da Análise Geográfica, os conceitos de Harvey implicam que a forma tradicional de expressar as relações espaciais entre entidades geográficas (propriedades como *adjacência* e *distância euclidiana*) capturam apenas efeitos locais, e não permitem representar a dinâmica dos fenômenos sociais e econômicos de nosso tempo.

Numa visão mais abstrata do que prática, alguns autores tem se referido a “espaços de geometria variável” (Castells, 1999) para denotar a situação em que as articulações materiais entre os agentes econômicos e sociais ocorrem de forma muitas vezes independentes da contiguidade física. Esta situação nos leva a novos conceitos do espaço, em que os *fluxos*

passam a ser um componente essencial. “Fluxos de capital, fluxos da informação, fluxos de tecnologia, fluxos de interação organizacional, fluxos de imagens, sons e símbolos” (Castells, 1999) tornam-se elementos constituidores de nossa sociedade, questionando a aplicabilidade geral da lei de Tobler.

O resultado da compressão do espaço-tempo gerada pelos avanços da tecnologia e pela crescente integração das práticas econômicas tem levado a novas definições do espaço. Milton Santos fala em “espaço de fixos e espaço de fluxos” (Santos, 1978) e Manuel Castells em “espaço de fluxos e espaço de lugares”. Subjacente a estas noções está o processo de “crescente internacionalização da produção capitalista, que resulta em padrões de localização que alteram profundamente as características do espaço industrial e seu impacto no desenvolvimento urbano” (Castells, 1999).

O “espaço de lugares” representa os arranjos espaciais formados por localizações contíguas, numa interação definida pela própria condição de moradia das pessoas e sua lógica cotidiana. No entanto, o “espaço dos fluxos” é, crescentemente, o determinante das relações de poder e das movimentos de circulação de bens e serviços. Isto gera uma “esquizofrenia estrutural entre duas lógicas espaciais”, que “ameaça romper os canais de comunicação da sociedade” (Castells).

Os desafios para a Ciência da Informação Espacial são aqui consideráveis. Em especial, trata-se de combinar os modelos de interação espacial (que determinam os fluxos), com modelos de escala local (representados, por exemplo, por autômatos celulares). Esta combinação requer a capacidade de propor modelos matemáticos abstratos e de estabelecer relações causais entre fluxos e efeitos locais, problemas ainda não abordados na literatura.

5.4.4 Milton Santos e o Espaço como Sistemas de Objetos e Sistemas de Ações

Sem abandonar as definições anteriores, mas buscando uma visão mais geral sobre os conceitos de espaço (Santos, 1996) afirma que “o espaço geográfico é um sistema de objetos e um sistema de ações”. Esta caracterização objetiva contrapor os elementos de *composição* do espaço (os *objetos geográficos*) aos condicionantes de *modificação* deste espaço (as *ações* humanas e dos processos físicos ao longo do tempo). Numa formulação sintética, Santos enfatiza a necessidade de libertar-nos de visões estáticas do espaço (tais como nos vem condicionando séculos de mapas), ao incluir a componente de *processos variantes no tempo* como parte essencial do espaço. Ele procura diferenciar o conceito de *espaço* do de *paisagem*, afirmando que “a paisagem é o conjunto de formas que num dado momento, exprimem as heranças que representam as sucessivas relações localizadas entre homens e natureza. O espaço são essas formas mais a vida que as anima”.

Do ponto de vista da geoinformação, a noção de “sistemas de objetos e sistemas de ações” coloca-se num nível de abstração ainda maior que as formulações anteriores de Santos. Daí surgem algumas questões cruciais: é possível realizar a transição destes conceitos abstratos para o âmbito de um sistema computacional? Quais as limitações da tradução das noções abstratas propostas para um SIG ?

Numa primeira análise, a tradução do conceito de “sistema de objetos e sistemas de ações” para o ambiente computacional esbarra em três questões: como modelar os “sistemas de objetos”? como representar os “sistemas de ações?” como expressar as interações entre os objetos e as ações ?

Para representar *os sistemas de objetos*, será preciso descrever cada um dos diferentes tipos de objetos componentes do espaço (ou da parcela do espaço em análise). Neste sentido, um dos avanços recentes na área de Geoprocessamento é o uso de Ontologias. Uma *ontologia* é uma teoria que especifica um vocabulário relativo a um certo domínio de, que define entidades, classes, propriedades, predicados e funções e as relações entre estes componentes (Fonseca and Egenhofer, 1999) (Fonseca, Egenhofer et al., 2000). Na visão de (Smith and Mark, 1998), uma ontologia do mundo geográfico pode ajudar a entender como diferentes comunidades compartilham informações e estabelecer correspondências e relações entre os diferentes domínios de entidades espaciais.

Numa perspectiva genérica, pode-se dizer que o uso de Ontologias em GIS é uma maneira de integrar técnicas de Representação do Conhecimento em uma tecnologia com uma forte tradição geométrica e cartográfica. Deve-se lembrar que, apesar da sua atratividade enquanto conceito, o uso de Ontologias em GIS enfrenta essencialmente os mesmos problemas das técnicas de Representação do Conhecimento (Sowa, 2000). Estes problemas incluem a concepção de formalismos para armazenamento de informação e a tradução do conhecimento existente informalmente no domínio de aplicação para representações computacionais. Vale lembrar ainda que a maior parte dos paradigmas atuais de Representação do Conhecimento são essencialmente estáticos, sem modelar adequadamente a dimensão temporal e os relacionamentos dinâmicos e dependentes de contexto entre os objetos.

A representação dos “sistemas de ações” é ainda mais difícil num ambiente computacional. Sendo o computador uma ferramenta matemática e não analógica, a representação de processos depende fundamentalmente de modelagem numérica, usualmente realizada através de equações funcionais. Cabe aqui distinguir dois grandes grupos de processos espaciais: os modelos do meio físico e os de processos sócio-econômicos (que incluem os fenômenos urbanos). Estes grupos possuem variáveis e comportamentos diferenciados que exigem diferentes abordagens de implementação.

Fenômenos físicos tais como modelos hidrológicos e ecológicos são exemplos de fenômenos com alto índice de variação do estado da superfície ao longo do tempo. Sua representação acurada depende da capacidade de derivar equacionamentos matemático-formais que descrevam a variação espaço-temporal do fenômeno.

No caso de fenômenos sócio-econômicos, os processos tem uma complexidade muito maior, por envolver, além de fenômenos físicos, componentes de construção da realidade social. Neste sentido, vale a pena destacar o exposto em (Searle, 1995): a realidade social envolve um componente físico (externo à nossa percepção) e um componente mental, que resulta de consenso estabelecido em procedimentos jurídicos e culturais de cada sociedade.

Deste modo, a aplicação do conceito de *sistemas de ações* à modelagem computacional de fenômenos socio-econômicos não pode ser reduzida à premissa funcionalista de que é possível derivar modelos matemáticos que descrevam o comportamento dos agentes sociais. Apesar disto, os autores consideram ser útil e válido a proposição de modelos que, com crescente sofisticação e inevitável reducionismo, possam simular parte do comportamento dos diferentes processos socio-economicos-ambientais.

Como exemplo, o trabalho de (Engelen, 1995) apresenta uma estrutura de modelagem dinâmica e de suporte a decisão capaz de operar em uma variedade de escalas. Esta estrutura é constituída de dois níveis denominados macro e micro escalas. Na macroescala, estão representadas as variáveis ecológicas e sócio-econômicas que afetam o sistema como um todo. A microescala representa a dimensão espacial do modelo. Estas escalas interagem intensivamente entre si e com um banco de dados geográfico, a partir do qual obtêm os dados necessários para as simulações.

Ainda com respeito ao problema de modelagem computacional dos *sistemas de ações*, (Câmara, 2000) apresentam uma proposta para modelar o processo de produção de informação em bases de dados georeferenciados, levando em conta o objetivo final a ser alcançado com os procedimentos de Análise Geográfica. Esta proposta visa capturar uma das dimensões do conceito de “sistemas de ações”: a intenção do especialista ao modelar o espaço geográfico.

Em resumo, o conceito de Milton Santos de “espaço como sistemas de objetos e sistemas de ações” caracteriza um mundo em permanente transformação, com interações complexas entre seus componentes. Santos apresenta uma visão geral, que admite diferentes leituras e distintos processos de redução, necessários à captura desta definição abstrata num ambiente computacional. Não obstante, a riqueza inerente a este conceito está em deslocar a ênfase da análise do espaço, da *representação cartográfica* para a dimensão da *representação do conhecimento geográfico*. Afinal, como diz o próprio Milton Santos, “geometrias não são geografias”.

5.5 TEORIA GEOGRÁFICA E CIÊNCIA DA GEOINFORMAÇÃO: RUMO A UMA NOVA GERAÇÃO DE GIS

Nesta seção, fazemos um resumo de nossa análise, na perspectiva de projetar uma nova geração de sistemas de informação geográfica. Na Tabela 1 apresentamos, para cada escola, o conceito chave em sua definição de espaço, a representação computacional que melhor aproxima este conceito, e algumas técnicas de Análise Geográfica típicas que estão associadas a esta escola geográfica. Fazemos uma distinção entre os conceitos da escola de Geografia Quantitativa que tem expressão na atual geração de GIS e aqueles que apontam para a futura evolução da tecnologia de Geoprocessamento.

Tabela 5.1

Teoria Geográfica e Geoprocessamento

Teoria	Tecnologia associada	GIS	Conceito-Chave	Repres. Comput.	Técnicas Análise
Geografia Idiográfica ()	Anos 80 – meados dos anos 90		Unicidade da Região (unidade-área)	Polígono atributos	e Interseção conjuntos
Geografia Quantitativa-1	Final da década de 90		Distribuição Espacial	Superfícies (grades)	Geoestatística + lógica “fuzzy”
Geografia Quantitativa-2	Meados da década de 00		Modelos espaço-tempo	Funções	Modelos multi-escala
Geografia Crítica	Segunda década do século 21 (?)		Objetos e Ações Espaço de fluxos e espaço de lugares	<i>Ontologias e Espaços não-cartográficos</i>	Representação do Conhecimento

À guisa de resumo, apresentamos cada um dos componentes da Tabela 1:

- *Geografia Idiográfica (GIS dos anos 80)*: o conceito-chave é a unicidade da região, expresso através de abstrações como a “unidade-área” (Hartshorne), “unidade de paisagem” (Tricart) e “land-unit” (Zonneveld). A representação computacional associada é o polígono com seus atributos (usualmente expressos numa tabela de um banco de dados relacional) e as técnicas de análise comuns, está o uso da interseção de conjuntos (lógica booleana).
- *Geografia Quantitativa (GIS de hoje)*: o conceito-chave é a distribuição espacial do fenômeno de estudo, expressa através de um conjunto de eventos, amostras pontuais, ou dados agregados por área. A representação computacional associada é a superfície (expressa como uma grade regular) e há uma grande ênfase no uso de técnicas de Estatística Espacial e Lógica Nebulosa (“fuzzy”) para caracterizar com o uso (respectivamente) da teoria da probabilidade e da teoria da possibilidade as distribuições espaciais.
- *Geografia Quantitativa (GIS da próxima geração)*: o conceito-chave são os modelos preditivos com representação espaço-temporal, onde a evolução do fenômeno é expressa através de representação funcional. Para capturar as diferentes relações dinâmicas, as técnicas de Análise deverão incluir modelos multi-escala, que estabeleçam conexões entre fenômenos de macroescala (tipicamente relacionados com fatores econômicos) e fenômenos de microescala (tipicamente associados a transições no uso da terra).
- *Geografia Crítica (GIS do futuro)* : aqui, os conceitos-chave incluem o espaço como “sistema de objetos e sistemas de ações” e a oposição entre “espaço de fluxos” e “espaço de lugares”. Podemos apenas especular sobre as representações computacionais que serão

utilizadas neste contexto, que possivelmente incluam técnicas de Representação de Conhecimento. Nossa hipótese de trabalho é que os GIS do futuro contemplarão representações não-cartográficas do espaço, com uma ênfase no estabelecimento de relações entre os diferentes atores sociais que atuam no espaço.

5.6 ALCANCE E LIMITAÇÕES DO GEOPROCESSAMENTO

Neste capítulo, examinamos diferentes conceitos de espaço de escolas da Geografia e buscamos estabelecer que representações computacionais permitiam a expressão destes conceitos no ambiente de GIS. Embora saibamos que a visão apresentada é reducionista e limitada, consideramos que é muito útil apresentar uma perspectiva genérica como a exposta acima, pois esta nos ajuda a compreender as diferenças entre os conceitos de espaço e melhor compreender os desafios ainda não resolvidos pela Ciência da Geoinformação. O que podemos concluir, ainda que de forma preliminar?

Em primeiro lugar, cumpre indicar que, apesar dos significativos avanços das duas últimas décadas, a tecnologia de sistemas de informação geográfica ainda está longe de dar suporte adequado às diferentes concepções de *espaço geográfico*. Atualmente, os GIS oferecem ferramentas que permitem a expressão de procedimentos lógicos e matemáticos sobre as variáveis georeferenciadas com uma economia de expressão e uma repetibilidade impossíveis de alcançar em análises tradicionais. No entanto, a tecnologia de GIS resolveu apenas os problemas simples de representação computacional do espaço. Os atuais sistemas são fortemente baseados numa lógica “cartográfica” do espaço, exigindo sempre a construção de “mapas computacionais”, tarefa sempre custosa e nem sempre adequada ao entendimento do problema em estudo.

Adicionalmente, mostramos que a Geografia Crítica tem uma importante contribuição para a Ciência da Geoinformação, sendo um de seus principais méritos o de apontar para uma visão muito rica do espaço geográfico, enfatizando a noção do processo em contraposição à natureza estática dos GIS de hoje.

Neste sentido, é fundamental distinguir entre as capacidades da atual geração de GIS e as limitações inerentes a qualquer representação computacional do espaço geográfica. Assim, apesar de ser essencialmente infactível capturar, num ambiente de geoinformação, todas as dimensões do conceitos como “sistemas de objetos e sistemas de ações”, é importante buscar técnicas que permitam aproximar dimensões parciais desta visão. Para tanto, será necessário utilizar abordagens quantitativas, baseadas em técnicas como Sistemas Dinâmicos, Ontologias e Representação de Conhecimento, sem perder de vista que estes modelos serão sempre aproximações reducionistas da realidade geográfica.

Referências

1. ANSELIN, L. **Spatial econometrics: methods and models**. Dordrecht, Kluwer, 1988.
2. BAILEY, T. and A. GATTREL. **Spatial Data Analysis by Example**. London, Longman, 1995.
3. BURROUGH, P. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford, England, Oxford University Press, 1986.
4. BURROUGH, P. Dynamic Modelling and Geocomputation. In: P. Longley, S. Brooks, R. McDonnell and B. Macmillan (ed). **Geocomputation: A Primer**. New York, John Wiley, 1998. v.
5. BURROUGH, P. and A. FRANK (ed.). **Geographic Objects with Indeterminate Boundaries**. London, Taylor & Francis, 1996. p.
6. CÂMARA, G. M., A.M.V.; PAIVA, J.A.C; SOUZA, R.C.M. Action-Driven Ontologies of the Geographical Space. In: **GIScience 2000**, Proceedings. Savannah, GA, AAG, 2000.
7. CASTELLS, M. **A Sociedade em Rede**. São Paulo, Paz e Terra, 1999.
8. CHORLEY, R. J. and P. HAGGETT (ed.). **Models in Geography**. London, Methuen, 1967. p.
9. CHRISTOFOLETTI, A. As Perspectivas dos Estudos Geográficos. In: A. Christofolletti (ed). **Perspectivas da Geografia**. São Paulo, Difel, 1985. v.
10. CORRÊA, R. L. Espaço: um conceito chave na geografia. In: I. E. Castro, P. C. Gomes and R. L. Corrêa (ed). **Geografia: Conceitos e Temas**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1995. v.
11. COUCLELIS, H. From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation. **Environment and Planning B: Planning and Design** v.24, p.165-174, 1997.
12. ENGELEN, G. Using Cellular Automata for Integrated Modelling of Socio-environmental Systems. **Environmental Monitoring and Assessment** v.34, p.203-214, 1995.
13. FONSECA, F. and M. EGENHOFER. Ontology-Driven Geographic Information Systems. In: **7th ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems**, Proceedings. Kansas City, MO, ACM Press, N.Y., 1999. p.14-19.
14. FONSECA, F., M. EGENHOFER, et al. Ontologias e Interoperabilidade Semântica entre SIGs. In: **II Workshop Brasileiro em Geoinformática - GeoInfo2000**, Proceedings. São Paulo, 2000.
15. GETIS, A. and J. K. ORD. Local spatial statistics: an overview. In: P. Longley and M. Batty (ed). **Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment**. New York, John Wiley, 1996. v., p.261-277.
16. GOODCHILD, M. A spatial analytic perspective on geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems** v.1, p.327-334, 1988.

17. GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. New York, Oxford Univ. Press, 1997.
18. HÄGERSTRAND, T. **Innovation Diffusion as a Spatial Process**. Chicago, IL, The University of Chicago Press, 1967.
19. HARTSHORNE, R. **Propósitos e Natureza da Geografia**. São Paulo, Hucitec (trad. 1966), 1936.
20. HARVEY, D. **Explanation in Geography**. New York, St. Martin's Press, 1969.
21. HARVEY, D. **Social Justice and the City**. Oxford, Blackwell, 1988.
22. HARVEY, D. **The Condition of Postmodernity**. London, Basil Blackwell, 1989.
23. HEUVELINK, G. **Error Propagation in Environmental Modelling with GIS**. London, Taylor and Francis, 1998.
24. MORAES, A. C. R. **Geografia: Pequena História Crítica**. São Paulo, Hucitec, 1995.
25. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Rediscovering Geography: New Relevance for Science and Society**. Washington, National Academy Press, 1997.
26. OPENSHAW, S. and C. OPENSHAW. **Artificial Intelligence in Geography**. Chichester, John Wiley, 1997.
27. PENROSE, R. **The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics**. Oxford, Oxford Univ. Press, 1989.
28. POPPER, K. **A Lógica da Pesquisa Científica**. São Paulo, EDUSP, 1975.
29. SANTOS, M. **Por uma Geografia Nova**. São Paulo, Hucitec, 1978.
30. SANTOS, M. **Espaço e Método**. São Paulo, Nobel, 1985.
31. SANTOS, M. **A Natureza do Espaço: Técnica e Tempo. Razão e Emoção**. São Paulo, Hucitec, 1996.
32. SEARLE, J. R. **Minds, Brains, and Science**. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1984.
33. SEARLE, J. R. **The Construction of Social Reality**. New York, The Free Press, 1995.
34. SMITH, B. and D. MARK. Ontology and Geographic Kinds. In: **International Symposium on Spatial Data Handling**, Proceedings. Vancouver, Canada, 1998. p.308-320.
35. SOWA, J. F. **Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations**. Pacific Grove, CA, Brooks Cole, 2000.
36. TOBLER, W. Cellular geography. In: S. Gale and O. G. (ed). **Philosophy in Geography**. Dordrecht, Reidel, 1979. v., p.379-386.
37. TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro, IBGE-SUPREN, 1977.

38. WESSELING, C. G., D. KARSSENBERG, et al. Integrating dynamic environmental models in GIS: the development of a Dynamic Modelling language. **Transactions in GIS** v.1, p.40-48, 1996.
39. WHITE, R. and G. ENGELEN. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. **Environment and Planning B: Planning and Design** v.24, p.235-246, 1997.
40. ZONNEVELD, I. S. The Land Unit: A Fundamental Concept in Landscape Ecology, and Its Applications. **Landscape Ecology** v.3, p.67-86, 1989.

CARTOGRAFIA PARA GEOPROCESSAMENTO

Júlio César Lima D'Alge

6.1 INTRODUÇÃO

A razão principal da relação interdisciplinar forte entre Cartografia e Geoprocessamento é o espaço geográfico. Cartografia preocupa-se em apresentar um modelo de representação de dados para os processos que ocorrem no espaço geográfico. Geoprocessamento representa a área do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais, fornecidas pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), para tratar os processos que ocorrem no espaço geográfico. Isto estabelece de forma clara a relação interdisciplinar entre Cartografia e Geoprocessamento.

Uma razão histórica, que reforça o vínculo que aqui se discute, é a precedência das iniciativas de automação da produção cartográfica em relação aos esforços iniciais de concepção e construção das ferramentas de SIG (veja-se, por exemplo, Maguire et al. (1991)). A figura 1 aproveita e sintetiza a discussão ora apresentada, estendendo-a apropriadamente às áreas de Sensoriamento Remoto, CAD (Computer Aided Design) e Gerenciamento de Banco de Dados.

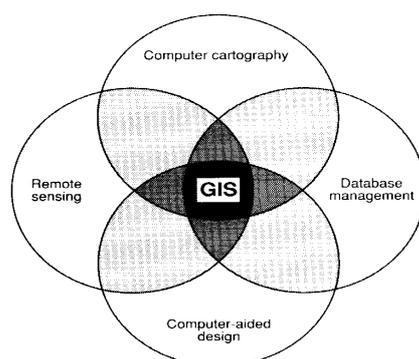


Figura 1 - Relações interdisciplinares entre SIG e outras áreas.
FONTE: Maguire et al. (1991)

O vínculo entre Cartografia e Geoprocessamento é explorado de forma prática neste documento através de uma apresentação do que há de essencial quanto à natureza dos dados espaciais. Complementa-se o assunto pela exposição de aspectos funcionais e de apresentação presentes em SIG, que coincidem com aqueles oriundos de preocupações eminentemente cartográficas com respeito a dados espaciais.

6.2 NATUREZA DOS DADOS ESPACIAIS

Dados espaciais caracterizam-se especificamente pelo atributo da localização geográfica. Há outros fatores importantes inerentes aos dados espaciais, mas a localização é preponderante. Um objeto qualquer (como uma cidade, a foz de um rio ou o pico de uma montanha) somente tem sua localização geográfica estabelecida quando se pode descrevê-lo em relação a outro objeto cuja posição seja previamente conhecida ou quando se determina sua localização em relação a um certo sistema de coordenadas.

O estabelecimento de localizações sobre a superfície terrestre sempre foi um dos objetos de estudo da Geodésia, ciência que se encarrega da determinação da forma e das dimensões da Terra. A seguir são apresentados alguns conceitos de Geodésia que desempenham um papel de extrema importância na área de Geoprocessamento.

6.2.1 CONCEITOS DE GEODÉSIA

A definição de posições sobre a superfície terrestre requer que a Terra possa ser tratada matematicamente. Para o geodesta a melhor aproximação dessa Terra matematicamente tratável é o geóide, que pode ser definido como a superfície equipotencial do campo da gravidade terrestre que mais se aproxima do nível médio dos mares. A adoção do geóide como superfície matemática de referência esbarra no conhecimento limitado do campo da gravidade terrestre. À medida que este conhecimento aumenta, cartas geoidais existentes são substituídas por novas versões atualizadas. Além disso, o equacionamento matemático do geóide é intrincado, o que o distancia de um uso mais prático. É por tudo isso que a Cartografia vale-se da aproximação mais grosseira aceita pelo geodesta: um elipsóide de revolução. Visto de um ponto situado em seu eixo de rotação, projeta-se como um círculo; visto a partir de uma posição sobre seu plano do equador, projeta-se como uma elipse, que é definida por um raio equatorial ou semi-eixo maior e por um achatamento nos pólos.

Neste ponto torna-se oportuno colocar o conceito de datum planimétrico. Começa-se com um certo elipsóide de referência, que é escolhido a partir de critérios geodésicos de adequação ou conformidade à região da superfície terrestre a ser mapeada (veja, por

exemplo, Snyder, 1987, para uma lista de elipsóides usados em diferentes países ou regiões). O próximo passo consiste em posicionar o elipsóide em relação à Terra real. Para isto impõe-se inicialmente a restrição de preservação do paralelismo entre o eixo de rotação da Terra real e o do elipsóide. Com esta restrição escolhe-se um ponto central (ou origem) no país ou região e se impõe, desta vez, a anulação do desvio da vertical, que é o ângulo formado entre a vertical do lugar no ponto origem e a normal à superfície do elipsóide. Fica definida então a estrutura básica para o sistema geodésico do país ou região: o datum planimétrico. Trata-se, portanto, de uma superfície de referência elipsoidal posicionada com respeito a uma certa região. Sobre esta superfície realizam-se as medições geodésicas que dão vida à rede geodésica planimétrica da região.

Um datum planimétrico é formalmente definido por cinco parâmetros: o raio equatorial e o achatamento elipsoidais e os componentes de um vetor de translação entre o centro da Terra real e o do elipsóide. Na prática, devido à incertezas na determinação do centro da Terra real, trabalha-se com translações relativas entre diferentes datums planimétricos.

Dado um ponto sobre a superfície do elipsóide de referência de um certo datum planimétrico, a latitude geodésica é o ângulo entre a normal ao elipsóide, no ponto, e o plano do equador. A longitude geodésica é o ângulo entre o meridiano que passa no ponto e o meridiano origem (Greenwich, por convenção). Fala-se aqui da definição do sistema de paralelos e meridianos sobre a superfície elipsoidal do datum.

Outro conceito importante é o de datum vertical ou altimétrico. Trata-se da superfície de referência usada pelo geodesta para definir as altitudes de pontos da superfície terrestre. Na prática a determinação do datum vertical envolve um marégrafo ou uma rede de marégrafos para a medição do nível médio dos mares. Faz-se então um ajustamento das medições realizadas para definição da referência “zero” e adota-se um dos marégrafos como ponto de referência do datum vertical. No Brasil o ponto de referência para o datum vertical é o marégrafo de Imbituba, em Santa Catarina.

Um dos problemas típicos na criação da base de dados de um SIG aqui no Brasil tem sido a coexistência de dois sistemas geodésicos de referência: Córrego Alegre e SAD-69. Algumas cartas topográficas referem-se à Córrego Alegre, que é o antigo datum planimétrico brasileiro, enquanto outras utilizam como referência o SAD-69, que é o atual datum planimétrico. Os usuários de SIG já estão relativamente acostumados a conviver com escolhas de projeção e seleções de datum sempre que precisam realizar entrada ou importação de dados, mas costumam ignorar que as coordenadas geográficas - na verdade, geodésicas - são definidas sobre a superfície de referência do datum selecionado e que, portanto, variam de datum para datum.

Desfeito o mito da invariabilidade das coordenadas geodésicas, deve-se atentar para a magnitude das variações envolvidas. As diferenças entre Córrego Alegre e SAD-69, por exemplo, traduzem-se em discrepâncias de algumas dezenas de metros sobre a superfície do território brasileiro. Essas discrepâncias são negligenciáveis para projetos que envolvam mapeamentos em escala pequena, mas são absolutamente preponderantes para escalas maiores que 1:250.000 (d'Alge, 1999). É o caso, por exemplo, do monitoramento do desflorestamento na Amazônia brasileira, que usa uma base de dados formada a partir de algumas cartas topográficas na escala 1:250.000 vinculadas ao datum Córrego Alegre e outras vinculadas ao SAD-69.

O antigo datum planimétrico Córrego Alegre usa o elipsóide de Hayford, cujas dimensões sempre foram consideradas convenientes para a América do Sul. Atualmente, no entanto, o datum SAD-69 utiliza o elipsóide da União Astronômica Internacional (IAU), homologado em 1967 pela Associação Internacional de Geodésia, quando passou a se chamar elipsóide de Referência 1967.

A tabela 1 ilustra os parâmetros dos dois elipsóides empregados como figuras de referência para Córrego Alegre e SAD-69:

Elipsóide	Raio Equatorial R(m)	Raio Polar r(m)	Achatamento
IAU	6.378.160	6.356.776	1/298,25
Hayford	6.378.388	6.366.991	1/297

Tabela 1 - Parâmetros dos elipsóides da União Astronômica Internacional e Hayford

6.3 SISTEMAS DE COORDENADAS

O usuário de SIG está acostumado a navegar em seus dados através de ferramentas simples como o apontamento na tela com o cursor e a subsequente exibição das coordenadas geográficas da posição indicada. Por trás da simplicidade aparente dessa ação, há algumas transformações entre diferentes sistemas de coordenadas que garantem a relação entre um ponto na tela do computador e as coordenadas geográficas. A figura 2 mostra alguns dos sistemas de referência mais importantes para Cartografia e SIG.

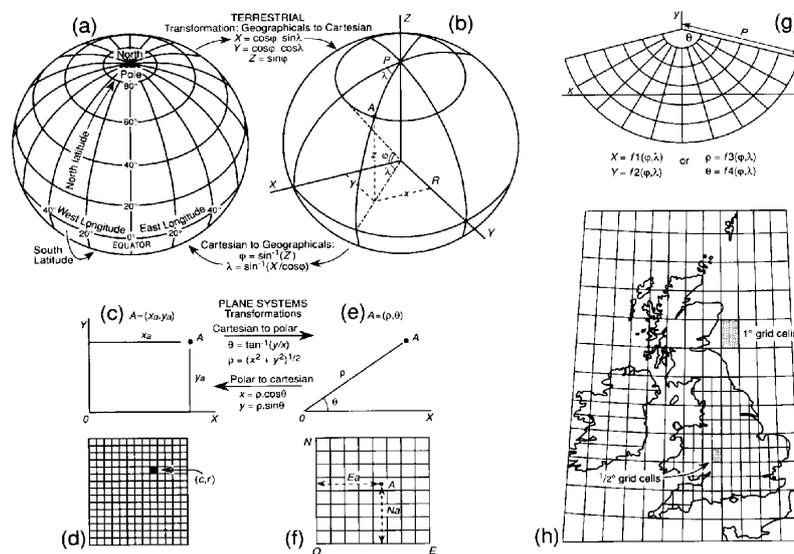


Figura 2 - Diferentes sistemas de coordenadas para Cartografia e SIG

FONTES: Maguire et al. (1991)

Sistema de coordenadas geográficas

É o sistema de coordenadas mais antigo. Nele, cada ponto da superfície terrestre é localizado na interseção de um meridiano com um paralelo. Num modelo esférico os meridianos são círculos máximos cujos planos contêm o eixo de rotação ou eixo dos pólos. Já num modelo elipsoidal os meridianos são elipses definidas pelas interseções, com o elipsóide, dos planos que contêm o eixo de rotação.

Meridiano de origem (também conhecido como inicial ou fundamental) é aquele que passa pelo antigo observatório britânico de Greenwich, escolhido convencionalmente como a origem (0°) das longitudes sobre a superfície terrestre e como base para a contagem dos fusos horários. A leste de Greenwich os meridianos são medidos por valores crescentes até $+180^\circ$. A oeste, suas medidas decrescem até o limite de -180° .

Tanto no modelo esférico como no modelo elipsoidal os paralelos são círculos cujo plano é perpendicular ao eixo dos pólos. O Equador é o paralelo que divide a Terra em dois hemisférios (Norte e Sul) e é considerado como o paralelo de origem (0°). Partindo do equador em direção aos pólos tem-se vários planos paralelos ao equador, cujos tamanhos vão diminuindo até que se reduzam a pontos nos pólos Norte ($+90^\circ$) e Sul (-90°).

Longitude de um lugar qualquer da superfície terrestre é a distância angular entre o lugar e o meridiano inicial ou de origem, contada sobre um plano paralelo ao equador. Latitude é a distância angular entre o lugar e o plano do Equador, contada sobre o plano do meridiano que passa no lugar.

Sistema Geocêntrico Terrestre

O sistema geocêntrico terrestre é um sistema cartesiano tridimensional com origem no centro da Terra, um eixo coincidente com o eixo de rotação da Terra, outros dois eixos jacentes no plano do equador e eixo primário amarrado ao meridiano de Greenwich. Trata-se de um sistema de coordenadas muito importante para a transformação entre coordenadas geodésicas (se você ainda não se deu conta de que as coordenadas geodésicas, que você chama de geográficas, variam, leia outra vez a seção 2.1). A transformação de um datum planimétrico a outro é feita a partir das relações matemáticas entre coordenadas geodésicas e coordenadas geocêntricas terrestres, que são descritas a seguir assumindo que se usa um modelo esférico de raio R para a Terra (X , Y e Z denotam os eixos do sistema geocêntrico terrestre e φ e λ denotam, respectivamente, a latitude e a longitude geodésicas):

$$X = R \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda \quad \varphi = \arcsen(Z/R)$$

$$Y = R \cdot \cos\varphi \cdot \sen\lambda \quad \lambda = \arctan(Y/X)$$

$$Z = R \cdot \sen\varphi$$

Sistema de coordenadas planas ou cartesianas

O sistema de coordenadas planas, também conhecido por sistema de coordenadas cartesianas, baseia-se na escolha de dois eixos perpendiculares cuja interseção é denominada origem, que é estabelecida como base para a localização de qualquer ponto do plano. Nesse sistema de coordenadas um ponto é representado por dois números reais: um correspondente à projeção sobre o eixo x (horizontal) e outro correspondente à projeção sobre o eixo y (vertical).

O sistema de coordenadas planas é naturalmente usado para a representação da superfície terrestre num plano, ou seja, confunde-se com aquilo que se chama de sistema de coordenadas de projeção, como será visto e discutido na seção 2.3.

Sistema de coordenadas polares

Apesar de não aparecer de forma explícita para o usuário de SIG, o sistema de coordenadas polares merece menção por causa de sua utilização no desenvolvimento das projeções cônicas (veja seção 2.3). Trata-se de um sistema simples, de relação direta com o sistema de coordenadas cartesianas, que substitui o uso de um par de coordenadas (x,y) por uma direção e uma distância para posicionar cada ponto no plano de coordenadas. Por isso ele é tão conveniente para o estudo das projeções que se desenvolvem sobre cones. A relação com coordenadas cartesianas é apresentada a seguir (ρ e θ denotam, respectivamente, a distância do ponto à origem e o ângulo formado com o eixo x):

$$\begin{aligned} x &= \rho \cdot \cos\theta & \theta &= \arctan(y/x) \\ y &= \rho \cdot \sin\theta & \rho &= (x^2 + y^2)^{1/2} \end{aligned}$$

Sistema de coordenadas de imagem (matricial)

Como descrito mais adiante neste documento, a integração de Geoprocessamento com Sensoriamento Remoto depende do processo de inserção de imagens de satélite ou aéreas na base de dados do SIG. O georeferenciamento de imagens pressupõe uma relação estabelecida entre o sistema de coordenadas de imagem e o sistema de referência da base de dados. O sistema de coordenadas de imagem é, tradicionalmente, levógiro, com origem no canto superior esquerdo da imagem e eixos orientados nas direções das colunas e das linhas da imagem. Os valores de colunas e linhas são sempre números inteiros que variam de acordo com a resolução espacial da imagem. A relação com um sistema de coordenadas planas é direta e faz-se através da multiplicação do número de linhas e colunas pela resolução espacial.

6.4 PROJEÇÕES CARTOGRÁFICAS

Todos os mapas são representações aproximadas da superfície terrestre. Isto ocorre porque não se pode passar de uma superfície curva para uma superfície plana sem que haja deformações. Por isso os mapas preservam certas características ao mesmo tempo em que alteram outras.

A elaboração de uma mapa requer um método que estabeleça uma relação entre os pontos da superfície da Terra e seus correspondentes no plano de projeção do mapa. Para se obter essa correspondência, utilizam-se os sistemas de projeções cartográficas. De um modo genérico, um sistema de projeção fica definido pelas relações apresentadas a seguir (x e y são as coordenadas planas ou de projeção e φ e λ são as coordenadas geográficas):

$$\begin{aligned}x &= f_1(\varphi, \lambda) & \lambda &= g_1(x, y) \\y &= f_2(\varphi, \lambda) & \varphi &= g_2(x, y)\end{aligned}$$

Há um número grande de diferentes projeções cartográficas, uma vez que há vários modos de se projetar os objetos geográficos que caracterizam a superfície terrestre sobre um plano. Consequentemente, torna-se necessário classificá-las de acordo com diversos aspectos com a finalidade de melhor estudá-las.

Classificação das projeções

Analisa-se os sistemas de projeções cartográficas pelo tipo de superfície de projeção adotada e pelas propriedades de deformação que as caracterizam.

Quanto ao tipo de superfície de projeção adotada, classificam-se as projeções em: planas ou azimutais, cilíndricas, cônicas e poliédricas, segundo se represente a superfície curva da Terra sobre um plano, um cilindro, um cone ou um poliedro tangente ou secante à Terra. Seguem algumas descrições.

Projeção plana ou azimutal

Constrói-se o mapa utilizando-se uma superfície de projeção plana tangente ou secante a um ponto na superfície da Terra, como na figura 3.



Figura 3 - Exemplo: projeção azimutal

Projeção cônica

A superfície de projeção usada é um cone que envolve a Terra e que, em seguida, é desenvolvido num plano. As projeções cônicas podem ser tangentes ou secantes. A figura 4 apresenta um exemplo de projeção cônica. Em todas as projeções cônicas normais (eixo do cone coincidente com o eixo de rotação da Terra) os meridianos são retas que convergem para um ponto (que representa o vértice do cone) e todos os paralelos são circunferências concêntricas a esse ponto.

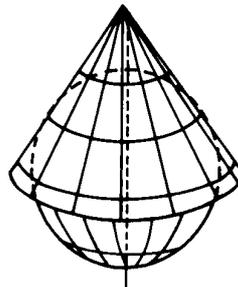


Figura 4 - Exemplo: projeção cônica de Lambert

Projeção cilíndrica

Usa-se um cilindro tangente ou secante à superfície da Terra como superfície de projeção. Em seguida, desenvolve-se o cilindro num plano. Em todas as projeções cilíndricas normais (eixo do cilindro coincidente com o eixo de rotação da Terra), os meridianos e os paralelos são representados por retas perpendiculares. A projeção de Mercator, uma das mais antigas e importantes, é um exemplo de projeção cilíndrica. Na figura 5 apresenta-se uma comparação da representação de um quarto de hemisfério segundo diferentes sistemas de projeção.



Figura 5 – Comparação entre diferentes sistemas de projeção

Como já foi colocado anteriormente é impossível representar a superfície curva da Terra sobre uma superfície plana (ou desenvolvível num plano) sem que haja deformações. Por isso deve-se escolher que características devem ser conservadas e quais podem ser alteradas. Por exemplo, pode-se pensar numa possível conservação dos ângulos ou numa manutenção de áreas, sempre lavando-se em conta a que se destina o mapa. Quanto ao grau de deformação das superfícies representadas, as projeções podem ser classificadas em conformes ou isogonais, equivalentes ou isométricas e equidistantes.

Projeções conformes ou isogonais

São as projeções que mantêm os ângulos ou as formas de pequenas feições. Convém lembrar que a manutenção dos ângulos acarreta uma distorção no tamanho dos objetos no mapa. As projeções de Mercator e UTM têm a característica da conformidade. A projeção de Mercator é muito usada em navegação porque representa as linhas de azimute constante como linhas retas. Entretanto, distorce bastante o tamanho dos objetos situados nas proximidades das regiões polares.

Projeções equivalentes ou isométricas

São projeções que conservam as áreas (não há deformação de área). Como consequência, os ângulos sofrem deformações. Muitos consideram que estas são as projeções mais adequadas para uso em SIG. Como exemplos pode-se citar as projeções Cônica de Albers e Azimutal de Lambert.

Projeções equidistantes

As projeções equidistantes conservam a proporção entre as distâncias, em determinadas direções, na superfície representada. Convém reforçar a idéia de que a equidistância, ao contrário da conformidade ou da equivalência, não é uma característica global de toda a área mapeada. O exemplo mais comum de projeção equidistante é a projeção Cilíndrica Equidistante.

Parâmetros das projeções

A transformação entre coordenadas geográficas e coordenadas de projeção é feita através dos algoritmos das projeções cartográficas, que dependem de certos parâmetros que variam de acordo com a projeção em questão. Discute-se agora alguns desses parâmetros.

Paralelo padrão ou latitude reduzida

É o paralelo onde as deformações são nulas, isto é, onde a escala é verdadeira. O paralelo padrão é único quando é definido por um cilindro tangente à Terra, como na projeção Mercator. Se a superfície de projeção for um cone secante à Terra tem-se dois paralelos padrão, como nas projeções cônicas de Albers e de Lambert.

Longitude de origem

Trata-se de um meridiano de referência escolhido para posicionar o eixo y do sistema de coordenadas planas ou de projeção. A definição da longitude de origem depende da projeção utilizada pelo usuário. A longitude de origem para a projeção UTM corresponde ao meridiano central de um fuso ou zona (a cada 6° define-se um fuso), ou seja, o meridiano central de uma carta ao milionésimo. A figura 6 apresenta a distribuição das cartas 1: 1.000.000 para o Brasil.

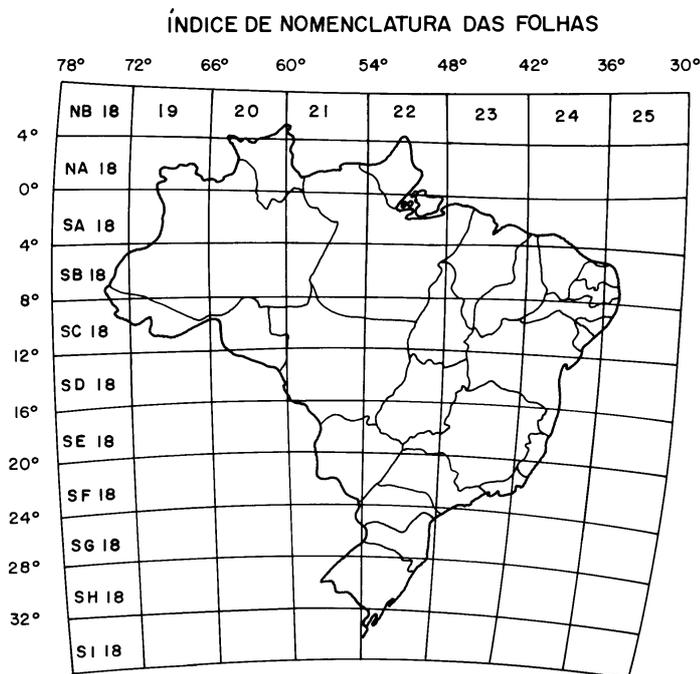


Figura 6 - Distribuição das cartas ao milionésimo no Brasil

Para saber a longitude de origem, o usuário deve localizar a área de interesse na figura e verificar a que fuso ela pertence. O meridiano central corresponderá à longitude de origem. Leme (SP), por exemplo, situada a 2°S e 47°W, encontra-se no fuso que vai de 42°W a 48°W; sua longitude de origem, portanto, é 45°W. No caso da projeção de Gauss, usada em cartas topográficas antigas no Brasil, a longitude de origem equivale aos limites das cartas ao milionésimo. Para verificar estes valores sugere-se o uso da figura apresentada anteriormente.

Latitude de origem

Corresponde a um paralelo de referência escolhido para posicionar o eixo x do sistema de coordenadas planas ou de projeção. A latitude de origem costuma ser o equador para a maior parte das projeções. Nas cartas ao milionésimo, que usam a projeção cônica conforme de Lambert, adota-se sempre o paralelo superior de cada carta como latitude de origem.

Escala

É a relação entre as dimensões dos elementos representados em um mapa e aquelas medidas diretamente sobre a superfície da Terra. A escala é uma informação que deve estar presente em qualquer mapa e, em geral, também é apresentada na forma de escala gráfica. A escala numérica indica no denominador o valor que deve ser usado para multiplicar uma medida feita sobre o mapa e transformá-la num valor correspondente na mesma unidade de medida sobre a superfície terrestre.

Projeção UTM - "Universal Transverse Mercator"

O mapeamento sistemático do Brasil, que compreende a elaboração de cartas topográficas, é feito na projeção UTM (1:250.000, 1:100.000, 1:50.000, 1:25.000). Relacionam-se, a seguir, suas principais características:

- a superfície de projeção é um cilindro transverso e a projeção é conforme;
- o meridiano central da região de interesse, o equador e os meridianos situados a 90° do meridiano central são representados por retas;
- os outros meridianos e os paralelos são curvas complexas;
- a escala aumenta com a distância em relação ao meridiano central, tornando-se infinita a 90° do meridiano central;
- como a Terra é dividida em 60 fusos de 6° de longitude, o cilindro transverso adotado como superfície de projeção assume 60 posições diferentes, já que seu eixo mantém-se sempre perpendicular ao meridiano central de cada fuso;
- aplica-se ao meridiano central de cada fuso um fator de redução de escala igual a 0,9996, para minimizar as variações de escala dentro do fuso;
- duas linhas aproximadamente retas, uma a leste e outra a oeste, distantes cerca de 1°37' do meridiano central, são representadas em verdadeira grandeza.

A tabela 2 ilustra as características principais de algumas das projeções cartográficas mais importantes. Os itens que aparecem na coluna “aplicações” referem-se, principalmente, à situação de uso das projeções aqui no Brasil.

Projeção	Classificação	Aplicações	Características
Albers	Cônica Equivalente	Mapeamentos temáticos. Mapeamento de áreas com extensão predominante leste-oeste.	Preserva área. Substitui com vantagens todas as outras cônicas equivalentes.
Bipolar Oblíqua	Cônica Conforme	Indicada para base cartográfica confiável dos continentes americanos.	Preserva ângulos. Usa dois cones oblíquos.
Cilíndrica Equidistante	Cilíndrica Equidistante	Mapas Mundi. Mapas em escala pequena. Trabalhos computacionais.	Altera área e ângulos.
Gauss-Krüger	Cilíndrica Conforme	Cartas topográficas antigas.	Altera área (porém as distorções não ultrapassam 0,5%). Preserva os ângulos.
Estereográfica Polar	Azimutal Conforme	Mapeamento das regiões polares. Mapeamento da Lua, Marte e Mercúrio.	Preserva ângulos. Tem distorções de escala.
Lambert	Cônica Conforme	Mapas temáticos. Mapas políticos. Cartas militares. Cartas aeronáuticas.	Preserva ângulos.

Projeção	Classificação	Aplicações	Características
Lambert Million	Cônica Conforme	Cartas ao milionésimo.	Preserva ângulos.
Mercator	Cilíndrica Conforme	Cartas náuticas. Mapas geológicos. Mapas magnéticos. Mapas Mundi.	Preserva ângulos.
Miller	Cilíndrica	Mapas mundi. Mapas em escalas pequenas.	Altera área e ângulos.
Policônica	Cônica	Mapeamento temático em escalas pequenas.	Altera áreas e ângulos.
UTM	Cilíndrica Conforme	Mapeamento básico em escalas médias e grandes. Cartas topográficas.	Preserva ângulos. Altera áreas (porém as distorções não ultrapassam 0,5%).

Tabela 2 – Principais projeções, sua classificação, suas aplicações e características

6.5 TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS

A entrada de dados via mesa digitalizadora impõe uma calibração entre os sistemas de coordenadas do mapa e da mesa digitalizadora. Os usuários de SIG já se acostumaram a ter que clicar com o mouse nos quatro cantos do mapa e fornecer as coordenadas geográficas ou de projeção. O SIG calcula os parâmetros de uma transformação de afinidade que guarda a relação entre coordenadas de mesa e coordenadas do mapa.

A integração de imagens de satélite a uma base de dados é tipicamente executada através de funções polinomiais determinadas a partir das coordenadas de pontos de controle identificados nas imagens e no sistema de referência da base de dados.

Estes dois exemplos de processamentos corriqueiros na criação da base de dados de um SIG mostram que é importante conhecer alguns aspectos básicos de transformações geométricas no espaço bidimensional. Em síntese, as seguintes transformações são aqui discutidas: ortogonal (3 parâmetros), similaridade (4 parâmetros), afim ortogonal (5 parâmetros), afinidade (6 parâmetros) e transformações polinomiais (mais de 6 parâmetros). A figura 7 tem o objetivo de guiar o leitor na descrição de cada transformação geométrica. É importante que se entenda quais efeitos geométricos são modelados por cada transformação.

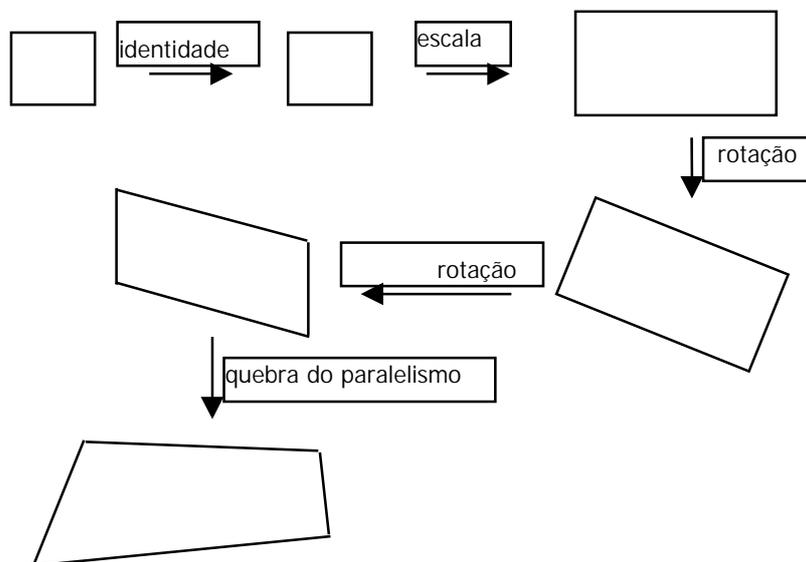


Figura 7 – Primitivas básicas envolvidas nas transformações geométricas

Uma transformação ortogonal executa uma rotação e duas translações, cada uma correspondente a um dos eixos de um sistema de coordenadas planas (3 parâmetros). É também conhecida como transformação de corpo rígido. Aplicada a um quadrado de lado L , gera, numa outra posição do plano, um quadrado de lado L que pode estar rotacionado em relação a sua posição inicial. Trata-se de uma transformação adequada para avaliações de qualidade geométrica de dados vetoriais. A determinação de seus 3 parâmetros requer um número mínimo de 2 pontos de controle.

Uma transformação de similaridade executa um fator de escala global, uma rotação e duas translações (4 parâmetros). É também conhecida como transformação isogonal. Aplicada a um quadrado de lado L_1 , gera, numa outra posição do plano, um quadrado de lado L_2 que pode estar rotacionado em relação a sua posição inicial. É uma transformação adequada para avaliações de qualidade geométrica de dados vetoriais e matriciais. A determinação de seus 4 parâmetros também requer um número mínimo de 2 pontos de controle.

Uma transformação afim ortogonal executa dois fatores de escala, cada um ao longo da direção de um dos eixos de um sistema de coordenadas planas, uma rotação e duas translações (5 parâmetros). Aplicada a um quadrado, gera, numa outra posição do plano, um retângulo que pode estar rotacionado em relação a sua posição inicial. É uma transformação útil quando se deseja investigar deformações de escala ao longo de direções perpendiculares. Apesar de não ser muito comum, pode ser usada como função de calibração na entrada de dados via mesa digitalizadora. A determinação de seus 5 parâmetros requer um número mínimo de 3 pontos de controle.

Uma transformação de afinidade executa dois fatores de escala, uma rotação, duas translações e uma rotação residual, que é responsável pela quebra da ortogonalidade (6 parâmetros). Aplicada a um quadrado, gera, numa outra posição do plano, um paralelogramo que pode estar rotacionado em relação a sua posição inicial. É uma transformação adequada para função de calibração na entrada de dados via mesa digitalizadora e para o registro de dados vetoriais e matriciais a uma base de dados num SIG. Lembra-se aqui que a transformação de afinidade nada mais é que um polinômio do 1º grau. A determinação de seus 6 parâmetros também requer um número mínimo de 3 pontos de controle.

Qualquer transformação geométrica mais complexa (maior número de parâmetros) que uma transformação de afinidade ou um polinômio do 1º grau introduz quebra de paralelismo. Pense, por exemplo, na presença de um termo em xy acrescido aos termos já presentes numa transformação de afinidade. Como resultado, o paralelogramo do exemplo acima se transforma num trapézio, se o termo em xy só afetar uma direção, ou num quadrilátero genérico. Transformações polinomiais podem ser úteis para o registro de dados vetoriais e matriciais a uma base de dados num SIG. Entretanto, polinômios de

ordem mais elevada devem ser usados com cautela: transformações mais complexas só fazem sentido se houver mais efeitos geométricos a ser modelados do que aqueles descritos nesta seção.

6.6 CONHECIMENTO DA INCERTEZA

Um último aspecto a ser explorado na relação interdisciplinar entre Cartografia e Geoprocessamento diz respeito à incerteza. Tudo o que se mede ou se modela está sujeito a erros e esses erros respondem pela qualidade de um mapa ou da base de dados num SIG. A questão não é a busca da perfeição mas sim o conhecimento da incerteza.

O componente de erro mais explorado é a incerteza quanto à localização. A exatidão de posicionamento é dada pelo erro na posição ou na localização, com relação ao sistema de referência da base de dados, de pontos bem definidos. O usuário de SIG deve se preocupar, por exemplo, com o erro na medição das coordenadas dos pontos de controle com GPS ou então com o erro planimétrico associado à escala dos mapas.

Outro componente de erro muito importante é a incerteza na atribuição de valores ou classes aos objetos que compõem a base de dados. A exatidão de atributos questiona a correção com que os atributos são associados aos objetos. No caso de variáveis representadas por campos numéricos, como o relevo, o erro é expresso por um valor numérico, um número real. Pode-se dizer que a altitude de um ponto tem um erro de 20m. Já para variáveis representadas por campos temáticos, como o solo, o erro reduz-se a certo ou errado. Um polígono classificado como floresta ombrófila densa está errado porque está na área de floresta ombrófila aberta.

A base de dados de um SIG deve ser logicamente consistente e completa. A preocupação do usuário aqui é quanto à omissão de linhas e à falta de rotulação de polígonos. É o caso de um trecho importante da BR-116, na região de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE), que não foi digitalizado num mapa rodoviário. Pode-se também pensar no caso de um mapa de recursos hídricos do nordeste em que o polígono que descreve o açude do Orós (CE) não foi rotulado com a classe *açude*. A questão final é “será que a base de dados contém o que deveria conter?”

6.7 INTEGRAÇÃO DE DADOS

A integração de dados de diferentes fontes, gerados pelos mais diversos procedimentos, com o objetivo de compor a base de dados de um certo projeto, traz consigo algumas preocupações constantes dos usuários de SIG. A integração de dados num SIG também revela procedimentos que dependem da existência de uma série de funcionalidades que devem estar presentes num SIG.

Uma questão básica já foi discutida nas seções anteriores. Em última instância um SIG guarda as coordenadas planas ou de projeção dos objetos que formam a base de dados. É importante que a informação a respeito dos parâmetros da projeção cartográfica e do datum planimétrico seja armazenada de forma explícita e usada coerentemente quando necessário. Mas é igualmente importante o cuidado que o usuário deve ter com relação ao sistema de referência de seus dados.

Determinadas projeções cartográficas requerem um certo cuidado na construção e manutenção da base de dados. O caso mais típico é o problema das zonas ou fusos da projeção UTM. Cada zona UTM tem seu próprio sistema de coordenadas planas, de modo que mapas separados por uma borda de zona não se articulam em termos de coordenadas planas. Nestes casos críticos há dois procedimentos. Os mais conservadores podem dividir o projeto em dois ou mais projetos UTM, um para cada zona. Os resultados das análises em cada projeto podem ser remapeados para outra projeção cartográfica mais conveniente para elaboração do mapa final. Outra possibilidade é estender a principal zona UTM a toda a região do projeto. Isto requer cuidado cartográfico, com respeito às deformações que podem ser introduzidas, e exige do SIG as funcionalidades adequadas ao tratamento de extensões de zonas UTM.

Problema semelhante também ocorre com a projeção cônica conforme de Lambert das cartas ao milionésimo, pois cada faixa de 4 graus de latitude tem seu próprio sistema de coordenadas planas, já que a origem é sempre definida pelo paralelo superior da carta. A figura 10 ilustra o problema da projeção UTM para o caso da Península Ibérica. Mostra, ainda, exemplos de dois outros problemas que serão discutidos nos próximos parágrafos: a cobertura dos dados e a geração de polígonos espúrios.

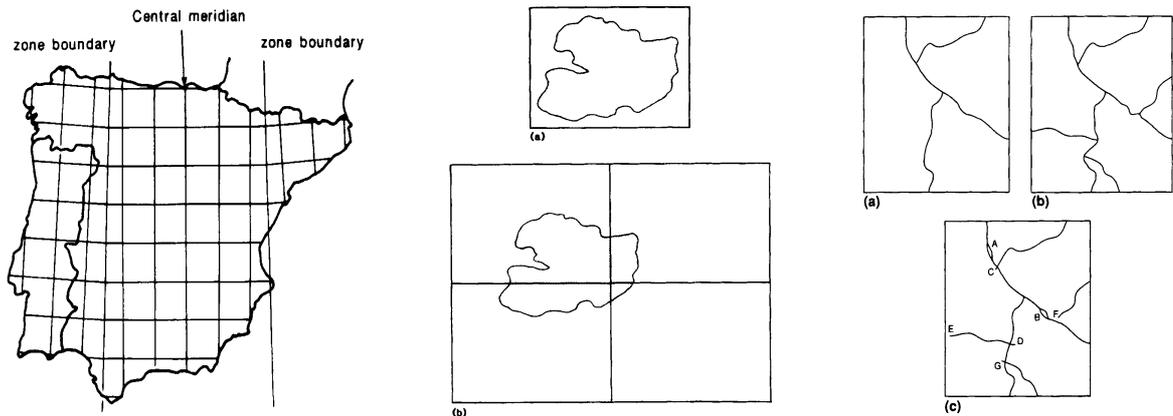


Figura 10 – Problemas típicos de integração de dados. FONTE: Maguire et al. (1991)

Acabou de descobrir que sua área de estudo requer 4 cartas topográficas para ser totalmente coberta? Ou que vai necessitar de 2 imagens de satélite para fazer a atualização do uso do solo? Ou ainda que certas informações municipais devem ser agregadas para integrar um contexto estadual? Estes são problemas típicos de cobertura dos dados. Trata-se de diferentes particionamentos do espaço geográfico e das consequências que isso traz para o usuário de SIG. Um SIG deve ser capaz de gerenciar os mais diversos particionamentos do espaço geográfico sem que haja limitações para as operações de entrada, combinação e análise dos dados.

O projeto de monitoramento do desflorestamento na Amazônia brasileira, de responsabilidade do INPE, é um bom exemplo do problema de cobertura dos dados. A área da Amazônia foi dividida de acordo com as folhas 1:250.000 das cartas topográficas, sendo que cada folha de 1° por $1,5^\circ$ define um projeto no SIG. A informação atualizada do desflorestamento é extraída de imagens TM-Landsat e inserida nos projetos definidos pelas cartas topográficas. Posteriormente parte dos dados é organizada por município e há também uma agregação feita por estado.

Outro grupo de problemas ligados à integração de dados relaciona-se a certos erros que costumam aparecer nos dados que são combinados ou integrados. Há inicialmente uma questão básica que se refere ao ajuste de linhas que são copiadas ou mosaicadas de um plano de informação para outro. Sempre que esta operação ocorrer o usuário é obrigado a aplicar a função de ajuste de linhas de modo a garantir consistência topológica.

Outra questão mais preocupante, que nem sempre vem acompanhada de soluções possíveis, é a geração de polígonos espúrios. Este efeito pode ocorrer sempre que se faz uma combinação ou cruzamento de dados entre dois ou mais planos de informação que contêm linhas que representam a mesma feição geográfica. O problema é que essa linha pode não ter a mesma representação nos planos de informação envolvidos por um dos dois

motivos: as linhas já não tinham a mesma representação nos mapas originais ou tinham a mesma representação mas a digitalização cuidou de introduzir diferenças na representação digital resultante. Desse modo, pequenos polígonos, chamados polígonos espúrios, são gerados pela interseção de linhas que representam as mesmas feições mas que têm representações digitais levemente discrepantes. Apesar de existirem ferramentas para detecção desses pequenos polígonos – que tendem a ser afilados e com área pequena – este problema é de difícil solução automática num SIG.

O melhor procedimento por parte do usuário é analisar seus dados antes de colocá-los no universo digital. Num exemplo que integra um mapa de solos com um de vegetação numa área de estudo no litoral, a linha de costa está representada nos dois mapas. O usuário deve escolher a melhor representação (mais recente, mais exata) e digitalizar a linha de costa que está presente somente em um dos mapas, copiando-a para o plano de informação do outro mapa.

6.8 INTEGRAÇÃO COM SENSORIAMENTO REMOTO

Esta parte dá uma atenção especial à integração entre Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Por motivos óbvios, como repetibilidade de informação e custo operacional, o Sensoriamento Remoto representa uma fonte única de informação atualizada para um SIG. Além disso, a união da tecnologia e dos conceitos e teorias de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento possibilita a criação de sistemas de informação mais ricos e sofisticados.

De uma forma mais pragmática, a integração entre Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento depende da inserção das imagens aéreas ou de satélite na base de dados do SIG. Para isso entram em cena os procedimentos de correção geométrica de imagens, as vezes chamados de geo-referenciamento ou geocodificação, outras vezes excessivamente simplificados e reduzidos ao registro de imagens.

6.8.1 CORREÇÃO GEOMÉTRICA DE IMAGENS

A primeira razão para a realização de correção geométrica de imagens é a existência de distorções sistemáticas introduzidas durante a aquisição das imagens. Portanto, a correção geométrica trata, prioritariamente, da remoção dos erros sistemáticos presentes nas imagens. Outro aspecto importante são os estudos multi-temporais tão comuns à área de Sensoriamento Remoto. Eles requerem que uma imagem seja registrada com a outra para que se possa interpretar a resposta de ambas para uma certa posição no espaço. Na verdade, a motivação mais contemporânea para a correção geométrica de

imagens é a integração com mapas e outras informações. Sensoriamento Remoto, por si só, já não faz tanto sentido. Há muito tempo os agrônomos deixaram de se preocupar apenas em separar uma cultura de outra numa imagem; eles agora pensam em produtividade agrícola, que, além dos tipos de cultura interpretados na imagem, depende do tipo de solo (mapa de solos), do teor de certos nutrientes no solo (medição de amostras) e da declividade (carta topográfica).

Alguns requerimentos são fundamentais para que se trabalhe bem com correção geométrica de imagens. Em primeiro lugar, para que se possa pensar em correção geométrica, há que se conhecer os erros que interferem no processo de formação das imagens. A escolha do modelo matemático mais adequado ao tratamento de cada caso depende fortemente desse conhecimento. Além disso, um SIG deve sempre propiciar ferramentas para que o resultado de uma correção geométrica possa ser avaliado e, conseqüentemente, validado.

De uma maneira geral, o processo de correção geométrica de imagens compreende três grandes etapas. Começa-se com uma transformação geométrica, também denominada mapeamento direto, que estabelece uma relação entre coordenadas de imagem (linha e coluna) e coordenadas geográficas (latitude e longitude). É a etapa em que se eliminam as distorções existentes e se define o espaço geográfico a ser ocupado pela imagem corrigida. Em seguida faz-se o mapeamento inverso, que inverte a transformação geométrica usada no mapeamento direto, permitindo que se retorne à imagem original para que se definam os níveis de cinza que comporão a imagem corrigida. Esta definição de níveis de cinza ocorre na última etapa, chamada de reamostragem, que nada mais é que uma interpolação sobre os níveis de cinza da imagem original.

6.8.2 FONTES DE DISTORÇÕES GEOMÉTRICAS

A discussão das fontes de erro se atém às imagens orbitais dos sensores MSS (Landsat), TM (Landsat), HRV (Spot) e AVHRR (Noaa). Um dos efeitos principais é causado pela rotação da Terra (skew), ou seja, pelo movimento relativo entre a Terra e o satélite. Na medida em que o satélite desloca-se para o sul, a Terra gira de oeste para leste, fazendo com que seja necessário compensar o posicionamento das varreduras, que devem ser deslocadas para leste. Por isso as imagens corrigidas apresentam aquele aspecto de paralelogramo. No caso do sensor TM, Landsat-5, a compensação desse erro corresponde a um deslocamento de cerca de um pixel por varredura.

Outro efeito importante são as chamadas distorções panorâmicas, que afetam, principalmente, os sensores que trabalham com um campo de visada amplo, como é o caso do AVHRR. A distorção panorâmica é originada pela variação do IFOV (instantaneous field of view) dentro do campo de visada. Como o IFOV corresponde a um ângulo fixo, ele cobre dimensões diferentes no terreno em função da inclinação. Isto faz com que a dimensão coberta no terreno no nadir seja menor que aquela coberta nas bordas da imagem. Por isso diz-se que a distorção panorâmica causa compressão de dados nas regiões distantes do nadir. Nas imagens AVHRR esse efeito faz com que um pixel na borda da imagem corresponda a uma extensão quase três vezes maior que a do pixel no nadir.

A curvatura da Terra gera um efeito análogo ao anterior. Na verdade, ela acentua o efeito da distorção panorâmica, fazendo com que haja uma compressão de dados maior nas bordas da imagem. Por isso deve ser tratada como parte integrante da distorção panorâmica. Nas imagens AVHRR a curvatura da Terra, associada à distorção panorâmica propriamente dita, faz com que um pixel na borda da imagem corresponda a uma extensão mais que quatro vezes maior que a do pixel no nadir.

Outro efeito que se origina por questões de movimento relativo é o chamado arrastamento da imagem durante uma varredura. Este efeito afeta apenas os sensores que operam por varreduras mecânicas, pois o satélite move-se ao longo de sua órbita durante o tempo decorrido para a execução de uma varredura. Trata-se do efeito zigue-zague, comum nas imagens MSS. O sensor TM já possui um dispositivo que compensa esse efeito fazendo com que o espelho do sensor “olhe” para trás durante o movimento de varredura, compensando o movimento do satélite ao longo da sua órbita. O sensor HRV, que opera por varreduras eletrônicas, não sofre esse efeito.

Somam-se a esses efeitos aqueles oriundos de variações de efemérides do satélite (posição e velocidade) e a de atitude da plataforma (roll, pitch, yaw). É importante ter em mente que nem sempre é possível individualizar todos esses efeitos. Uma superposição entre varreduras sucessivas pode ser causada por uma variação de velocidade do satélite, mas pode também ser explicada por uma variação de pitch (giro em torno de um eixo perpendicular à órbita do satélite).

6.8.3 TRANSFORMAÇÃO GEOMÉTRICA

A transformação geométrica ou mapeamento direto pode ser executada através de três modelos matemáticos distintos: o modelo de correções independentes, o modelo fotogramétrico e o modelo polinomial. Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta de cada modelo, enfatizando-se vantagens, desvantagens e aplicabilidade.

a) Modelo de correções independentes

O modelo de correções independentes, como o próprio nome sugere, trata de forma independente as diversas distorções sistemáticas. Tudo é feito no sistema de referência da imagem, onde os pixels são reposicionados de acordo com a modelagem de cada efeito visto de modo isolado. Há duas grandes desvantagens na aplicação desse modelo. Em primeiro lugar, conforme o exemplo mencionado sobre a superposição de duas varreduras consecutivas, há correlações entre as fontes de distorção, de modo que seus efeitos nem sempre são separáveis. Com isso, o resultado da correção geométrica não é muito bom. Além disso, como tudo se passa no sistema de referência da imagem, não se consegue estabelecer uma relação com as coordenadas geográficas sem que haja um procedimento externo. O modelo de correções independentes foi muito usado em imagens MSS dos três primeiros satélites da série Landsat.

b) Modelo fotogramétrico

O modelo fotogramétrico inspira-se no uso das equações de colinearidade aplicadas em fototriangulação. Com base nos dados de efemérides do satélite, descobre-se sua posição no instante de aquisição de um dado pixel. Com as informações da atitude e dos parâmetros do sistema de imageamento, define-se a direção de visada para aquele instante. Tem-se, então, um ponto e uma direção no espaço, os quais definem uma reta. Calcula-se a interseção dessa reta com a figura matemática da Terra, no caso um elipsóide de referência. Como resultado, chega-se aos valores de latitude e longitude associados ao instante de aquisição de um certo pixel, estabelecendo-se, assim, a relação entre o sistema de referência da imagem e as coordenadas geográficas. O modelo fotogramétrico não faz hipóteses sobre a independência das diversas fontes de erro e permite o cálculo das coordenadas geográficas sem que haja necessidade de um procedimento externo. Deste modo, o referenciamento da imagem a um sistema de projeção cartográfica pode ser feito sem grandes dificuldades. O modelo fotogramétrico tem sido usado para quase todas as imagens geradas pelos sensores dos satélites Landsat e Spot.

c) Modelo polinomial (registro de imagens)

O modelo polinomial consiste de uma função polinomial cujos parâmetros são determinados a partir das coordenadas de pontos de controle identificados tanto no sistema de referência da imagem como no sistema de referência da base de dados. É o modelo disponível em quase todos os sistemas para o registro de imagens. Como se trata de um modelo que não usa informações inerentes à aquisição da imagem e nem faz distinção sobre o status ou nível de correção geométrica da imagem, muitos autores não o consideram como um modelo de correção geométrica e preferem referir-se a ele como um

modelo de registro. O desempenho deste modelo depende de uma boa distribuição de pontos de controle, da precisão das coordenadas dos pontos de controle e, o mais importante, da adequação da função polinomial escolhida ao que se pretende modelar. Convém lembrar aqui do que foi discutido sobre transformações geométricas anteriormente.

6.8.4 MAPEAMENTO INVERSO

Se o mapeamento direto é executado pela transformação geométrica T , o mapeamento inverso fica definido pela transformação T^{-1} . A figura 11 ilustra essa relação entre os mapeamentos direto e inverso. O mapeamento inverso se faz necessário porque o mapeamento direto apenas define a geometria e o espaço geográfico da imagem corrigida. Os níveis de cinza que compõem a imagem corrigida residem na imagem de entrada. Baseado fortemente na idéia de otimização computacional, o mapeamento inverso recupera a informação sobre os níveis de cinza que definirão o valor a ser associado a uma certa posição na imagem corrigida. É um procedimento imprescindível para a realização da última etapa da correção geométrica, descrita a seguir.

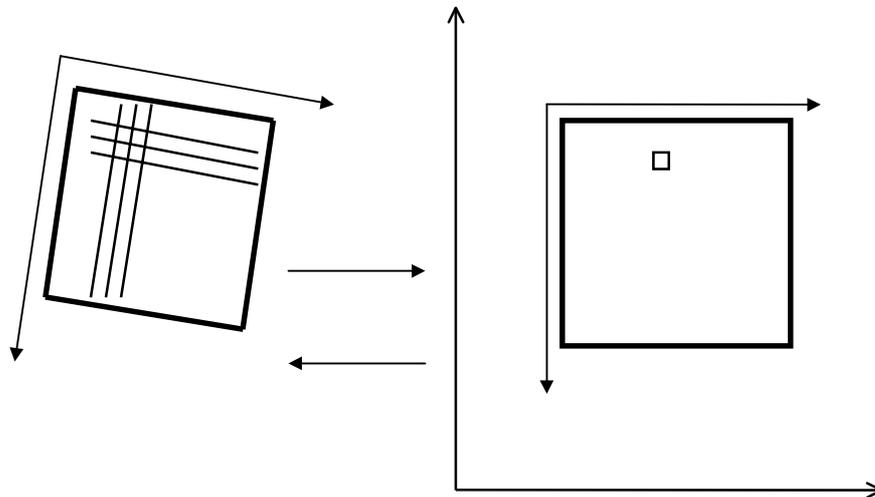


Figura 11 - Relação entre os mapeamentos direto e inverso

6.8.5 REAMOSTRAGEM (INTERPOLAÇÃO)

A reamostragem é a última etapa do processo de correção geométrica. Ela usa a informação sobre níveis de cinza conseguida pelo mapeamento inverso e realiza uma interpolação para definir os valores de nível de cinza que comporão a imagem corrigida. Os métodos mais tradicionais de reamostragem são: vizinho mais próximo, que usa o nível de cinza mais próximo ao resultado do mapeamento inverso; bilinear, que usa três interpolações lineares sobre os quatro pixels que cercam o resultado do mapeamento inverso, duas ao longo das linhas e uma na direção das colunas; convolução cúbica, que usa cinco interpolações polinomiais do terceiro grau sobre os dezesseis pixels que cercam o resultado do mapeamento inverso, quatro ao longo das linhas e a quinta na direção das colunas.

6.8.6 REGISTRO DE IMAGENS

O uso de transformações polinomiais do 1º e 2º graus é bastante comum no registro de imagens. As transformações polinomiais fazem o vínculo entre as coordenadas de imagem e as coordenadas no sistema de referência (geográficas ou de projeção) através de pontos de controle. Pontos de controle são feições passíveis de identificação na imagem e no terreno, ou seja, são feições homólogas cujas coordenadas são conhecidas na imagem e no sistema de referência. Cruzamentos de estradas, pistas de aeroportos e confluência de rios são candidatos naturais a pontos de controle.

A determinação dos parâmetros da transformação polinomial selecionada é feita através da resolução de um sistema de equações. Para que esse sistema de equações possa ser elaborado as coordenadas dos pontos de controle devem ser conhecidas tanto na imagem de ajuste (imagem a ser registrada) como no sistema de referência. As coordenadas de imagem (linha, coluna) são obtidas quando o usuário “clica” sobre a feição na imagem. As coordenadas de referência são usualmente obtidas através de mapas confiáveis que contenham as feições homólogas usadas como pontos de controle. Os vários sistemas disponíveis também aceitam medições feitas diretamente no terreno (GPS), dados vetoriais existentes e imagens geo-referenciadas como fontes de extração de coordenadas de referência.

Uma vez determinados os n pontos de controle e selecionada a transformação polinomial, um sistema de $2n$ equações é montado para resolver 6 ou 12 parâmetros, dependendo do polinômio ser de 1º ou 2º grau. Assim, conclui-se que o número mínimo de pontos de controle é 3 para o polinômio de 1º grau e 6 para o polinômio de 2º grau. O número mínimo de pontos de controle representa a situação de um sistema de equações

determinado, no qual o número de equações coincide com o número de incógnitas a calcular. Entretanto, como as coordenadas medidas dos pontos de controle estão sujeitas a erros, convém usar um número de pontos maior que o mínimo. Nesse caso, trabalha-se com um sistema de equações sobre-determinado, que tem mais equações que incógnitas e permite tratar e distribuir os erros de medição dos pontos de controle. Em termos práticos aconselha-se o uso de 6 pontos de controle para o polinômio de 1º grau e 10 pontos de controle para o polinômio de 2º grau. Deve-se ter em mente também que a distribuição dos pontos de controle na área a ser registrada é de suma importância, pois as transformações polinomiais tendem a se comportar adequadamente apenas na região onde se encontram os pontos de controle.

6.9 GENERALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA

No domínio convencional da Cartografia generalização cartográfica é um processo dependente da escala que inclui seleção, simplificação e síntese dos objetos que devem compor um certo mapa. É um processo claramente voltado à visualização ou à comunicação eficiente daquilo que está representado num mapa. Como regra geral, a complexidade de um mapa deve diminuir com a escala do mapa. Com o advento da tecnologia de SIG, generalização cartográfica passou a incorporar também a noção de modelagem, que envolve a derivação de uma base de dados menos complexa para atender a uma certa finalidade. Esta seção dedica-se à discussão do papel da generalização cartográfica no domínio digital.

Generalização pode ser entendida como o processo de universalização do conteúdo de uma base de dados espaciais com uma certa finalidade. Um de seus objetivos deve ser a redução da complexidade, quer seja para fins de visualização, quer seja para armazenar na base de dados apenas aquilo que é necessário. A redução da complexidade deve levar em conta uma certa lógica que não comprometa a exatidão de posicionamento e a exatidão de atributos dos dados (veja a seção 2.5 em caso de dúvidas). Algumas das motivações da generalização são ilustradas na figura 12.

No domínio digital a resolução espacial da base de dados parece ser uma dimensão mais relevante que a escala, de modo que a resolução espacial é, tal e qual a escala, o é no domínio analógico, um dos elementos de controle para a generalização. Pode-se dizer que a modelagem em níveis de abstração diferentes depende da resolução espacial. Na verdade, a escala também se torna um elemento de controle quando há preocupação com visualização dos dados digitais na tela do computador. Neste caso, exatamente como nos mapas em papel, o objetivo é fazer a comunicação visual dos dados de forma eficiente.

Uma maneira mais prática de entender generalização no domínio digital é conceituá-la como a seleção e representação simplificada de objetos através de transformações espaciais e de atributos. Generalização afeta diretamente a construção e a derivação de bases de dados. Vista como uma sequência de transformações, a generalização pode propiciar aumento de robustez e otimização computacional. Como já foi mencionado, generalização tem um compromisso forte com eficiência na comunicação visual.

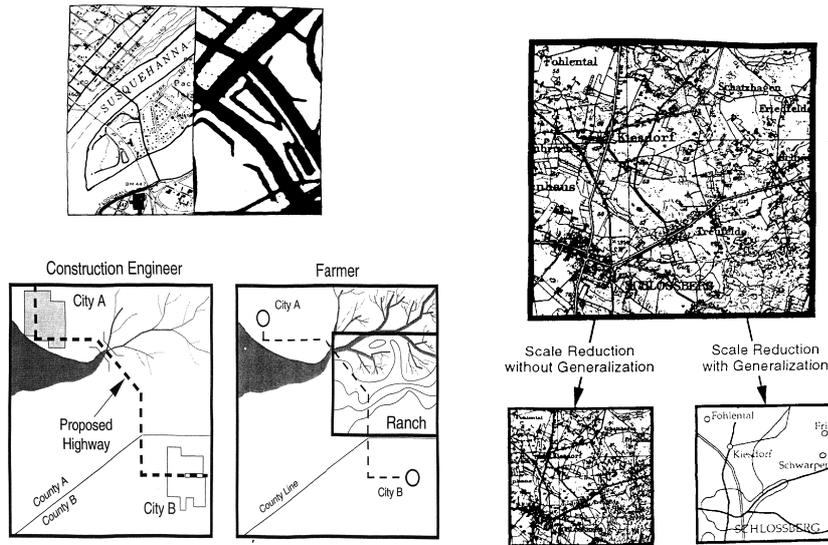


Figura 12 – Motivações da generalização

6.9.1 TIPOS DE GENERALIZAÇÃO

O entendimento de generalização como uma sequência de operações de modelagem permite que se pense em três tipos de generalização. O primeiro é a generalização de objetos, que usualmente ocorre antes da entrada de dados. Ela prevê uma seleção dos objetos que devem compor o conteúdo da base de dados. Outro tipo é a generalização orientada à modelagem, que responde pela simplificação da base de dados, ou seja, pela derivação de uma base de dados menos detalhada. Por último tem-se a generalização cartográfica propriamente dita, que coordena a representação gráfica da base de dados simplificada.

6.9.2 ESTRATÉGIAS DE GENERALIZAÇÃO

Existem duas possibilidades básicas de se estabelecer um esquema de trabalho que envolva generalização num SIG. A primeira se baseia numa orientação por processos que prevê a existência de uma única base de dados bem detalhada no SIG. Qualquer base de dados menos detalhada deve ser gerada a partir da base detalhada. O estado da arte atual em SIG, que não explicita a semântica e o contexto dos objetos, dificulta esta abordagem. A segunda estratégia utiliza uma orientação por representações que prevê o armazenamento de todos os níveis de abstração de interesse. É o que se chama de representações múltiplas, onde a preocupação é com a eficiência na extração da informação.

Pode ser simples pensar em generalização por representações múltiplas para a Suíça, país pequeno, com recursos financeiros para manter atualizadas bases de dados em escalas variadas. No caso do Brasil, tanto pela extensão territorial como pela escassez de recursos financeiros, a abordagem da orientação por processos parece ser a única viável para generalização.

Do ponto de vista de desenvolvimento tecnológico em SIG é oportuno desenvolver ferramentas de visualização que atendam pelo menos a critérios de otimização de exibição dos dados na tela do computador. Em termos de modelagem o papel da generalização parece ser mais analítico que gráfico. Neste contexto são de extrema importância as ferramentas de análise espacial, que fornecem a base teórica necessária ao entendimento de como o fenômeno em estudo varia no espaço. O desafio fica por conta da formalização do conhecimento geográfico.

6.9.3 SIMPLIFICAÇÃO DE LINHAS

Os sistemas de informações geográficas normalmente propiciam aos usuários algumas ferramentas para a generalização cartográfica que se baseiam em transformações espaciais que alteram a representação dos dados em termos da localização geográfica (simplificação, suavização, agregação, exagero e deslocamento) e do significado topológico (classificação e simbolização).

Como a maioria dos objetos utiliza a linha como entidade básica para sua representação, a simplificação de linhas tem sido bastante estudada e é a transformação mais comumente encontrada nos sistemas existentes. Os métodos de simplificação de linhas procuram selecionar e manter os pontos que melhor caracterizam a representação digital de uma linha. Em outras palavras, trata-se de rejeitar pontos redundantes, ou seja, aqueles que não contribuem significativamente para a representação digital da linha. Um

bom exemplo de redundância é a digitalização via mesa em modo contínuo, que costuma gerar linhas digitais com um número excessivo de pontos. O processo de entrada de dados via scanner, que envolve a geração de uma representação matricial seguida de uma vetorização também costuma gerar redundância de pontos.

Alguns exemplos de algoritmos para simplificação de linhas são descritos a seguir: o algoritmo original de Douglas-Peucker (Douglas and Peucker, 1973); uma adaptação do algoritmo de Douglas-Peucker que usa o quociente área/perímetro; uma adaptação do algoritmo de Li-Openshaw (Li and Openshaw, 1993) que acumula as distâncias percorridas sobre cada linha. Convém lembrar que todos eles usam critérios meramente subjetivos, que se traduzem na forma de tolerâncias a serem escolhidas pelos usuários. Portanto, aconselha-se fortemente que os usuários avaliem o impacto das diferentes tolerâncias, em cada método, sobre seus dados. Outro aspecto importante diz respeito à topologia. Estes métodos de simplificação atuam sobre as linhas sem preocupação com relações topológicas previamente criadas. Por isso, devem sempre ser sucedidos pelas operações de ajuste de nós e poligonalização.

Douglas-Peucker

Trata-se do método mais utilizado pelos sistemas de informação geográfica. Concebido inicialmente para resolver o problema do número excessivo de pontos resultantes da conversão de dados gráficos para o formato digital, o método de Douglas-Peucker baseia-se na seguinte idéia: se nenhum ponto da linha encontra-se mais afastado do que uma certa distância vertical ao segmento de reta que liga os extremos da linha, então esse segmento de reta é suficiente para representar a linha. Este método é considerado uma técnica global de generalização, pois analisa cada linha como um todo. A figura 13 ilustra a aplicação do algoritmo de Douglas-Peucker.

Razão Área/Perímetro

Este método utiliza exatamente o mesmo procedimento de análise global de cada linha empregado no método de Douglas-Peucker. A única diferença consiste na adoção da razão área/perímetro calculada em função da tolerância escolhida pelo usuário. O uso da razão área/perímetro permite que triângulos formados por três pontos consecutivos que tenham um ângulo agudo muito pequeno no segundo ponto possam ser detectados de modo mais eficiente que no método de Douglas-Peucker.

Distância Acumulada

O método da distância acumulada é uma adaptação da implementação vetorial do algoritmo de Li-Openshaw que usa como critério o conceito de menor objeto visível. Este método acumula as distâncias a medida em que a linha é percorrida até atingir um certo limiar, removendo todos os pontos acumulados nesse trecho. Trata-se, portanto, de um método bastante simples, mas que, ao contrário dos dois métodos anteriores, não analisa a linha em sua totalidade.

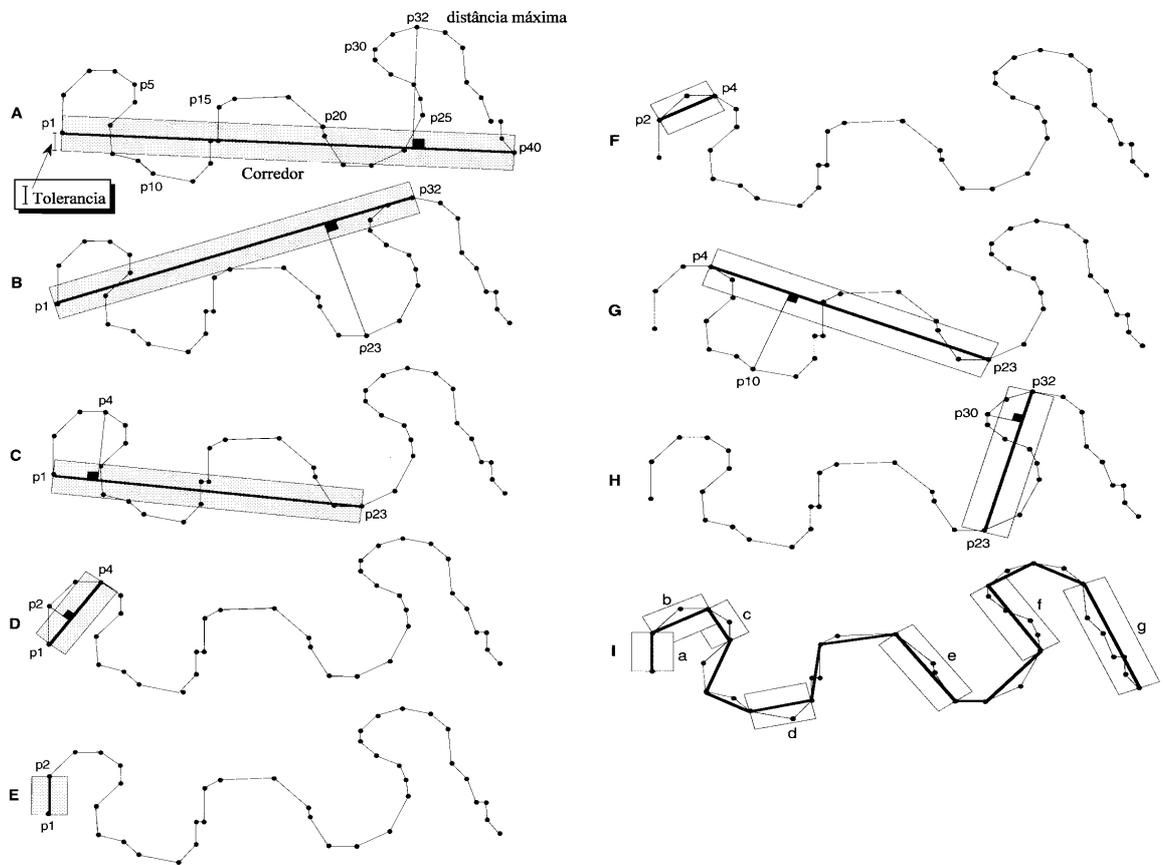


Figura 13 - Algoritmo de Douglas-Peucker

FONTE: (McMaster and Shea, 1992).

6.10 BIBLIOGRAFIA

1. DOUGLAS, D. and T. PEUCKER. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature. **Canadian Cartographer** v.10, n.2, p.112-122, 1973.
2. LI, Z. and S. OPENSHAW. A natural principle for objective generalisation of digital map data. **Cartography and Geographic Information Systems** v.20, n.1., 1993.
3. MAGUIRE, D., M. GOODCHILD and D. RHIND (ed.). **Geographical Information Systems**. London, Longman, 1991.
4. MCMASTER, R. and S. SHEA. **Generalization in Digital Cartography**. Washington, DC, American Association of Geographers, 1992.

MODELAGEM NUMÉRICA DE TERRENO

Carlos Alberto Felgueiras

7.1 DEFINIÇÃO

Um *Modelo Numérico de Terreno* (MNT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. Dados de relevo, informação geológicas, levantamentos de profundidades do mar ou de um rio, informação meteorológicas e dados geofísicos e geoquímicos são exemplos típicos de fenômenos representados por um MNT.

Dentre alguns usos do MNT pode-se citar (Burrough, 1986):

- Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens;
- Elaboração de mapas de declividade e exposição para apoio a análise de geomorfologia e erodibilidade;
- Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- Apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

Para a representação de uma superfície real no computador é indispensável a elaboração e criação de um modelo digital, que pode estar representado por equações analíticas ou um rede (**grade**) de pontos, de modo a transmitir ao usuário as características espaciais do terreno. No SPRING um MNT é criado na forma de uma grade de pontos **regulares e irregulares**.

A criação de um modelo numérico de terreno corresponde a uma nova maneira de focar o problema da elaboração e implantação de projetos. A partir dos modelos (grades) pode-se calcular diretamente volumes, áreas, desenhar perfis e secções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e aspecto, gerar fatiamentos nos intervalos desejados e perspectivas tridimensionais.

7.2 O PROCESSO DE GERAÇÃO DE UM MNT

O processo de geração de um modelo numérico de terreno pode ser dividido em 3 etapas: aquisição das amostras ou *amostragem*, geração do modelo propriamente dito ou *modelagem* e, finalmente, utilização do modelo ou *aplicações*.

A *amostragem* compreende a aquisição de um conjunto de amostras representativas do fenômeno de interesse. Geralmente essas amostras estão representadas por curvas de isovalores e pontos tridimensionais.

A *modelagem* envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste com o objetivo de se obter uma representação contínua do fenômeno a partir das amostras. Essas estruturas são definidas de forma a possibilitar uma manipulação conveniente e eficiente dos modelos pelos algoritmos de análise contidos no SIG. Os modelos mais utilizados são os modelos de grade regular retangular e os modelos de grade irregular triangular.

As *aplicações* são procedimentos de análise executados sobre os modelos digitais. As aplicações podem ser *qualitativas*, tais como a visualização do modelo usando-se projeções geométricas planares ou *quantitativas* tais como cálculos de volumes e geração de mapas de declividades.

7.3 ENTRADA DE DADOS

A amostragem de dados no processo de modelagem digital de terreno é uma das tarefas mais importantes de todo o processo. A amostragem compreende a aquisição de um conjunto de amostras que representam a variação de um fenômeno espacial de interesse. Uma amostragem não pode ser insuficiente, *subamostragem*, nem tampouco ser redundante, *superamostragem*. A subamostragem, por falta de informação, leva a geração de um modelo pobre. A superamostragem, por excesso de informação, sobrecarrega o sistema com o uso excessivo de memória e pode, como será visto adiante, prejudicar os resultados de uma modelagem. Nenhuma modelagem, por mais complexa ou sofisticada que seja, pode compensar os efeitos de uma amostragem mal feita.

A amostragem não é, em geral, aleatória. A amostragem deve ser representativa do comportamento do fenômeno que se está modelando. Uma superamostragem nem sempre significa uma amostragem representativa. Na definição de uma amostragem representativa deve-se considerar a quantidade e também o posicionamento das amostras em relação ao comportamento do fenômeno a ser modelado. Por exemplo, uma superamostragem de altimetria

numa região plana significa redundância de informação enquanto que poucos pontos em uma região de relevo movimentado significa escassez de informações.

7.3.1 FONTES DE AMOSTRAS

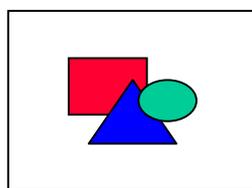
As fontes mais comuns de amostras de modelos digitais de terrenos são: arquivos digitais, importados de outros sistemas; bases topográficas com isolinhas e pontos notáveis de máximos e mínimos e; levantamentos em campo transformados, de alguma forma, em informação digitais; Para dados de altimetria pode-se, por exemplo, realizar-se levantamentos em campo com o auxílio de GPSs (“Ground Position Systems”). Um conjunto de amostras pode ainda ser obtido a partir de pares estéreos de imagens de sensoriamento remoto.

7.3.2 TIPOS DE AMOSTRAS

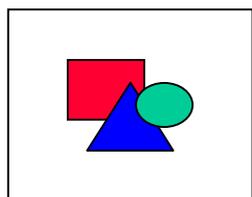
Os dados de modelo numérico de terreno estão representados pelas coordenadas xyz, onde z caracteriza o parâmetro a ser modelado, sendo $z=f(x,y)$. Quanto a posição relativa das amostras pode-se classificar a amostragem em: regular, semi-regular e irregular. A *amostragem regular* é aquela cuja posição espacial (x,y) das amostras mantém uma regularidade de distribuição nas direções x e y. As *amostragens semi-regulares* são aquelas que preservam a regularidade de distribuição espacial na direção x ou y mas nunca nas duas ao mesmo tempo. Amostragem por perfis, por exemplo, apresentam regularidade em uma direção preestabelecida. Na *amostragem irregular* não existe regularidade na distribuição das amostras. Na quase totalidade dos casos as amostras mais representativas de um fenômeno não estão regularmente distribuídas.

Os métodos de aquisição de dados podem ser por pontos amostrados com espaçamento irregular e regular bem como por mapa de isolinhas. A figura 7.1 mostra vários tipos diferentes de amostragem por pontos.

De acordo com o tipo de aquisição tem-se a distribuição das amostras conforme as figuras abaixo:



a) Totalmente Irregular



b) Aerolevanteamento

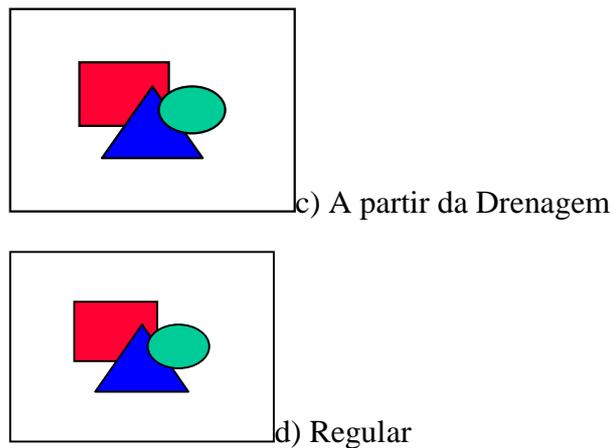


Figura 7.1 - Tipos de amostragem por pontos

O cuidado na escolha dos pontos e a quantidade de dados amostrados estão diretamente relacionados com a qualidade do produto final de uma aplicação sobre o modelo. Para aplicações onde se requer um grau de realismo maior, a quantidade de pontos amostrados, bem como o cuidado na escolha desses pontos, ou seja a qualidade dos dados, são decisivos. Quanto maior a quantidade de pontos representantes da superfície real, maior será o esforço computacional para que estes sejam armazenados, recuperados, processados, até que se alcance o produto final da aplicação.

No caso de amostragem por isolinhas, um mapa de isolinhas nada mais é do que a representação de uma superfície por meio de curvas de isovalor. O exemplo mais comum são as isolinhas altimétricas existentes nos mapas topográficos. Nestes mapas as isolinhas foram impressas com o uso de equipamentos, como *stereoplotters*, sobre uma base composta de fotografias em estéreo obtidas por aerolevanteamento. Cabe ainda mencionar que nestes mapas topográficos existem pontos amostrados irregularmente que foram obtidos por trabalhos de campo. A Figura abaixo mostra o exemplo de um mapa plano-altimétrico com isolinhas a alguns pontos cotados.

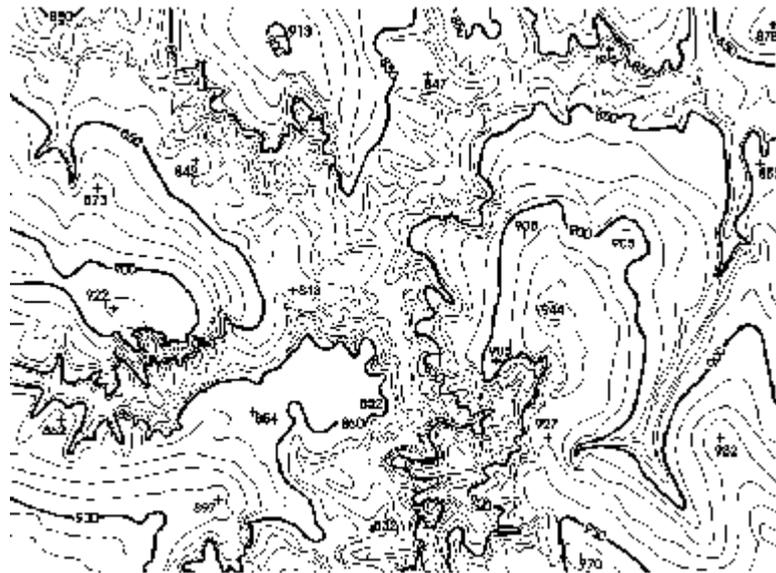


Figura 7.2 - Exemplo de Mapa plano-altimétrico.

A aquisição das isolinhas pode ser efetuada por meio de digitalização manual com uso de uma mesa digitalizadora, ou através de um processo automático por meio de *scanner*.

A digitalização manual consiste na operação de identificação de uma isolinha com um valor de cota e em aquisição pelo operador por um processo onde segue-se a liha ao longo do mapa.

Na digitalização com o uso de *scanner*, é obtida uma matriz de pontos onde podem ser identificadas as isolinhas e os valores de cota. Processos de vetorização que sigam uma isolinha, transformam-na em uma sequência de pontos com coordenadas XY de mesmo valor em Z, para cada isolinha.

7.3.3 REDUÇÃO DAS AMOSTRAS

Quando se trabalha com uma amostragem regular, muitas vezes importadas de outros sistemas, pode-se ter redundância de informação em áreas em que o fenômeno modelado não tem variação ou a variação é muito pequena. Nestes casos é comum o uso de algoritmos de redução de amostras desenvolvidos especificamente para amostragem regular. Esses algoritmos procuram extrair os pontos mais importantes do conjunto de amostras. Eles são conhecidos na literatura como extratores dos “Very Important Points” (VIPs). Chen (1987) apresenta um algoritmo simples e eficiente para extração dos VIPs. Lee (1991)

compara algoritmos de extração dos VIPs para construção de modelos digitais de grades triangulares.

7.3.4 ORGANIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras são utilizadas diretamente no processo de geração dos modelos. A cardinalidade das amostras pode variar de dezenas até centenas de milhares. Quando o conjunto amostral é muito numeroso é comum utilizar-se algoritmos *de organização das amostras* com o objetivo de melhorar a performance dos processos de geração dos modelos. Uma das formas mais utilizadas para organização das amostras consiste na partição do espaço bidimensional, que envolve as amostras.

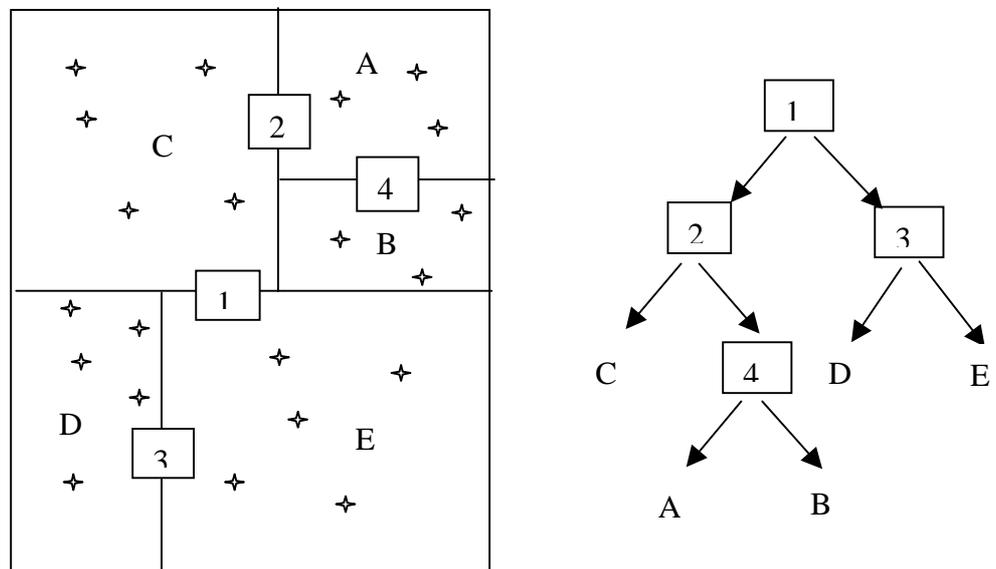


Figura 7.3 - Organização de um conjunto amostral por partição da distribuição espacial das amostras.

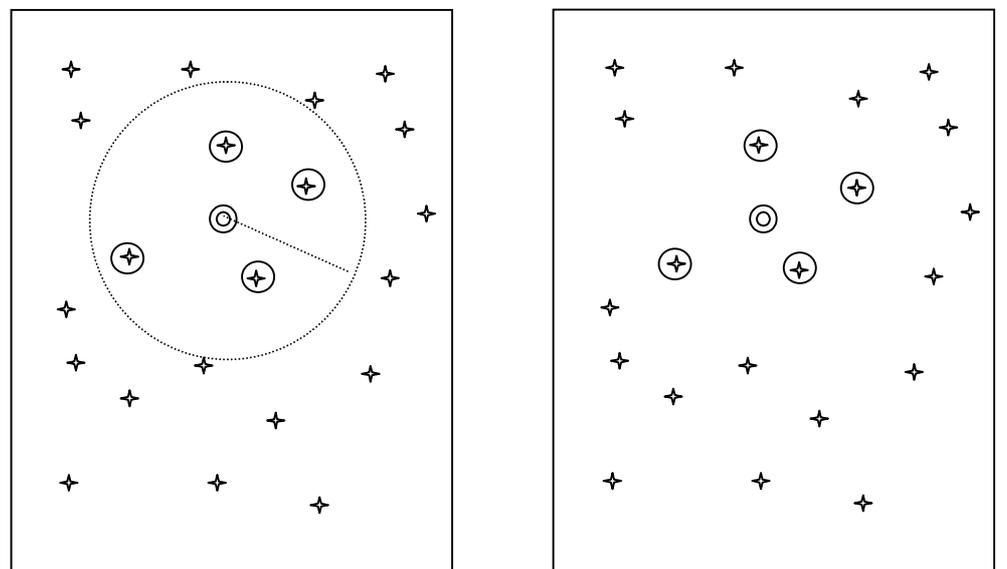
Uma estrutura de árvore binária, conhecida como árvore 2-kd, é criada para representar a partição definida para o conjunto de amostras. O critério de particionamento do espaço 2-D pode ser definido por um número máximo de amostras em cada partição. Na figura acima, os nós 1, 2, 3 e 4 representam partições do espaço enquanto A, B, C, D e E são nós folhas da árvore binária. Os nós folhas “apontam” para o conjunto de pontos que eles representam.

7.3.5 DEFINIÇÃO DE VIZINHANÇAS LOCAIS

Alguns interpoladores locais utilizam uma vizinhança amostral local fim de estimar o valor de cota de um ponto de interesse. A organização das amostras,

como apresentada acima, acelera a busca do conjunto de amostras vizinhas de uma determinada posição na região de interesse.

A vizinhança amostral de um ponto qualquer pode ser definida por uma região de influência ou por um número determinado de vizinhos. Em uma vizinhança amostral por área o número de vizinhos é variável podendo até mesmo ser igual a zero. No caso de vizinhança por número de vizinhos a região de influência é variável em tamanho e pode-se evitar o inconveniente de se obter zero vizinhos de um ponto. A figura abaixo ilustra esses conceitos. (Descrever busca utilizando a 2dtree e as amostras organizadas.)



⊙ Ponto da grade ✦ Ponto amostral ⊕ Amostra vizinha

Figura 7.4 -Definição de vizinhança: por região de influencia (à esquerda) e por número de vizinhos (à direita).

7.4 **MODELAGEM**

7.4.1 **INTRODUÇÃO**

Como já citado anteriormente, a *modelagem propriamente dita* envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste para os elementos dessas estruturas. O objetivo é a obtenção de uma função definível em toda a região de estudo. Essa função nem sempre é contínua e diferenciável para todos os pontos de seu domínio espacial. Para dados de altimetria, por exemplo, pode-se ter discontinuidades na forma de precipícios e, neste caso, é comum utilizar funções lineares ou funções definidas dentro de sub-regiões da área de interesse.

Os modelos podem ser globais ou locais. Os modelos globais são representados por uma função definida utilizando-se todos os elementos do conjunto de amostras. Os modelos locais utilizam funções cujos coeficientes são definidos por elementos amostrais escolhidos dentro de uma região local de interesse. Essas regiões locais podem ser definidas por raios de influência ou por quantidade de amostras vizinhas.

7.4.2 **MODELOS DE GRADE**

Os modelos digitais de terreno mais utilizados na prática são: os modelos de *grade regular retangular* e os modelos de *grade irregular triangular*. O termo **TIN**, iniciais de “Triangular Irregular Network”, é o mais usado para se referir ao modelo de grade irregular triangular.

O processo de geração de um modelo de grade compreende a construção de uma malha, regular ou irregular, e a definição de funções interpolantes locais. Essas funções são definidas para cada elemento da malha. Assim para cada elemento básico da grade, retângulo ou triângulo, define-se uma função interpolante que é válida para os pontos internos ao elemento. Esse processo é conhecido como *ajuste de superfície*. Cada função de ajuste, geralmente um polinômio, é definida utilizando-se os vértices dos elementos e em muitos casos os vértices dos elementos vizinhos também. Segue uma abordagem mais abrangente com relação aos modelos de grade retangular e triangular.

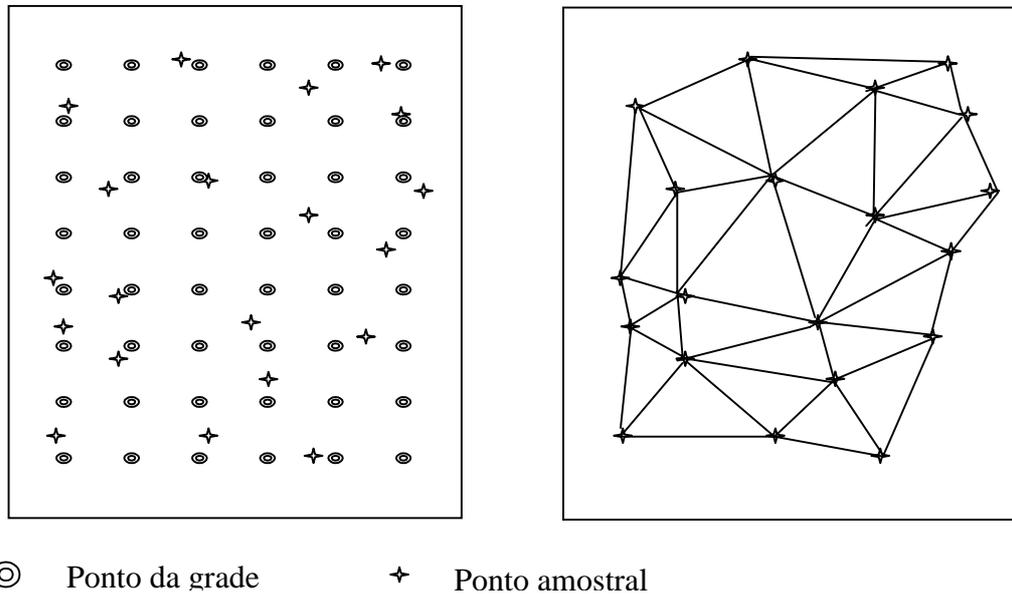


Figura 7.5 - Modelo de grade regular retangular (a esquerda) e modelo de grade irregular triangular(a direita).

7.5 MODELOS DE GRADE REGULAR

7.5.1 INTRODUÇÃO

Uma grade regular retangular é um poliedro de faces retangulares. O processo de geração de uma grade regular consiste em estimar os valores de cota de cada ponto da grade a partir do conjunto de amostras de entrada. Quando se faz uso de todas as amostras para interpolar cada ponto da grade diz-se que a interpolação é *global*. Em geral o conjunto de amostras pode ser muito grande e não homogêneo tornando a interpolação global pouco apropriada em relação ao tempo de processamento computacional e precisão do modelo. Por exemplo, para uma grande quantidade de amostras, fica bastante difícil definir-se uma função polinomial capaz de representar satisfatoriamente todas as variações espaciais do fenômeno em estudo. Assim é muito comum utilizar-se *interpolação local* para o cálculo de cota de cada elemento da grade. Neste caso, o valor de cota de cada elemento da grade é estimado a partir de uma quantidade preestabelecida de amostras vizinhas mais próximas do elemento.

Um modelo de grade regular retangular pode ser gerado a partir de um conjunto de amostras regularmente espaçadas ou a partir de um conjunto de amostras irregularmente espaçadas. O processo de geração de uma grade regular

retangular a partir de outra grade também regular retangular, objetivando uma melhora na resolução da grade, é conhecido como *refinamento da grade* e será abordado com mais detalhes a posteriori.

Para se gerar grades regulares retangulares a partir de amostras irregularmente espaçadas é comum definir-se funções interpolantes simples (por exemplo: médias ponderadas, splines, etc...) e utilizá-las localmente. É importante notar que a estimativa da cota z de cada ponto da grade é realizada a partir de amostras vizinhas locais mas uma análise global das amostras é sempre necessária para se encontrar essa vizinhança.

7.5.2 INTERPOLADORES PARA GERAÇÃO DE GRADE REGULAR

7.5.2.1 Interpoladores de tendência

Os interpoladores de tendência representam as variações do fenômeno estudado a partir de regressões polinomiais. A idéia é ajustar uma superfície polinomial sobre todos os dados amostrais minimizando-se o erro de ajuste global. Geralmente utiliza-se uma minimização do erro médio quadrático. A figura abaixo ilustra esse conceito para o caso de ajuste de curvas.

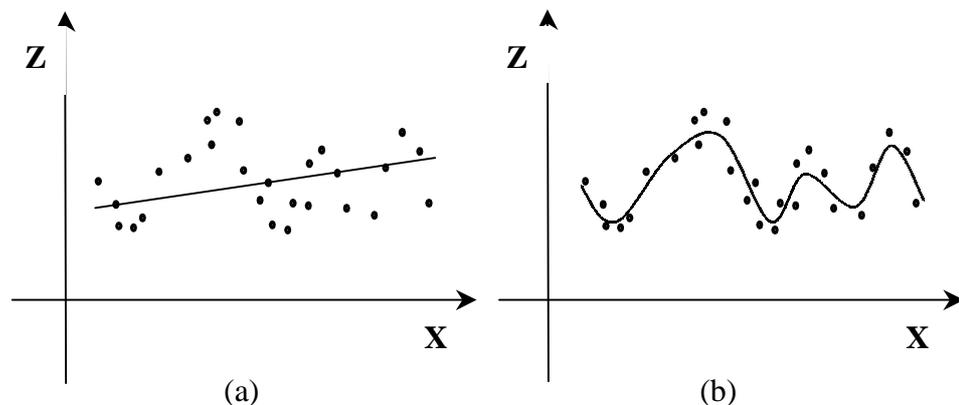


Figura 7.6 - Curva polinomial ajustada para representar a variação de um conjunto de amostra: (a) linear e (b) ordem maior

Os polinômios, em 2 dimensões, tem a forma:

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \sum_{r+s \leq p} \mathbf{c}_{rs} \cdot \mathbf{X}^r \cdot \mathbf{Y}^s$$

Os coeficientes c_{rs} do polinômio são determinados a fim de minimizar o erro quadrático médio, ou seja:

$$\sum_{i=1}^n \{ \mathbf{Z}(\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i) - \mathbf{f}(\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i) \}^2$$

Superfícies de tendência são funções suaves e raramente passam sobre as amostras a menos que elas sejam poucas e a ordem da superfície seja alta. Pouco usada para modelagem digital sempre que a quantidade de amostras é grande.

7.5.2.2 Media Móvel

A média das cotas das amostras vizinhas, também conhecido como média móvel, é um dos esquemas de interpolação mais simples para estimação dos valores de cota dos pontos de uma grade regular retangular.

A formulação geral para este tipo de interpolação é:

$$\mathbf{z}_i = \frac{\sum_{j=1}^n \mathbf{w}_{ij} \mathbf{z}_{ij}}{\sum_{j=1}^n \mathbf{w}_{ij}}$$

Sendo que:

- \mathbf{z}_i é o valor de cota de um ponto i qualquer da grade;
- \mathbf{z}_j é a cota de uma amostra j vizinha do ponto i da grade e;
- \mathbf{w}_{ij} é um fator de ponderação.

Variações desse esquema básico são: interpolador por vizinho mais próximo; interpolador por média simples; interpolador por média ponderada; interpolador por média ponderada por quadrante e; interpolador por média ponderada por quadrante e por cota.

A *interpolação por vizinho mais próximo* é definida pela escolha de apenas uma amostra vizinha para cada ponto da grade, ou seja, quando j igual a 1.

A *interpolação por média simples* considera o valor de cota z do elemento da grade igual a média aritmética dos valores de cota das amostras vizinhas. Neste caso considera-se que o fator de ponderação w_{ij} é igual a 1 para qualquer amostra vizinha.

Na *interpolação por média ponderada* o valor de cota de cada elemento da grade é definido pela média ponderada dos valores de cota das amostras vizinhas. A ponderação mais usada na prática é o inverso da distância euclidiana do ponto da grade à amostra considerada ou seja:

$$w_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^k}$$

Sendo que:

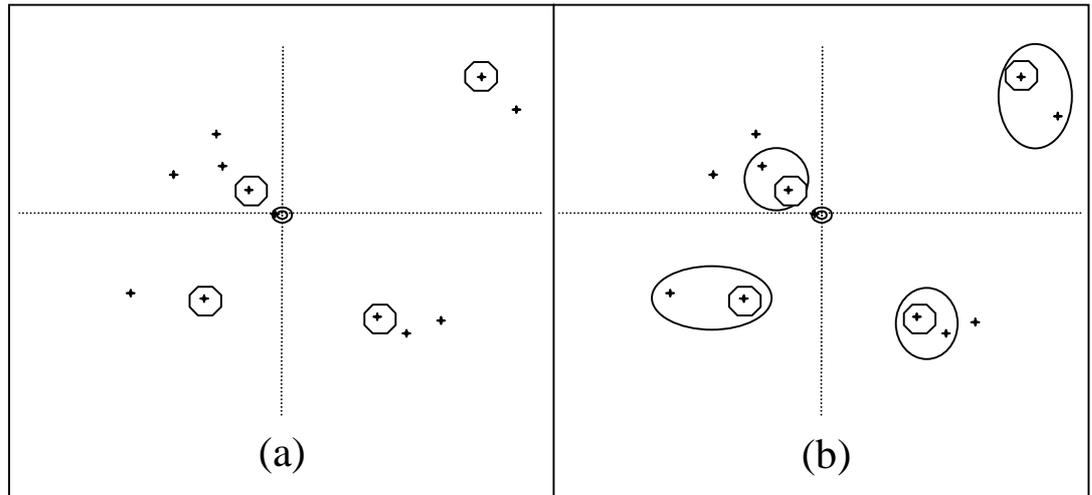
- k é o expoente da distância, geralmente igual a 1 ou 2 e;
- d_{ij} é o valor de distância da amostra j ao ponto i da grade.

É intuitivo considerar-se que: quanto mais distante, uma amostra se encontra

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

do ponto da grade, menor deve ser a sua influência (peso) no cômputo final do valor de cota do ponto da grade.

A *interpolação por média ponderada por quadrante* inclui, além da ponderação, uma escolha das posições relativas das amostras que entram na estimativa do valor de cota da grade. Neste caso a idéia, como apresenta a figura abaixo, é dividir o espaço de projeção, xy , em 4 quadrantes, tendo como referência o ponto da grade e considerando uma quantidade fixa de amostras por quadrante. Assim pode-se utilizar, por exemplo, 1 amostra por quadrante num total de 4, ou então, 2 amostras por quadrante num total de 8, e assim por diante. Esta interpolação garante que a estimativa da cota final do ponto da grade utiliza amostras representativas de cada uma das 4 regiões definidas pelos quadrantes.



⊙ Ponto da grade + Ponto amostral ⊕ Amostra

Figura 7.7 - Seleção das amostras considerando suas posições relativas (a) 1 amostra por quadrante e (b) 2 amostras por quadrante

O interpolador por média ponderada por quadrante e por cota considera, além da ponderação e dos quadrantes, o valor de cota de cada amostra a ser usada na estimativa do ponto da grade. Alguns dados amostrais, como curvas de nível por exemplo, podem apresentar uma quantidade exagerada de pontos, que tem a mesma cota, para representar uma linha de contorno. O efeito final deste tipo de amostragem pode ser um modelo cheio de patamares centrados nessas curvas. Nesse caso é útil aplicar-se uma filtragem por cotas, uma amostra por cota por exemplo, das amostras que devem ser consideradas na estimativa final da cota de cada ponto da grade. A figura abaixo ilustra essa idéia.

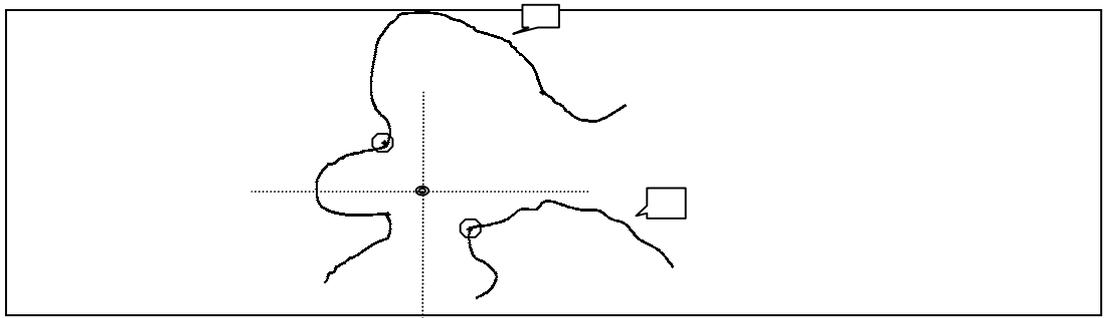


Figura 7.8 - Seleção das amostras considerando-se a posição relativa por quadrante e os valores de cota das amostras.

⊙ Ponto da grade + Ponto amostral ⊕ Amostra vizinha

7.5.3 SUPERFÍCIES DE AJUSTE PARA GRADE REGULAR

Após a estimação dos vértices de uma grade regular é necessário definir-se superfícies de ajuste que determinam o comportamento do fenômeno modelado dentro de cada retângulo do modelo. As superfícies de ajuste são utilizadas para se determinar o valor do fenômeno para pontos dentro da região de interesse que não fazem parte do modelo. A seguir descreve-se o processo de refinamento de uma grade regular utilizando superfícies de ajustes.

Quando as amostras já estão no formato de grade regular retangular o trabalho de geração de uma nova grade é bastante simplificado pelo fato de existir um relacionamento topológico preestabelecido entre as amostras. Esse processamento é usado, em geral, para mudar a resolução de uma grade regular preexistente. Quando a grade regular derivada é mais densa do que a grade original diz-se que houve um refinamento da grade. Felgueiras (1989) apresenta uma metodologia para refinamento de grades regulares usando interpoladores bilinear e bicúbico. A figura abaixo esquematiza uma forma eficiente de se calcular o valor de cota de um ponto P utilizando uma interpolação bilinear. A partir das cotas dos pontos A e B da célula da grade, que contem o ponto P, pode-se estimar o valor de cota do ponto M com uma interpolação linear. De forma análoga pode-se estimar o valor de N a partir dos pontos C e D. Finalmente, a partir de M e N pode-se estimar o valor de P.

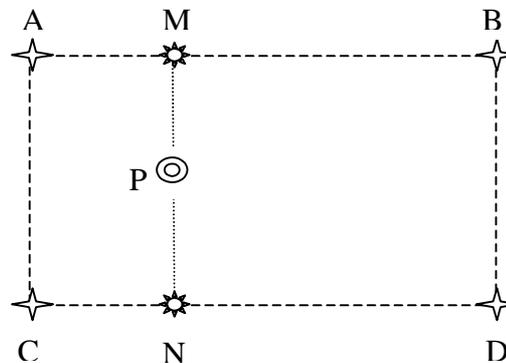


Figura 7.9 - Estimação da cota do ponto P com interpolação bilinear

Um esquema análogo à interpolação bilinear pode ser utilizado para implementar uma interpolação bicúbica. Neste caso deve-se usar a célula que contém o ponto P, suas células vizinhas e um interpolador cúbico.

7.5.4 ESTIMATIVA E INCERTEZA

Incerteza expressa noção de credibilidade, confiança e acurácia (“reliability”, “confidence”, “accuracy”). Espera-se que a estimativa seja próxima do valor real, porém, seja qual for o método escolhido, sempre existirá algum erro. Embora não seja possível calcular o erro exatamente espera-se poder atribuir a ele uma incerteza, ou seja, alguma indicação de sua possível magnitude. Antes de se estimar a incerteza de uma estimativa é importante listar os principais *fatores que influenciam o erro*:

1. Número de amostras vizinhas.
2. Proximidade das amostras.
3. Distribuição espacial das amostras.
4. Natureza do fenômeno.

Quanto a distribuição espacial das amostras há que se considerar efeitos de agrupamentos de amostras (“clusters”), quadrantes, octantes e amostragem por curvas de nível. A natureza do fenômeno está relacionada a continuidade da variável espacial modelada. Para uma variável suave e bem comportada as estimativas serão mais confiáveis do que para uma variável muito errática. É comum a utilização do semivariograma para se definir um padrão para a continuidade do fenômeno.

7.6 MODELOS DE GRADE IRREGULAR

7.6.1 INTRODUÇÃO

Uma grade irregular triangular é um poliedro de faces triangulares. Em um modelo de grade irregular triangular os pontos amostras são conectados por linhas para formar triângulos. Assim, diferentemente da geração de grade regular, os valores de cota dos vértices dos elementos triangulares da malha triangular não precisam ser estimados por interpolações. É muito simples mostrar que, dado um conjunto de amostras com cardinalidade maior do que 4, podemos construir mais de uma malha triangular sobre esse conjuntos. Na figura abaixo temos duas triangulações diferentes criadas sobre o mesmo conjunto de 4 amostras.

7.6.2 A TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY

Adotando-se critérios específicos para construção da rede triangular pode-se chegar a malhas únicas sobre o mesmo conjunto de amostras. Uma dessas malhas, muito utilizada na prática nos SIGs atualmente em uso profissional ou científico, é a malha de Delaunay, mais conhecida como *triangulação de Delaunay*. O critério utilizado na triangulação de Delaunay é o de *maximização dos ângulos mínimos* de cada triângulo. Isto é equivalente a dizer que, a malha final, deve conter triângulos o mais próximo de equiláteros possível evitando-se a criação de triângulos afinados, ou seja, triângulos com ângulos internos muito agudos. Uma forma equivalente de se implementar a triangulação de Delaunay utiliza o critério do circuncírculo. Esse critério, esquematizado na figura abaixo, diz que uma triangulação é de Delaunay se: O círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não contém, no seu interior, nenhum ponto do conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão.

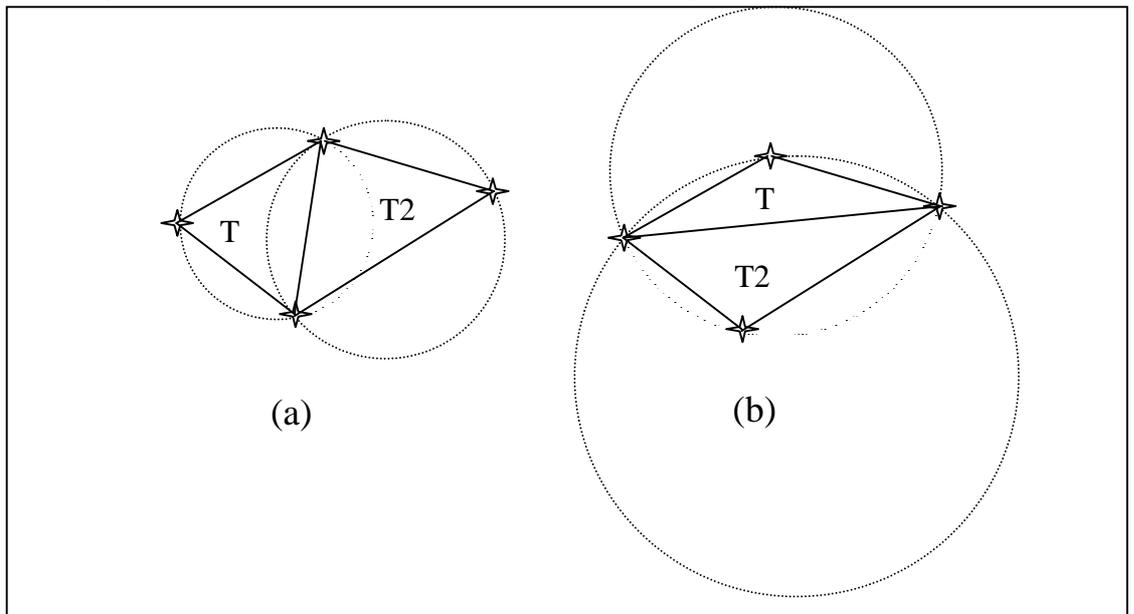


Figura 7.10 - Critério do circuncírculo para geração de triangulações de Delaunay: (a) T1 e T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay

Existem vários métodos de implementação da triangulação de Delaunay. Esses métodos podem ser classificados em dois tipos básicos: algoritmo de passo único e algoritmo de dois passos. Os algoritmos de passo único criam a triangulação de Delaunay num único etapa, aplicando o critério de Delaunay durante a construção da triangulação. Os métodos de dois passos geram uma triangulação inicial qualquer e numa segunda etapa transformam-na numa triangulação de Delaunay.

7.6.3 INCLUSÃO DE RESTRIÇÕES NO MODELO

Na construção de um modelo é muito importante que as características topográficas da superfície sejam preservadas. Assim é interessante que o conjunto de amostras de entrada contenha as *linhas características* da superfície tais como: linhas divisoras de águas (linhas de máximos) e linhas de drenagem (linhas de mínimos). O estrutura do modelo de grade triangular é mais propícia para a inclusão de linhas características no modelo.

Uma *triangulação de Delaunay com restrições* é uma triangulação que deve considerar primeiro as características topográficas da superfície e depois o critério do circuncírculo de Delaunay, conforme Felgueiras (1995).

Uma método para se gerar uma triangulação de Delaunay com restrições pode: criar uma triangulação de Delaunay pura e depois transformar essa triangulação considerando as linhas características do modelo. As figuras abaixo mostram a transformação de dois triângulos de Delaunay, T1 e T2, para triângulos que não são de Delaunay. Na primeira figura a mudança se faz necessária a fim de evitar a criação de patamares, ou seja, triângulos cujos vértices são todos da mesma isolinha. Na segunda a mudança garante a manutenção das características topográficas da superfície.

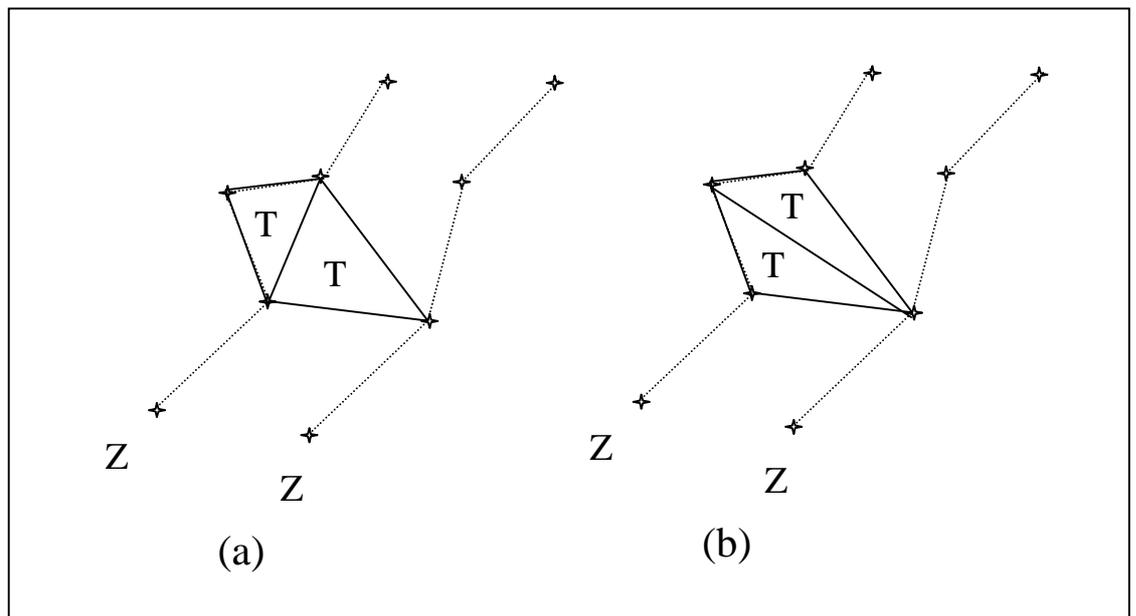


Figura 7.11 - Evitando problema de criação de patamares: (a) Triangulação de Delaunay e (b) Triangulação com restrição

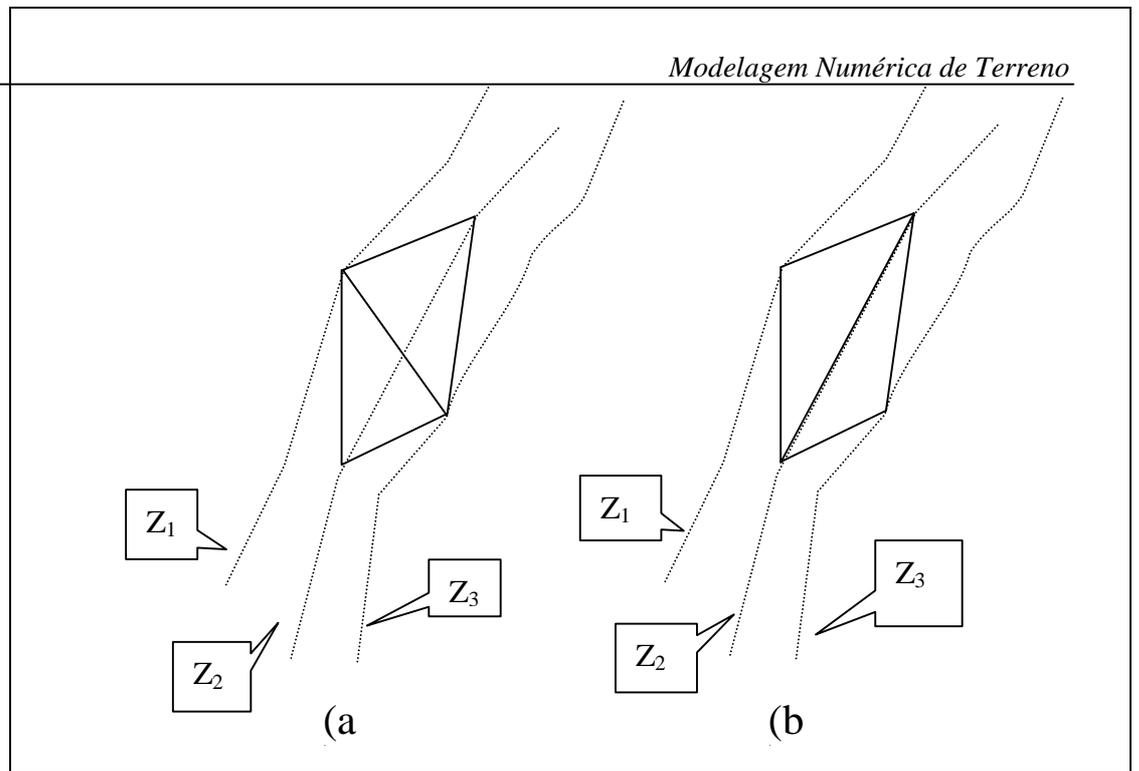


Figura 7.12 - Transformação da triangulação de Delaunay, de (a) para (b), para manter as características topográficas da superfície

7.6.4 SUPERFÍCIES DE AJUSTE PARA GRADES IRREGULARES

7.6.4.1 Ajuste Linear

Considerando-se um comportamento linear dentro de cada triângulo pode-se estimar, com facilidade, o valor de qualquer ponto da superfície definida pela malha triangular. O esforço computacional, neste caso, é mínimo. Os três pontos dos vértices de cada triângulo definem um plano no espaço tridimensional. A equação do plano:

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

pode ser determinada pelas coordenadas e atributos dos vértices de um triângulo de interesse. Dessa forma, para qualquer ponto a ser estimado deve-se buscar o triângulo que o contém e, através de uma álgebra simples de solução de sistemas lineares, obtém-se facilmente o valor de cota desse ponto. Este ajuste é conhecido como *ajuste linear* sobre a malha triangular. O ajuste linear garante continuidade entre as superfícies de triângulos vizinhos mas não garante uma suavidade na transição entre as superfícies.

7.6.4.2 Ajuste Quíntico

Outro modelo mais complexo, proposto por Akima em 1978, sugere o ajuste de uma superfície polinomial de quinta ordem incompleta para cada triângulo da malha triangular:

$$z(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^{5-i} \mathbf{q}_{ij} \mathbf{x}^i \mathbf{y}^j$$

Esse polinômio de quinta ordem incompleto possui 21 coeficientes a ser determinado para definição de uma superfície quántica sobre o triângulo. Os 21 coeficientes são obtidos considerando-se: os valor de cota em cada vértice do triângulo (3 valores); as derivadas parciais de primeira ordem nas direções x (3 valores) e y (3 valores) e; as derivadas parciais de segunda ordem nas direções x (3 valores), y (3 valores) e xy (3 valores). Akima sugere considerar-se as derivadas parciais de segunda ordem na direção xy igual as da direção yx. As três ultimas condições são obtidas a partir das derivadas parciais nas direções perpendiculares de cada aresta dos vizinhos do triângulo.

7.6.4.3 Ajuste Estocástico

Fournier (1982) descreve uma metodologia de ajuste de superfícies por interpoladores estocásticos válida para modelos de grade triangular. A idéia principal contida nesse método estocástico é simular a natureza fractal das informações de presentes em fenômenos geográficos como o relevo, Goodchild (1987).

7.7 GRADE RETANGULAR X GRADE TRIANGULAR

7.7.1 GRADE RETANGULAR A PARTIR DE GRADE TRIANGULAR

A partir de um modelo de grade triangular é possível criar-se um modelo de grade retangular. Para isto, inicialmente é necessária a definição dos parâmetros que definem a grade regular, ou seja, referência geográfica, resoluções espacial e tamanho da grade em número de linhas e colunas. A partir dessa definição deve-se calcular o valor de cota de cada elemento da grade. Esse valor é obtido encontrando-se o triângulo que contém o ponto da grade regular. Utilizando-se os valores de cota dos vértices desse triângulo e, opcionalmente, dos vértices de seus triângulos vizinhos pode-se estimar o valor de cota do ponto da grade regular. Essa estimativa pode usar uma interpolação linear ou uma interpolação polinomial de grau maior do que 1. Usando-se apenas os 3 vértices de um triângulo pode-se definir o plano que passa por esses 3 pontos. Dessa forma pode-se estimar o valor de cota de qualquer ponto interno a um triângulo do modelo irregular. Para se ajustar superfícies não lineares para cada triângulo deve-se utilizar os vértices do triângulo e dos seus vizinhos. Quando um ponto da grade regular não está localizado dentro de nenhum triângulo então pode-se marcá-lo como “*sem valor*”. A transformação de um modelo de grade triangular em retangular é útil quando se quer visualizar o modelo em projeção planar a partir de uma grade regular e o único modelo que se dispõe é o de grade triangular. O processo de visualização do MDT em projeção planar fornece um resultado mais realista quando se usa o modelo de grade regular ao invés da grade irregular.

7.7.2 GRADE TRIANGULAR A PARTIR DE GRADE RETANGULAR

Muitas vezes o usuário já tem um modelo de grade regular que foi gerado anteriormente ou importado de outro sistema. A partir desse modelo de grade regular, pode-se aplicar um método de redução de amostras sobre a grade criando-se um conjunto de amostras irregularmente espaçadas. Essas amostras são então utilizadas na geração do modelo de grade triangular. A transformação de grade retangular para grade triangular pode ser necessário caso existam algoritmos de análise no SIG que só trabalham sobre grades triangulares. Um exemplo típico acontece quando o SIG só consegue extrair linhas de contornos de grades triangulares.

7.7.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE GRADE

A tabela abaixo apresenta as principais diferenças entre os modelos de grade retangular e de grade irregular triangular.

<i>Grade Regular Retangular</i>	<i>Grade Irregular Triangular</i>
Apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo	Não apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo
Os vértices dos retângulos são estimados a partir das amostras	Os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto amostral
Apresenta problemas para representar superfícies com variações locais acentuadas	Representa melhor superfícies não homogêneas com variações locais acentuadas
Estrutura de dados mais simples	Estrutura de dados mais complexa
Relações topológicas entre os retângulos são explícitas	É necessário identificar e armazenar as relações topológicas entre os triângulos
Mais utilizado em aplicações qualitativas e para análises multiníveis no formato “raster”	Mais utilizado em aplicações quantitativas.

Tabela 7.1 - Comparação entre os modelos de grade retangular e triangular.

7.8 ANÁLISES SOBRE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO

7.8.1 INTRODUÇÃO

Como já descrito anteriormente, as *amostras* são processadas de forma a criar *modelos digitais* que vão representar a variabilidade do fenômeno nessa região. Os modelos digitais são utilizados por uma série de *procedimentos de análises* úteis para aplicações de geoprocessamento. A utilização dos modelos digitais, pelas análises, possibilita o estudo de um determinado fenômeno sem a necessidade de se trabalhar diretamente na região geográfica escolhida. As análises podem ser qualitativas ou quantitativas e são importantes para fins de simulações e tomadas de decisão no contexto de desenvolvimento de aplicações, ou modelagens, de geoprocessamento que utilizam SIGs.

As análises desenvolvidas sobre um modelo digital de terreno permitem: visualizar o modelo em projeção geométrica planar; gerar imagens de nível de cinza, imagens sombreadas e imagens temáticas; calcular volumes de aterro e corte; realizar análises de perfis sobre trajetórias predeterminadas e; gerar mapeamentos derivados tais como mapas de declividade e exposição, mapas de drenagem, mapas de curva de nível e mapas de visibilidade. Os produtos das análises podem, ainda, serem integrados com outros tipos de dados geográficos objetivando o desenvolvimento de diversas aplicações de geoprocessamento, tais como, planejamento urbano e rural, análises de aptidão agrícola, determinação de áreas de riscos, geração de relatórios de impacto ambiental e outros.

Esta seção apresenta uma visão geral dos processamentos de análises que podem fazer parte de um sistema de modelagem digital de terreno desenvolvido no ambiente de um SIG. O objetivo é descrever os procedimentos de análises que mais comumente são realizados sobre os modelos digitais de terreno. O texto inclui: aspectos teóricos e alguns detalhes de implementação computacional de cada procedimento de análise, exemplos de aplicação e ilustrações.

7.8.2 GERAÇÃO DE IMAGENS DE MDTs

A partir de um MDT pode-se criar imagens em níveis de cinza e imagens sombreadas. Na sequência apresentam-se mais detalhes sobre estas análises.

7.8.2.1 Imagem MDT em níveis de cinza

Essa imagem é gerada diretamente do mapeamento dos valores de cota do modelo para valores de nível de cinza. Supondo-se que cada pixel da imagem de nível de cinza é representada por 8 bits pode-se mapear os valores de cota para valores de nível de cinza de 0 a 255. A figura abaixo ilustra o mapeamento de um valor de cota Z_i para um valor de nível de cinza NC_i ;

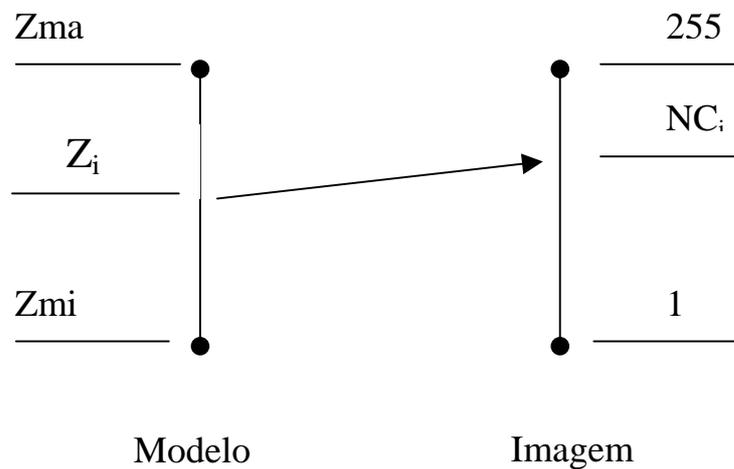


Figura 7.13 - Mapeamento dos valores de cota para níveis de cinza

Considerando-se um mapeamento linear dos valores de cota do modelo para valores de níveis de cinza, quantização linear, pode-se calcular o valor NC_i em função de Z_i pelo seguinte equacionamento:

$$NC_i = \{[(Z_i - Z_{\min}) * 254] / (Z_{\max} - Z_{\min})\} + 1$$

Esse equacionamento mapeia os valores de cota do fenômeno representado para valores de 1 a 255 da imagem. O valor de nível de cinza igual a 0 é usado em áreas onde *não existe* definição do valor de cota para o modelo.

A figura abaixo mostra uma imagem em nível de cinza obtida a partir de um modelo digital de terreno. Essa imagem é muito útil para se obter uma

percepção qualitativa global da variação do fenômeno representado pelo modelo digital de terreno.

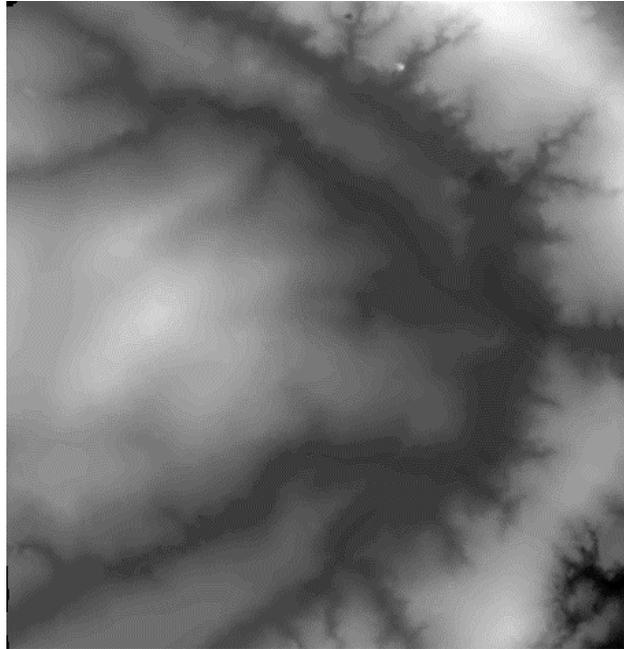


Figura 7.14 - Modelo de grade regular representado como uma imagem em níveis de cinza

7.8.2.2 Imagem de MDT sombreada

Uma imagem de MDT sombreada é gerada a partir do modelo e do posicionamento, em relação à superfície, de uma fonte de iluminação local. Assim, para cada ponto do modelo pode-se definir um vetor normal a superfície \mathbf{N} e um vetor de iluminação \mathbf{I} que parte do ponto da superfície e aponta para a fonte de iluminação. A partir desses dois valores pode-se calcular um valor de intensidade de iluminação utilizando-se, por exemplo, o seguinte modelo de iluminação de reflexão difusa:

$$NC_i = I_a + I_l * K_d * (\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{L}_i) = I_a + I_l * K_d * \cos \theta$$

Esse modelo estabelece que o nível de cinza da imagem sombreada NC_i , na posição i da superfície, é igual a uma intensidade constante de iluminação ambiente I_a somado a uma componente de iluminação local. Essa componente local depende da intensidade da fonte luminosa I_l , de uma constante de reflexão difusa K_d e do ângulo θ formado entre o vetor unitário normal \mathbf{N} e o vetor unitário de iluminação \mathbf{I} na posição i da superfície. A figura abaixo ilustra esses conceitos.

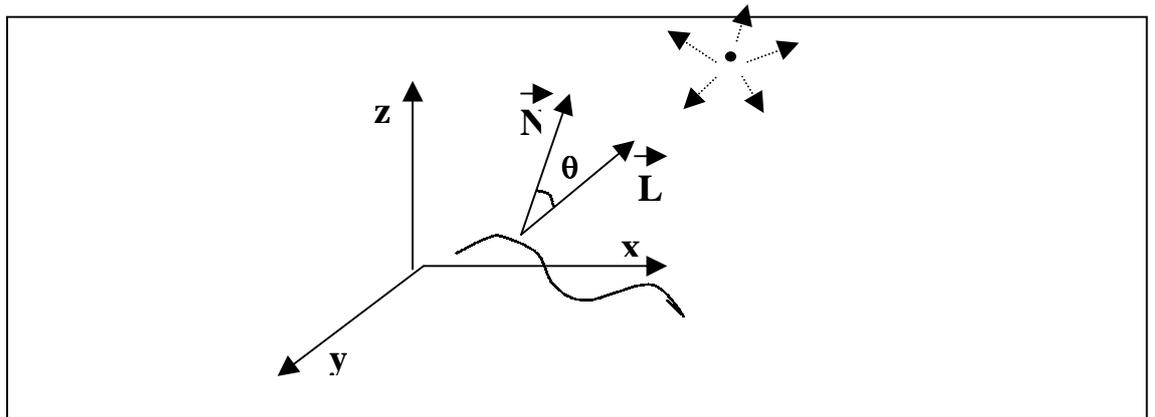


Figura 7.15 - Componentes do modelo de iluminação de uma superfície por reflexão difusa

O modelo de reflexão difusa, ou modelo lambertiano, é um dos mais simples de ser implementado computacionalmente. Outros modelos mais complexos podem ser utilizados quando se deseja um efeito de sombreamento mais realista. A imagem sombreada é muito útil como imagem de textura para compor uma projeção geométrica planar utilizando-se o modelo digital de terreno. A figura abaixo mostra uma imagem sombreada gerada a partir de um modelo numérico de terreno.

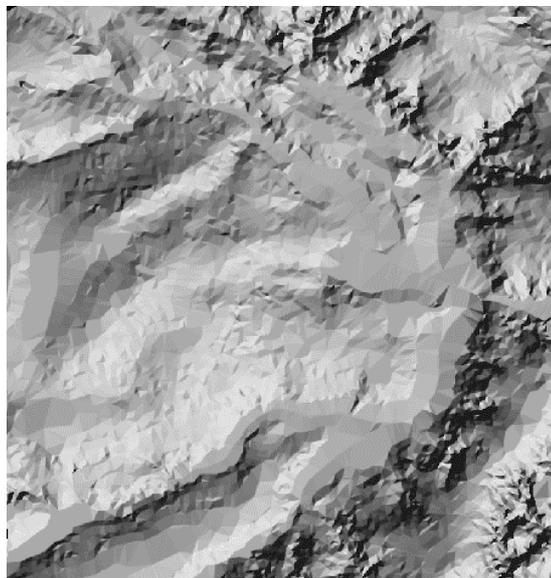


Figura 7.16- Modelo de grade regular representado como uma imagem sombreada.

7.8.3 VISUALIZAÇÃO DO MODELO EM PROJEÇÃO PLANAR

O modelo gerado pode ser visualizado em projeção geométrica planar com ou sem informação de textura.

O modelo de grade regular retangular é mais apropriado para efeitos de visualização do modelo em projeção planar. Os tipos de projeção planar mais utilizados são os de projeção paralela e os de projeção perspectiva. Na projeção geométrica planar paralela é necessário definir-se a direção de projeção, azimute e elevação. Pode-se também definir um fator de exagero vertical que será multiplicado pelos valores de cota do terreno para realçar ou amenizar as áreas não homogêneas da superfície. Para projeção perspectiva deve-se definir ainda um centro de projeção que define o ponto de partida, ou de chegada, dos raios de projeção perspectiva. A figura abaixo mostra como um segmento AB, definido no espaço 3D, é projetado num plano de projeção segundo os esquemas de projeção paralela e perspectiva.

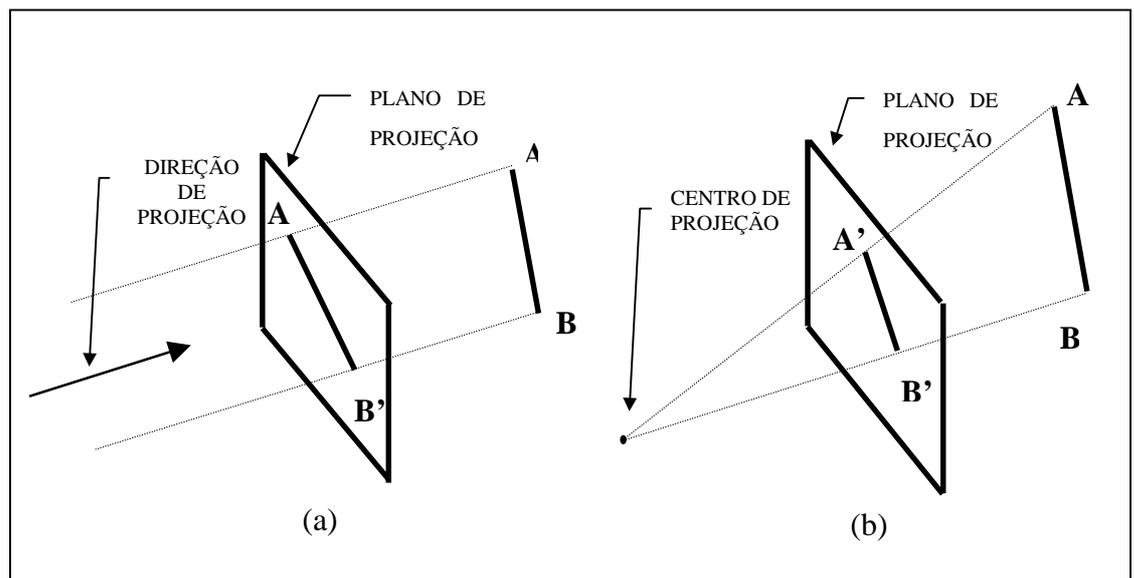


Figura 7.17 - Esquemas de projeção: (a) paralela e (b) perspectiva

7.8.4 VISUALIZAÇÃO DO MODELO SEM INCLUSÃO DE TEXTURA

Para se visualizar o modelo de grade retangular em projeção geométrica planar sem inclusão de textura deve-se considerar que os pontos da grade estão conectados com os seus vizinhos por segmentos de reta. Esses segmentos são projetados em um plano utilizando as equações de projeção paralela ou perspectiva. Além do cálculo dos valores projetados, o algoritmo de projeção geométrica planar deve conter um processamento de escondimento de linhas não

visíveis que depende do tipo e da direção de projeção e da posição do observador em relação à superfície quando a projeção é perspectiva. A figura abaixo mostra o resultado da projeção planar de um MDT retangular.

7.8.5 VISUALIZAÇÃO DO MODELO COM INCLUSÃO DE TEXTURA

O modelo digital de terreno pode ser integrado com uma imagem no processo de projeção perspectiva planar. Em geral, a visualização do modelo projetado num plano, com inclusão de textura, é realizada através de técnicas de projeção planar conhecidas como “*ray-tracing*”. Esta técnica baseia-se no acompanhamento do traçado do raio desde o centro de projeção até ele alcançar elementos da superfície a ser projetada. Nesta técnica pode-se incluir efeitos de reflexão, difusa e especular, e de refração dos raios sobre os elementos da superfície. A figura abaixo ilustra o traçado de um raio que parte de um centro de projeção, passa por um ponto do plano de projeção e alcança diversos elementos pertencentes ao objetos de uma cena. No caso de modelo de grade esses elementos são triângulos ou retângulos que definem o modelo da superfície.

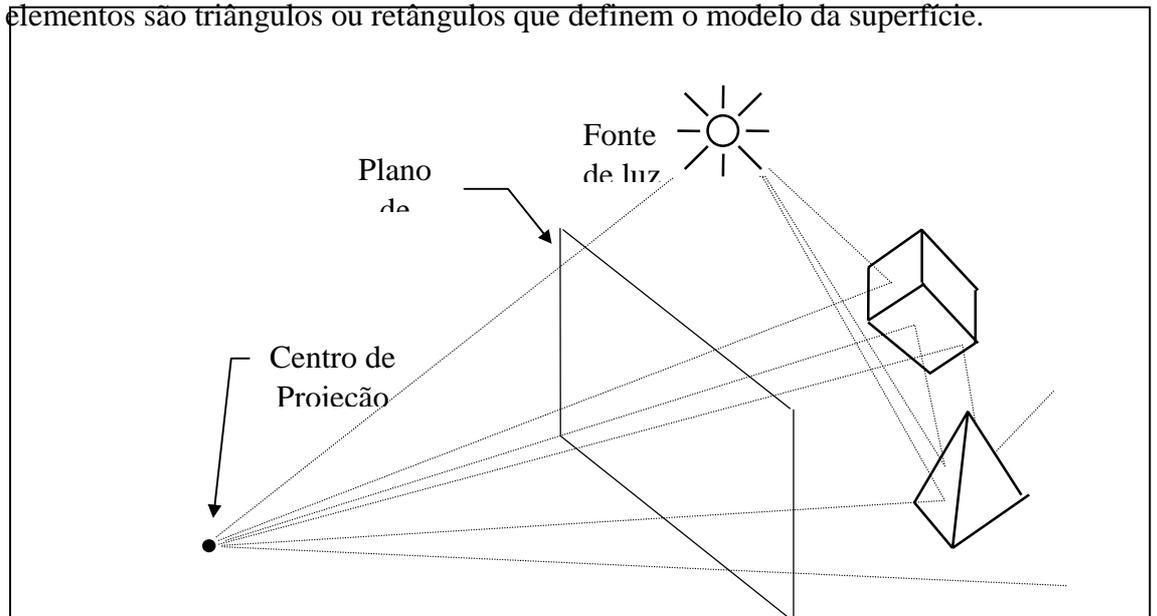


Figura 7.18 - Ilustração da técnica de “ray-tracing”

Na projeção de modelos utiliza-se a técnica de “*ray-tracing*” com *textura externa*. Neste processo o modelo é responsável pela definição da geometria da superfície projetada enquanto que a imagem é usada como dado de textura. A imagem de textura pode ser uma imagem de sensoriamento remoto, de satélite ou de aerolevantamento por exemplo, ou uma imagem artificial como a imagem sombreada gerada sobre o próprio modelo que esta sendo projetado no plano. Através da técnica de “*ray-tracing*” com *textura externa* é possível sintetizar

figuras muito parecidas com a realidade de uma cena. A figura a seguir mostra a projeção geométrica planar de um modelo com uma imagem sombreada dessa superfície.

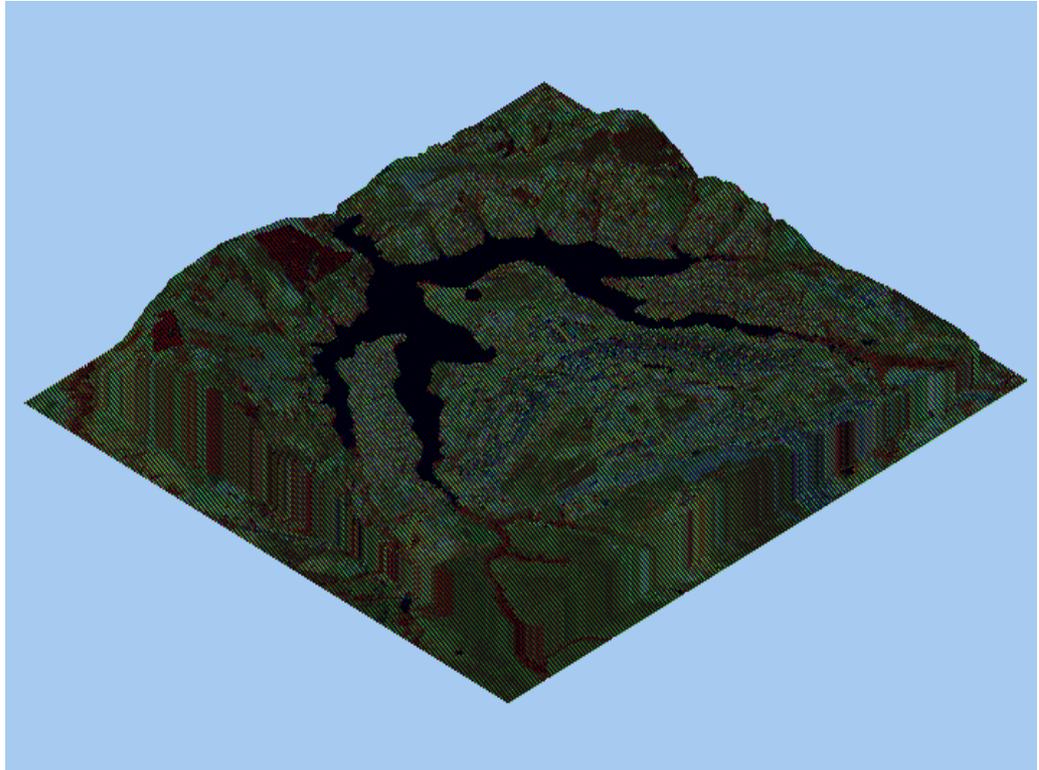


Figura 7.19 -Visualização do modelo em projeção planar com textura de uma composição colorida de 3 bandas de uma imagem LANDSAT

7.8.6 GERAÇÃO DE MAPAS DE CONTORNO

Linhas de contorno são curvas que conectam pontos da superfície com mesmo valor de elevação. As linhas de contorno podem ser determinadas a partir de interseções da superfície com planos horizontais. A projeção dessas interseções, no plano xy, definem as curvas de contorno. Partindo-se do pressuposto que a superfície representada é uma função matemática definida no espaço xy então as linhas de contorno tem a propriedade de nunca se cruzarem.

As linhas de contornos são obtidas a partir de intercessões com as arestas dos elementos básicos, triângulo ou retângulo, do modelo. A figura abaixo ilustra o processo de obtenção de uma linha de contorno a partir do modelo.

Existem, basicamente, 2 métodos de geração de mapas de contornos a partir do modelo de grade: o método seguidor de linhas e o método de segmentos.

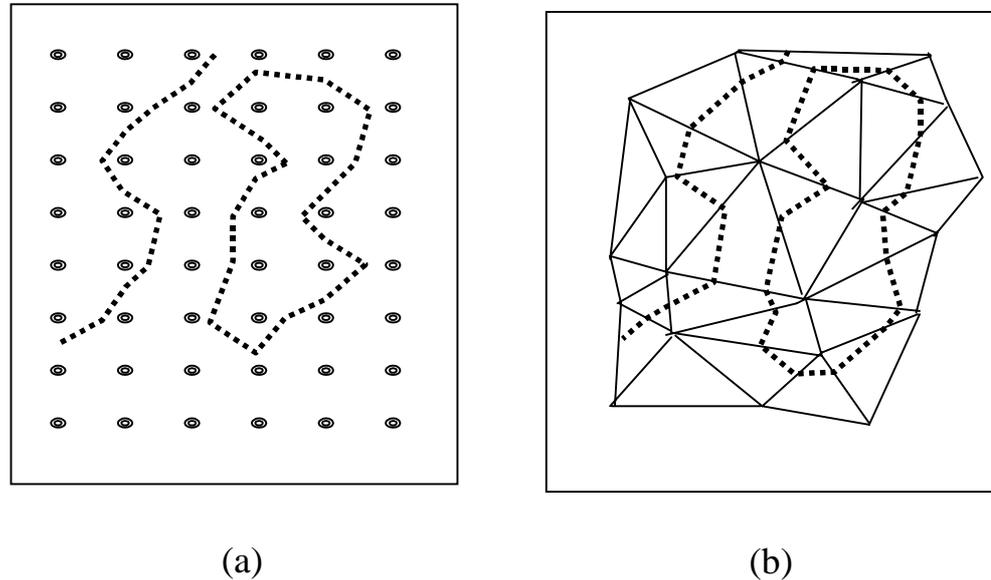


Figura 7.20 -Geração de uma curva de contorno a partir de um modelo de grade
(a) retangular e (b) triangular

O método *seguidor de linhas* é um método que gera cada linha de contorno em um único passo. Por esse método procura-se um segmento que pertence a uma curva de contorno. Os pontos extremos desse segmento são definidos como extremos da linha de contorno. Em seguida busca-se os outros segmentos que tem ligações com essas extremidades. Os novos segmentos encontrados são incorporados a linha e definem as novas extremidades. O processo pára quando as extremidades se encontram, definindo uma curva de nível fechada, ou quando as duas extremidades já encontraram as bordas da região de interesse.

O método de segmentos cria as curvas de nível em duas etapas. Na primeira etapa determinam-se todos os segmentos pertencentes a uma valor de cota predeterminado. Numa Segunda etapa é necessário conectar esses segmentos a fim de se definir as curvas de nível que pertencem ao valor de cota preestabelecido.

Esses processos de geração de mapa de contornos é automático e necessita apenas da definição do modelo e das curvas a serem geradas. Essas curvas podem ser definidas individualmente ou com espaçamento constante.

7.8.7 GERAÇÃO DE MAPAS DE DECLIVIDADE E EXPOSIÇÃO

A declividade em uma posição da superfície é definida por um plano tangente a aquela posição da superfície modelada pelo MDT. A declividade é composta por duas componentes: o *gradiente*, as vezes também chamado de *declividade*, que é a máxima razão de variação de cota z e; a *exposição* que é a direção dessa máxima razão de variação de cota. Neste texto usar-se-á os termos declividade e exposição para essas componentes. A declividade pode ser expressa em graus (0 a 90) ou em porcentagem enquanto que a exposição é expressa em graus (0 a 360). As formulações gerais para o cálculo da *declividade* **D** e *exposição* **E** são dadas a seguir.

$$D = \arctg \{[(\delta Z/\delta X)^2 + (\delta Z/\delta Y)^2]^{1/2}\}$$

$$E = \arctg [-(\delta Z/\delta Y) / (\delta Z/\delta X)] \quad (-\Pi < E < \Pi)$$

Onde $\delta Z/\delta X$ e $\delta Z/\delta Y$, derivadas parciais nas direções **X** e **Y**, são as componentes do vetor gradiente em uma dada posição. Segundo Burrough, 1986, quando a superfície está sendo representada por um modelo de grade regular retangular o melhor estimador das componentes do vetor gradiente, em uma posição **i,j** do modelo, é avaliado por:

$$[\delta Z/\delta X]_{i,j} = [(Z_{i+1,j+1} + 2*Z_{i+1,j} + Z_{i+1,j-1}) - (Z_{i-1,j+1} + 2*Z_{i-1,j} + Z_{i-1,j-1})]/8*\delta X$$

$$[\delta Z/\delta Y]_{i,j} = [(Z_{i+1,j+1} + 2*Z_{i,j+1} + Z_{i-1,j+1}) - (Z_{i+1,j-1} + 2*Z_{i,j-1} + Z_{i-1,j-1})]/8*\delta Y$$

onde os elementos **Z** estão distribuídos segundo uma vizinhança 8 como mostrado na figura abaixo.

Z_{i-1,j+1}	Z_{i,j+1}	Z_{i+1,j+1}
Z_{i-1,j}	Z_{i,j}	Z_{i-1,j}
Z_{i-1,j-1}	Z_{i,j-1}	Z_{i+1,j-1}

Figura 7.21 - Distribuição dos elementos de uma grade numa vizinhança 8.

Quando a superfície está representada por um modelo de grade triangular deve-se calcular as componentes $\delta Z/\delta X$ e $\delta Z/\delta Y$ a partir da superfície de ajuste utilizada para representar o comportamento do fenômeno dentro do triângulo que contém o ponto definido na posição i,j . Por exemplo, utilizando-se um ajuste linear para cada triângulo pode-se facilmente obter as derivadas parciais $\delta Z/\delta X$ e $\delta Z/\delta Y$ diretamente da equação do plano que passa pelos vértices do triângulo. (Completar com equações)

7.8.8 FATIAMENTO DO MODELO

O fatiamento de um modelo consiste em se definir intervalos, ou fatias, de cotas com a finalidade de se gerar uma imagem temática a partir do modelo. Assim, cada tema, ou classe, da imagem temática é associado a um intervalo de cotas dentro dos valores atribuídos ao fenômeno modelado. O usuário do GIS é responsável pela definição das fatias e também da associação dessas fatias com classes predefinidas no sistema. As fatias são definidas de acordo com intervalos de cotas que são úteis para uma determinada aplicação. A figura abaixo ilustra o processo de fatiamento do modelo.

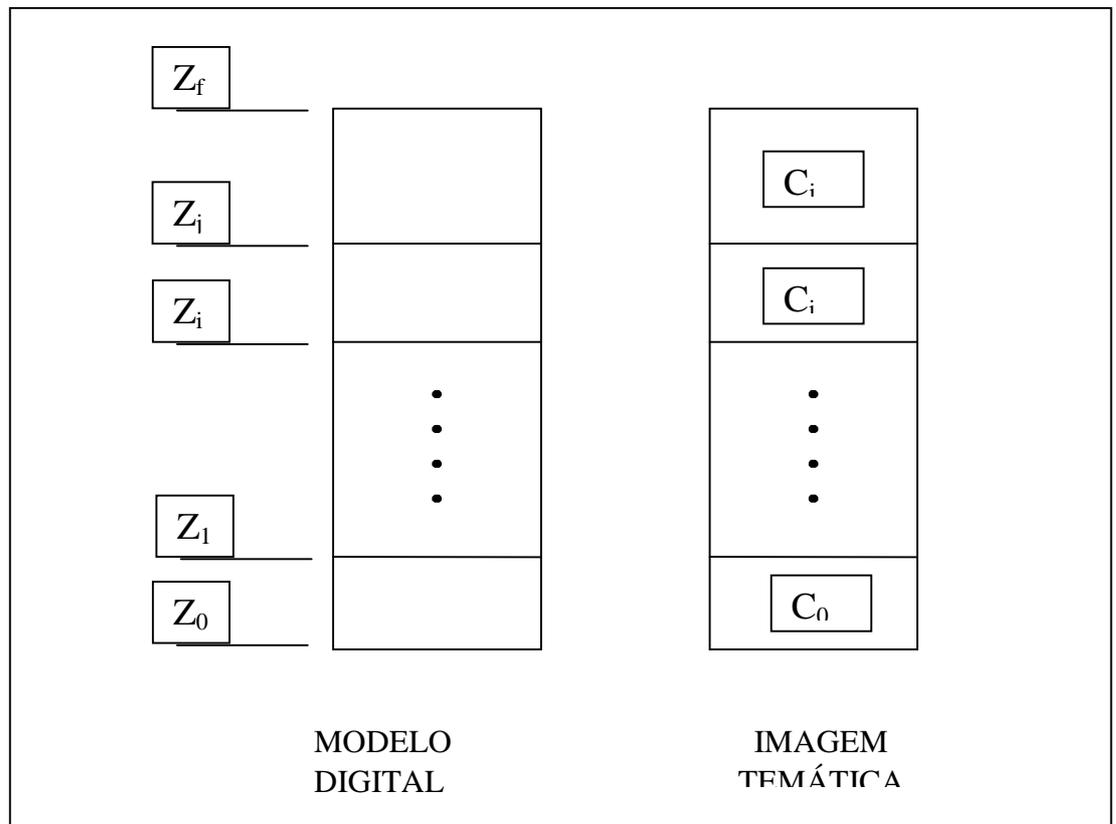


Figura 7.22 - Ilustração do processo de fatiamento do MDT

Da figura acima temos que a classe C_0 está associada ao intervalo de cotas entre Z_0 e Z_1 , a classe Z_i está associada ao intervalo de cotas entre Z_i e Z_j , e assim por diante. Os valores de cota Z_0 e Z_f representam os extremos desse modelo. Quando um intervalo de cota não for associado a nenhuma classe deve-se atribuir o valor de nível de cinza 0 para os pixels da imagem que representam valores de cota nesse intervalo.

A imagem temática gerada pelo fatiamento do modelo é frequentemente usada em análises espaciais como operações lógicas de interseção e união. A figura abaixo mostra uma imagem temática criada a partir de um modelo digital de terreno.

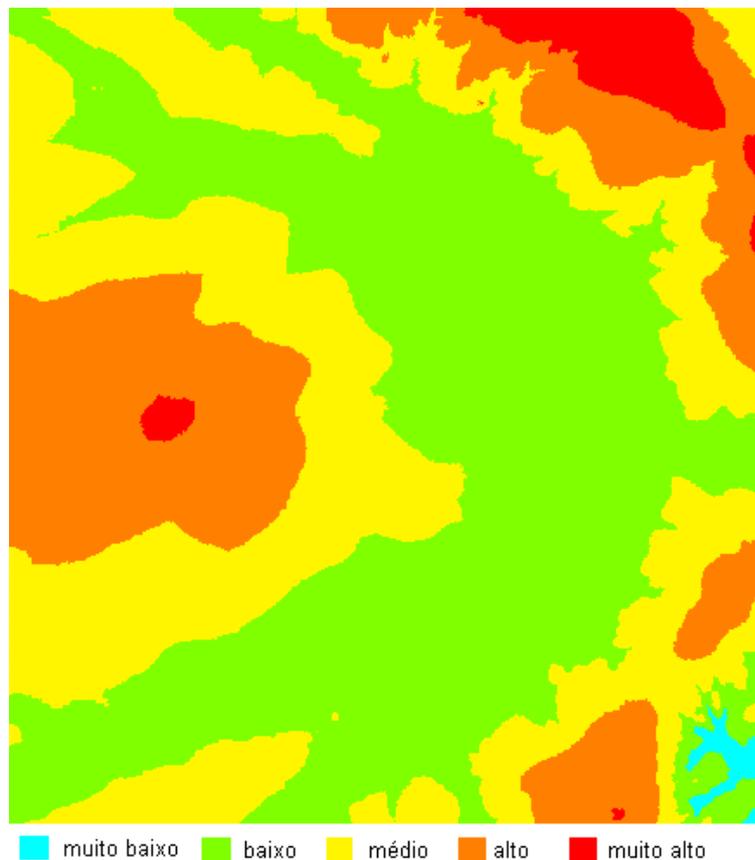


Figura 7.23 - Imagem temática gerada a partir do fatiamento de um modelo digital de terreno.

7.8.9 ANÁLISE DE PERFIS

A partir de um modelo de grade regular ou irregular pode-se criar gráficos de perfis do fenômeno ao longo de uma trajetória. Um gráfico de perfil representa a variação do fenômeno estudado em função da distância planar percorrida numa trajetória predefinida. Os pontos do perfil são determinados pela intersecção da trajetória com as arestas do modelo digital de terreno. Num mesmo gráfico é possível traçar mais de 1 perfil para poder compará-los.

Este tipo de análise sobre o modelo pode ser útil na determinação das melhores trajetórias para a construção de uma estrada por exemplo. Neste caso pode-se estabelecer mais de uma trajetória e analisar os respectivos perfis em termos de distancias percorridas, variação máxima de cota, inclinações máxima e mínima, etc...

Outra aplicação interessante é a determinação de uma distribuição ótima de antenas de transmissão, e ou recepção, de sinais de telecomunicação no sentido de garantir visibilidade entre antenas mais próximas e atender o máximo de usuários com o mínimo de antenas. No contexto de um SIG interativo pode-se utilizar, como “background”, qualquer tipo de dado armazenado na base de dados para apoiar a definição das possíveis trajetórias. A figura abaixo ilustra a criação de 2 perfis a partir de 2 trajetórias.

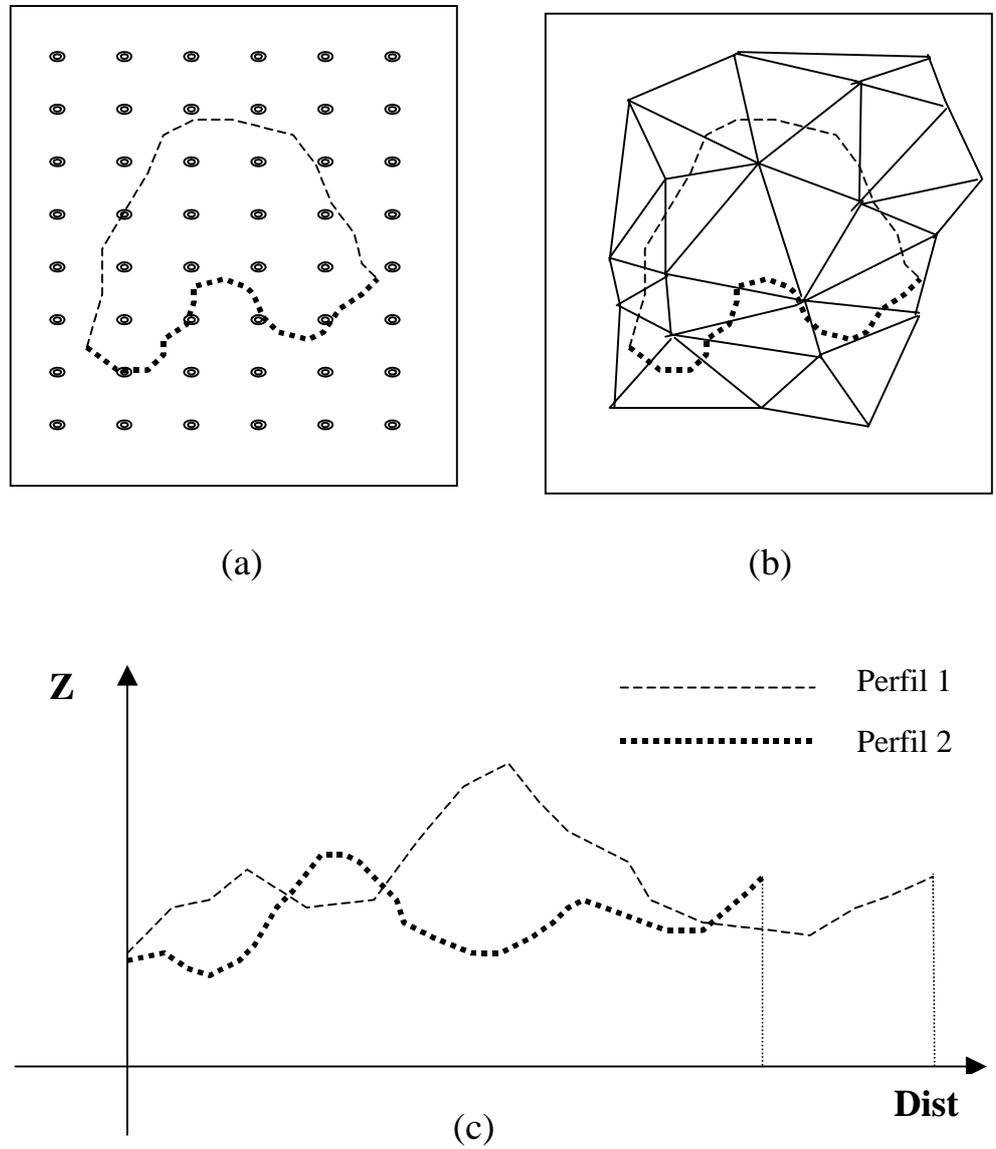


Figura 7.24 - Ilustração da geração de perfis (c) utilizando modelos de grade (a) regular e (b) irregular.

7.8.10 ANÁLISE DE VISIBILIDADE

A análise de visibilidade compreende a criação de um mapa de áreas visíveis em relação à uma ou mais posições do terreno. Esta análise exige que o usuário forneça o modelo a ser usado e determine as posições no terreno. A partir desses dados o aplicativo é capaz de gerar perfis entre qualquer ponto do terreno e as posições predefinidas. Sobre cada perfil o aplicativo faz uma análise de visibilidade verificando se a linha que une os dois extremos do perfil corta alguma linha do perfil. Caso o perfil não seja cortado então o ponto do terreno é visível em relação a essa posição. Caso contrário o ponto é marcado como não visível. A figura abaixo ilustra a análise de visibilidade entre os extremos de um perfil do terreno.

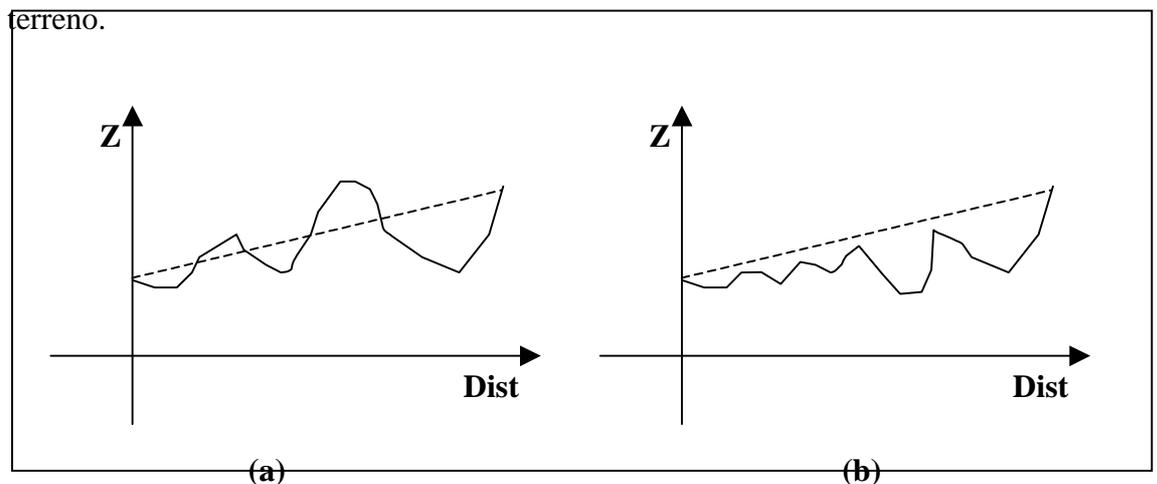
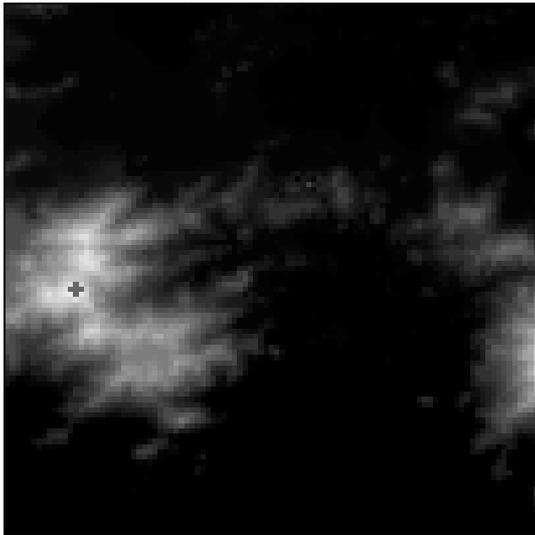


Figura 7.25 - Análise de visibilidade entre extremos de um perfil: (a) extremos não visíveis e (b) extremos visíveis.

Esse tipo de análise tem aplicações interessantes na área de telecomunicações. Pode-se, por exemplo, definir-se áreas de visibilidade para fins de telefonia celular. Nessa aplicação é importante o estudo das áreas de influência de uma ou mais antenas e áreas de superposição entre 2 ou mais antenas. Melhorias nesse tipo de aplicação pode incluir a altura da antena, a potência de transmissão/recepção que define um raio máximo de influencia e a confecção de um relatório com dados de áreas atendidas, áreas de superposição e áreas não atendidas.

O mapa de visibilidade pode ser representado por uma imagem binária onde os pontos não visíveis são codificados com valor 0 e os pontos visíveis são codificados com o valor máximo permitido pela imagem que é 255 para uma imagem de 8 bits.

A figura abaixo mostra em (b) um mapa de áreas visíveis, em branco, a partir do ponto marcado com + na imagem em níveis de cinza (a) de um modelo digital de terreno.



(a)



(b)

Figura 7.26 - Ilustração da análise de visibilidade: (a) imagem em nível de cinza do modelo e (b) mapa de áreas visíveis.

7.8.11 CÁLCULO DE VOLUMES

A partir de um modelo digital de terreno é possível se calcular volumes dentro de uma região do espaço predeterminada. Delimitando-se de uma área, dentro de uma região de interesse, e definindo-se um plano horizontal de corte $Z = Z_b$, onde Z_b é cota de referência ou *cota base*, é possível calcular-se o *volume de corte* e o *volume de aterro* referentes a esse plano base. Assim, os valores de cota acima da cota base contribuem para o volume de corte enquanto que os valores de cota abaixo da cota base contribuem para o volume de aterro. Pode-se calcular também uma *cota ideal* para o plano horizontal que igualaria os volumes de aterro e de corte. Esses cálculos são muito úteis para objetivos de estudos da terraplanagem de uma área. A figura a seguir mostra o perfil de um terreno e as regiões que contribuem para os volumes de corte (+) e de aterro (-) segundo o plano base $Z = Z_b$.

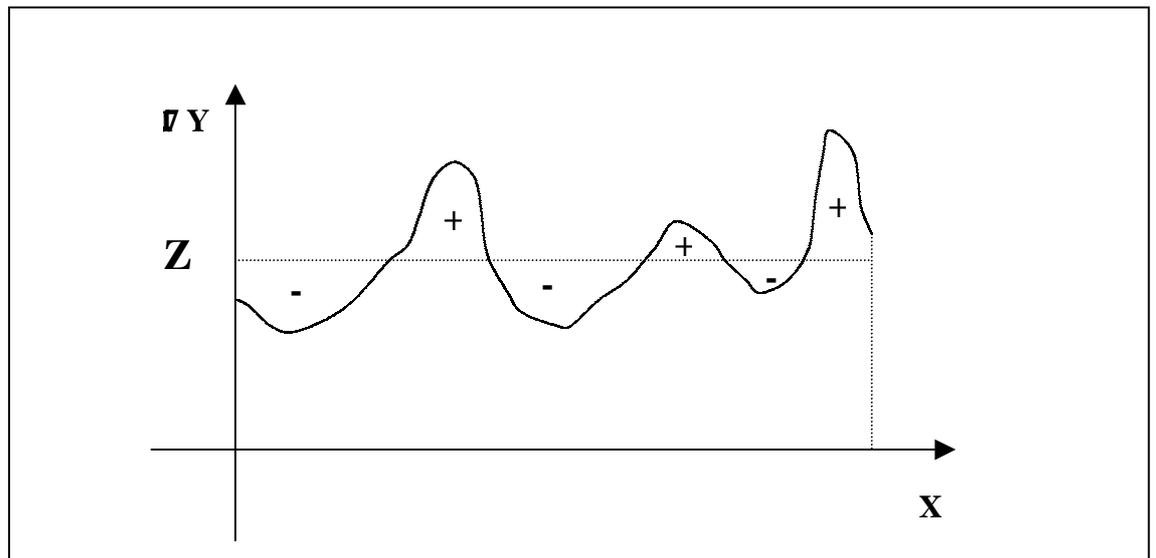


Figura 7.27 - Perfil de um terreno ilustrando o volume de corte (+) e o volume de aterro (-) em relação um plano horizontal $Z = Z_b$

Essa mesma aplicação pode ser usada para fins de cálculo do volume de água represado por uma barragem. O plano horizontal base e a região de interesse são definidos pela altura de enchimento da barragem. Neste caso o volume de água da barragem é igual ao volume de aterro calculado.

Uma aplicação mais completa de cálculo de volumes a partir do modelos digitais de terreno deve incluir também o uso de planos bases não horizontais. Neste caso o usuário poderia definir o plano base a partir do vetor normal ao plano. A figura abaixo ilustra o uso de um plano não horizontal no cálculo dos volumes de aterro e corte.

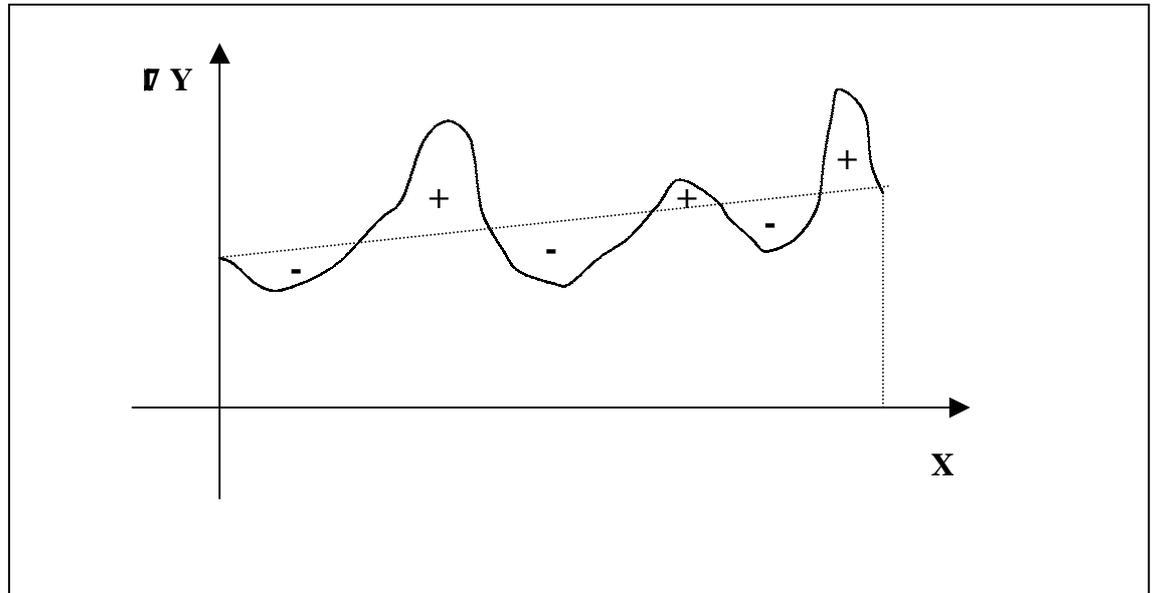


Figura 7.28 - Perfil de um terreno ilustrando o volume de corte (+) e o volume de aterro (-) em relação um plano não horizontal

ÁLGEBRA DE MAPAS

*Gilberto Câmara, Cláudio Barbosa,
João Pedro Cordeiro, Eymar Lopes,
Ubirajara Moura de Freitas e Ivan Lucena*

8.1 INTRODUÇÃO

O que distingue um SIG de outros tipos de sistemas de informação são as funções que realizam análises espaciais. Tais funções utilizam os atributos espaciais e não espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados espaciais e buscam fazer simulações (modelos) sobre os fenômenos do mundo real, seus aspectos ou parâmetros.

A partir do modelo de dados apresentado no capítulo anterior foi estabelecida uma taxonomia para as diversas operações de análise geográfica, que serão divididas em: *operadores sobre geo-objetos, operadores sobre geo-campos, operadores de transformação entre geo-campos e geo-objetos e operadores mistos entre geo-objetos e geo-campos*. Esta análise permitirá obter um entendimento formal sobre a natureza das operações em Geoprocessamento.

A literatura especializada apresenta um grande número de artigos sistematizando as operações em um SIG, como Goodchild (1987), Maguire and Dangermond (1991) e Burrough e McDonnell(1998).

Os trabalhos da literatura abordam o problema de duas perspectivas distintas: operações de consulta sobre geo-objetos (Egenhofer, 1994) e operações de manipulação sobre geo-campos (Tomlin, 1990), sem unificar as duas visões.

A caracterização adotada neste trabalho é inédita, pois deriva-se da diferenciação explícita entre geo-objetos e geo-campos. Isto tem consequências importantes, já que permite compreender melhor a natureza de cada operador. Sobretudo, este trabalho procurar traçar uma ponte entre as duas visões tradicionais

de operações geográficas (baseadas em entidades e baseadas em campos), sempre buscando uma visão integradora dos processos de análise espacial.

Devido à variedade de usos de Geoprocessamento, o critério utilizado neste trabalho foi baseado em aspectos práticos. Foram analisadas as operações disponíveis nos principais SIGs do mercado (e.g. ARC/INFO, MGE, SGI, SPANS, SPRING) e levou-se em conta a experiência prática do INPE e de seus parceiros no uso de sistemas de informação geográfica (veja-se, por exemplo, Assad e Sano, 1999).

8.2 OPERAÇÕES SOBRE GEO-CAMPOS

São descritas a seguir as operações sobre GEO-CAMPOS e suas especializações TEMÁTICO, NUMÉRICO e DADO_SENSOR_REMOTO, que podem ser classificadas como pontuais, de vizinhança e zonais (Tomlin, 1990).

8.2.1 OPERAÇÕES PONTUAIS

As operações pontuais geram como saída um geo-campo cujos valores são função apenas dos valores dos geo-campos de entrada em cada localização correspondente. Podem operar apenas sobre um campo (e.g. *fatiar* um modelo numérico de terreno, *classificar* uma imagem) ou realizar intersecções entre conjuntos espaciais (e.g. *operações booleanas* entre mapas temáticos)¹.

Dependendo dos domínios e contradomínios dos mapas de geo-campos, diferentes possibilidades podem ser consideradas:

- *operações unárias*: a entrada é um único geo-campo. Também são chamadas *operações de transformação*, pois a operação equivale a um mapeamento entre os contradomínios dos campos de entrada e saída;
- *operações booleanas*: são utilizadas em análise espacial qualitativa e geram um TEMÁTICO a partir de regras aplicadas a geo-campos (que podem ser instâncias de TEMÁTICO, NUMÉRICO ou DADO_SENSOR_REMOTO). As regras especificam o conjunto de condições a serem satisfeitas para cada tema de saída;

¹Estas operações podem envolver modificação da topologia (e.g. uma reclassificação é usualmente combinada com uma junção topológica).

- *operações matemáticas*: funções aritméticas, logarítmicas e trigonométricas, aplicadas a MNTs e a DADO_SENSOR_REMOTO. Podem gerar MNT, DADO_SENSOR_REMOTO ou TEMÁTICOS.

Dentre os operadores matemáticos, vale destacar as seguintes subclasses:

- *operações de processamento de dados de sensoriamento remoto*: subclasse de operadores matemáticos onde a entrada é um DADO_SENSOR_REMOTO e a saída é um DADO_SENSOR_REMOTO;
- *operações de classificação de dados de sensoriamento remoto*: subclasse importante dos operadores matemáticos onde a entrada é uma instância da classe DADO_SENSOR_REMOTO e a saída é um TEMÁTICO.

A tabela 5.1 descreve os principais tipos de operações pontuais unárias (também chamados operações de transformação).

TABELA 5.1
OPERAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO

F_1 - entrada	F_2 - saída	Nome do Operação
TEMÁTICO	MNT	Ponderação
TEMÁTICO	TEMÁTICO	Reclassificação
DADO SEN. REMOTO	TEMÁTICO	Fatiamento
MNT	TEMÁTICO	Fatiamento de classes

Alguns exemplos de operações de transformação:

- “reclassificar um mapa de vegetação com as classes {Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decidual } em um mapa com as classes {Floresta Densa, Floresta Estacional}”;
- “obter um mapa hipsométrico a partir de um mapa de altimetria com o mapeamento { (0-300m) → Planície, (300-500m) → Planalto, (>500m) → Serras}”.

8.2.1.1 PONDERAÇÃO

A Figura 5.1 mostra um exemplo da operação de ponderação (conversão de um mapa de solos em um mapa de solos ponderado). Neste caso, $V_1 = \{ Le, Li, Ls, Aq \}$, $V_2=[0.0,1.0]$ e a transformação é o conjunto de pares ordenados $\{(Le \rightarrow 0.60), (Li \rightarrow 0.20), (Ls \rightarrow 0.35), (Aq \rightarrow 0.10)\}$.

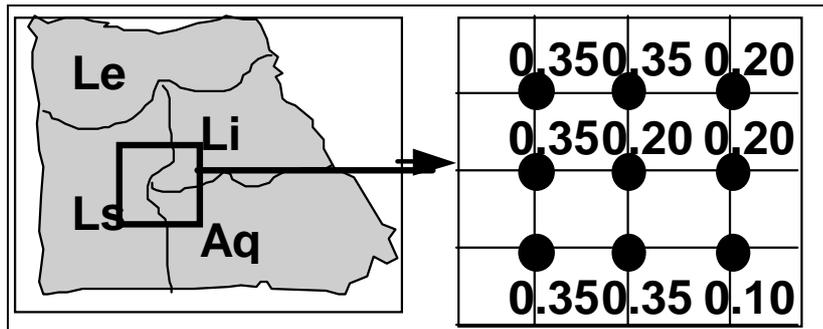


Figura 5.1 - Exemplo de operação de ponderação.

8.2.1.2 FATIAMENTO EM CLASSES

A Figura 5.2 mostra um exemplo de um operação de fatiamento em classes (conversão de um MNT em um TEMÁTICO) onde um mapa de declividade em graus é convertido para um mapa de classes de declividade a partir da transformação $\{(0-9\%) \rightarrow \text{“baixa”}; (10-19\%) \rightarrow \text{“média”}; (\text{acima de } 20) \rightarrow \text{“alta”}\}$.

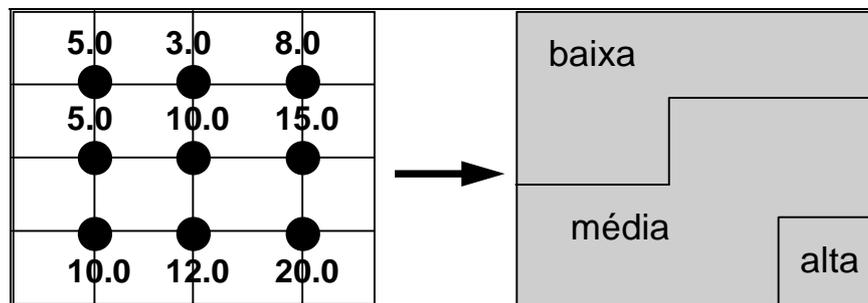


Figura 5.2 - Exemplo de operação de fatiamento em classes.

8.2.1.3 OPERAÇÃO BOOLEANA

Estas funções utilizam operadores lógicos (booleanos) e permitem realizar cruzamentos entre dois ou mais planos de informação. A operação lógica do tipo A AND B retorna todos os elementos contidos na intersecção entre A e B; A NOT B retorna somente os elementos contidos exclusivamente em A; A OR B retorna todos os elementos contidos tanto em A como em B; A XOR B retorna todos os elementos contido em A e B não incluídos na intersecção de A e B.

O apelo da abordagem *Booleana* é a sua simplicidade e fácil aplicação, com a combinação lógica de mapas em um SIG diretamente análoga ao tradicional método de sobreposição empregado nas mesas de luz. Porém, na prática pode não ser apropriado atribuir igual importância para cada um dos critérios combinados, as evidências precisam ser pesadas dependendo da sua relativa importância (Bonham-Carter, 1994).

Como exemplo de *operação booleana*, tome-se o caso de determinar um mapa de aptidão agrícola a partir dos mapas de solo, declividade, precipitação e do conjunto hipotético de regras expresso na tabela abaixo.

TABELA 5.2
REGRAS PARA APTIDÃO AGRÍCOLA

<i>Aptidão Agrícola</i>	<i>Solos</i>	<i>Precipitação Média mensal</i>	<i>Declividade</i>
Boa	Latossolos	> 100 mm	0-3.5%
Média	Podzólicos	100-50 mm	3.5-12%
Inapto	Litólicos	< 50 mm	>12%

8.2.1.4 OPERAÇÃO MATEMÁTICA

Como exemplo de *operação matemática*, tome-se a Figura 5.3, onde f_1 é um mapa de solos ponderado e f_2 é um mapa de declividade (a declividade é o módulo das derivadas parciais da altimetria). A operação

$$\lambda_{\text{new}}(p) = \lambda_1(p) + 1/\lambda_2(p)$$

poderia ser utilizada como passo intermediário ao se calcular um mapa de adequação de solos (quanto maior o valor, mais adequado).

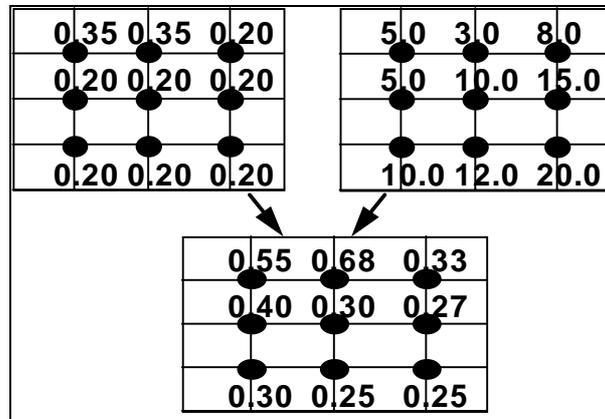


Figura 5.3 - Exemplo de uma operação matemática.

8.2.2 OPERAÇÕES DE VIZINHANÇA

Nesta classe de operações, dado um geo-campo, computa-se o geo-campo de saída com base na dimensão e forma de uma vizinhança em torno de cada localização p . Exemplos incluem:

- cálculos de valores *mínimo*, *máximo*, *médio*, *modal* para uma vizinhança em torno de um ponto;
- *filtros* para processamento de DADO_SENSOR_REMOTO;
- *métodos de interpolação espacial* para MNT (como médias por vizinho mais próximo);
- *mapas de declividade e exposição* para MNT;
- *índices de diversidade* para TEMÁTICO (onde o valor de saída está associada ao número de vizinhos de um ponto de entrada de uma classe que pertencem a classes distintas).

Como exemplo de operação de vizinhança, tome-se o caso da estimativa da diversidade de vegetação de uma região, computado a partir de uma vizinhança 3 x 3 em torno de cada ponto. A idéia é que a diversidade seja maior em áreas de contato ecológico entre regiões homogêneas. A Figura 4.4 apresenta um mapa de vegetação e mostra a estimativa de diversidade computada para uma parte do mapa.

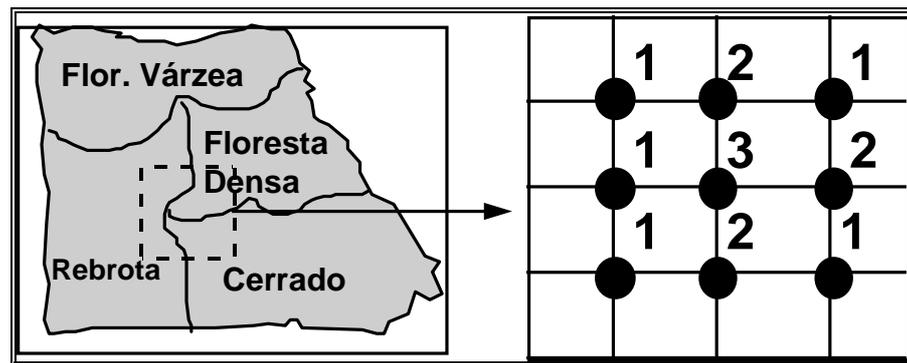


Figura 4.4 - Exemplo de operação de “estimativa de diversidade”.

8.2.3 OPERAÇÕES ZONAIS

As operações *zonais* são definidas sobre regiões específicas de um geo-campo de entrada, onde as restrições são fornecidas por outro geo-campo temático. Um exemplo seria: “dado um mapa de solos e um mapa de declividade da mesma região, obtenha a declividade média para cada tipo de solo”.

Estas operações são sempre definidas sobre geo-campos das classes MNT ou DADO SENSOR REMOTO. Como a restrição desta operação pode ser um TEMÁTICO ou CADASTRAL, considerar-se-ão duas definições distintas. Nesta seção, apresenta-se o caso de operações zonais onde a restrição é um TEMÁTICO. O segundo caso será discutido na seção “Operações Mistas”.

No caso de operadores zonais, um geo-campo temático é utilizado para definir uma região de interesse aonde é computada a função. Os operadores zonais incluem:

- *média, máximo e mínimo e desvio padrão* dos valores sobre uma região especificada;
- *índice de variedade* dos valores, onde cada valor no mapa de saída será computado a partir do número de valores diferentes do geo-campo de entrada que pertencem a uma mesma região zonal.

Considere-se, por exemplo, a operação MÁXIMO ZONAL, onde se toma um TEMÁTICO como restrição sobre um MNT, e se retorna o maior valor do MNT para cada tema (vide Figura 5.4).

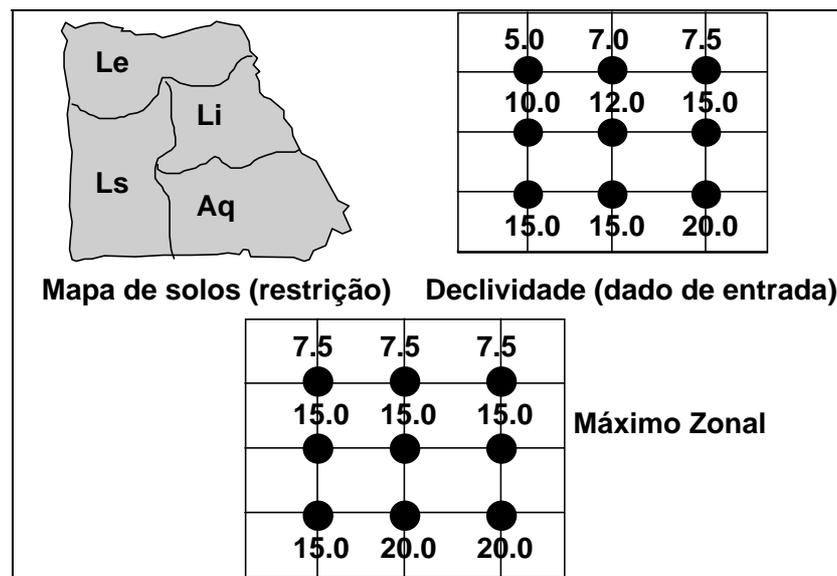


Figura 5.4 - Operação de máximo zonal.

A importância teórica das operações zonais é dupla: permite materializar num SIG os conceitos de unidade de paisagem (Bertrand, 1981; Tricart, 1977; Tricart e KiewietdeJonge, 1992) e área-unidade (Hartshorne, 1978) e permite a ligação entre dados do meio físico-biótico e dados sócio-econômicos, essencial para estudos de ordenação do território.

Alternativamente aos procedimentos manuais e de forma análoga ao exemplo anterior, uma operação de *média zonal* pode ser conveniente na determinação da vulnerabilidade natural à erosão (Crepani et al, 1996) ou da fragilidade (Ross, 1990) das “unidades de paisagem” ou das “unidades territoriais básicas” mapeadas a partir das imagens de satélites. Toma-se o geo-campo temático ou cadastral “unidade de paisagem” como restrição sobre geo-campos numéricos (MNT), que por sua vez, são resultantes de ponderações sobre os geo-campos temáticos de geologia, geomorfologia, solos, vegetação e clima. Obtém-se com o resultado um geo-campo numérico, cujo valor médio para cada “unidade de paisagem” mapeada representa sua vulnerabilidade ou fragilidade natural. Este geo-campo numérico (MNT) pode ser “fatiado” em classes de vulnerabilidade (muito alta, alta, média, baixa e muito baixa), obtendo-se um geo-campo temático.

8.3 RELACIONAMENTOS ESPACIAIS ENTRE GEO-OBJETOS

Em nosso modelo, os geo-objetos estão sempre associados a representações gráficas 2D (*pontos, linhas e regiões*). Como as operações da álgebra de geo-objetos podem envolver restrições espaciais, será fundamental caracterizar os relacionamentos espaciais, que podem ser divididos em (Güting, 1994):

- *relacionamentos topológicos*, tais como “dentro de” e “adjacente a”, invariantes a transformações biunívocas e bicontínuas (como as de escala, translação e rotação);
- *relacionamentos métricos*, derivados das operações de *distância* e *direção*. O cálculo destas operações pressupõe sempre a existência de um espaço métrico, o que pode não ser sempre o caso.

A definição de um conjunto mínimo de operadores é objeto de muito debate na literatura:

- Freeman (1975) define um conjunto de 13 operadores: “à esquerda de”, “à direita de”, “acima” (mais alto que, sobre), “abaixo” (sob), “atrás”, “próximo a”, “longe de”, “ao lado de” (adjacente a), “tocando”, “dentro de”, “fora de”, “entre”;
- Egenhofer (1994) usa “disjunto”, “encontram”, “igual”, “dentro de”, “contém”, “cobre”, “coberto por” e “sobreposição”.

Devido à variedade de propostas, o esforço para formalizar os relacionamentos espaciais é parte fundamental da proposta de uma álgebra de geo-objetos para um conjunto bem-definido de objetos geográficos (casos “simples” de regiões sem buracos e linhas contínuas).

8.3.1 ANÁLISE DE RELACIONAMENTOS TOPOLÓGICOS

Apresenta-se nesta seção uma análise dos relacionamentos topológicos entre elementos do tipo ponto-linha-área. Utilizam-se os termos propostos por Clementini et al. (1993) que, a partir da análise das configurações possíveis entre os elementos ponto-linha-área, propõem cinco nomes para os relacionamentos topológicos: *toca*, *dentro de*, *cruza*, *sobrepõe* e *disjunto*. Diz-se que um conjunto de pontos ω_1 *toca* outro conjunto ω_2 se a única coisa em comum entre eles está contida na união de suas fronteiras, como ilustram os exemplos da Figura 5.5.

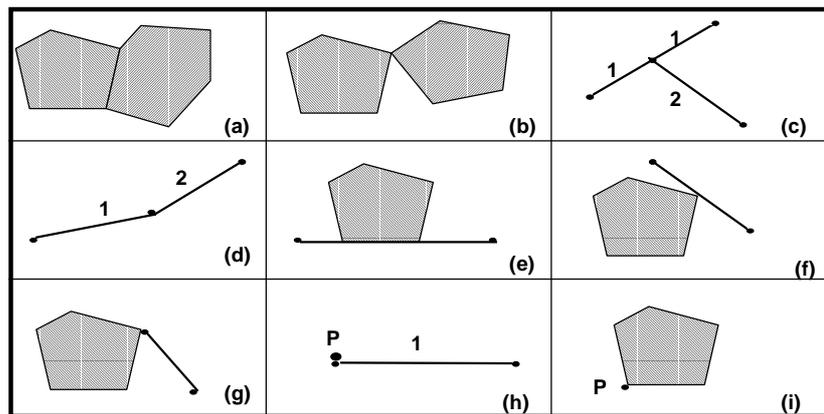


Figura 5.5 - Exemplos de situações topológicas que ilustram o relacionamento *toca*, no caso de duas áreas (a, b), duas linhas (c, d), linha e área (e, f, g), um ponto e uma linha (h) e um ponto e uma área (i). Adaptado de Clementini et al. (1993).

Diz-se que um conjunto de pontos ω_1 está *dentro de* outro conjunto ω_2 quando a intersecção dos dois conjuntos de pontos é o próprio ω_1 (vide Figura 5.6).

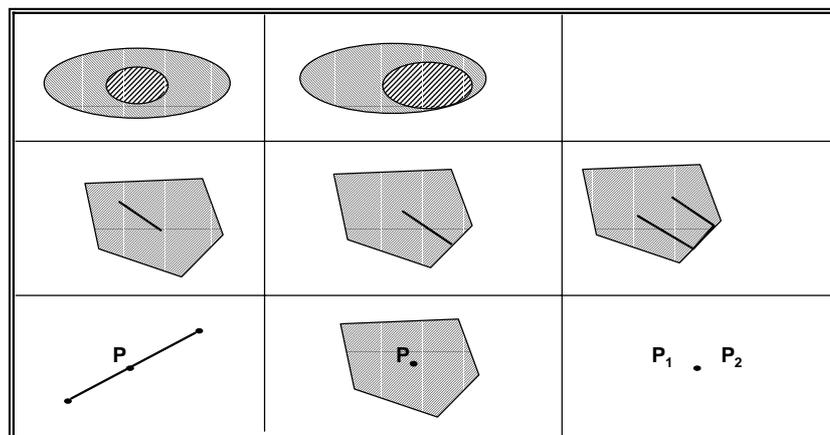


Figura 5.6 - Exemplos do relacionamento “dentro de” (contido em).

Duas linhas se *cruzam* se sua intersecção ocorre em ponto interno de ambas (note-se que a intersecção de seus pontos limites será definida como *toca*); de forma similar, uma linha cruza uma área se o interior da linha está parcialmente interno e parcialmente externo a esta área. Veja-se os exemplos da Figura 5.7.

Diz-se que dois conjuntos de pontos ω_1 e ω_2 possuem *sobreposição* quando o resultado de sua intersecção é uma figura da mesma dimensão de ambos. Este

relacionamento é aplicável apenas a casos de elementos homogêneos. Vejam-se os exemplos da Figura 5.7.

Duas figuras são *disjuntas* se sua intersecção é vazia (vide figura 5.7).

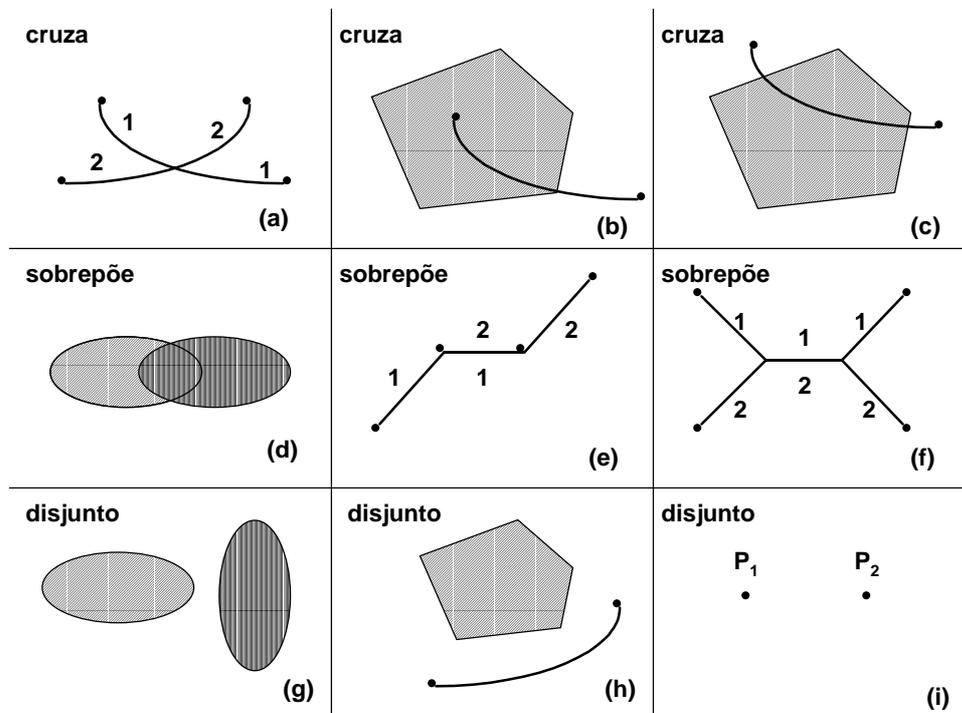


Figura 5.7 - Exemplos de relacionamentos:

1. *Cruza* entre duas linhas (a), linha e área (b, c).
2. *Sobreposição* entre duas áreas (d), duas linhas (e, f).
3. *Disjunto* entre duas áreas (g), linha e área (h), dois pontos (i).

(Adaptado de Clementini et al. (1993))

8.4 OPERAÇÕES SOBRE GEO-OBJETOS

Pode-se definir as seguintes operações sobre geo-objetos:

1. *restrições sobre atributos*: computados em função dos atributos de entidades espaciais (e.g. “selecione todas as cidades de Alagoas com mortalidade infantil maior que 10% ”);
2. *restrições espaciais*: derivados a partir dos relacionamentos *topológicos* das entidades geográficas (e.g. “dê-me todas as escolas municipais do bairro Jardim Satélite”), de *direção* (“ao norte de”, “acima de”) ou *métricos* (e.g. “dê-me todas as escolas a menos de 500 m da Via Dutra”);
3. *propriedades de geo-objetos*: os resultados correspondem a predicados de um geo-objeto ou de um conjunto de geo-objetos (e.g. “calcule a média do valor venal das casas do bairro Jardim Esplanada” ou “indique o caminho ótimo para o ônibus que vai do Centro ao Jardim Uirá”).

Estas operações utilizam as primitivas definidas anteriormente: as relações topológicas *toca*, *dentro de*, *disjunto*, *cruza* e *sobrepõe*, as relações métricas unárias (comprimento, área, perímetro) e binárias (distância, direção).

8.4.1 SELEÇÃO POR ATRIBUTOS

O operador de seleção por atributos sobre um conjunto de geo-objetos GO , dada uma restrição baseada apenas nos atributos descritivos de GO , gera como resultado um sub-conjunto $GO' \subset GO$, cujos membros satisfazem a restrição.

Esta é uma operação semelhante à seleção da álgebra relacional, como indica o exemplo: "Recupere as cidades do Estado de São Paulo com população entre 100.000 e 500.000 habitantes".

8.4.2 SELEÇÃO ESPACIAL

Para definir as operações de consulta espacial, é necessário lançar mão do conceito de predicado espacial. Dados uma região geográfica R , um conjunto de geo-objetos GO e um mapa cadastral que mapeia objetos de GO em R , um *predicado espacial* é uma restrição espacial definida através de um relacionamento topológico (*dentro de*, *toca*, *cruza*, *subrepõe* e *disjunto*) ou de um relacionamento métrico (*distância*).

Intuitivamente, os predicados espaciais utilizados nas operações envolvendo geo-objetos são assertivas do tipo “rio que cruza o município de São José dos Campos, no mapa do Vale do Paraíba”.

Assim, dados uma região geográfica R , um conjunto de geo-objetos GO , um mapa cadastral que mapeia objetos de GO numa região geográfica R e um *predicado espacial*, o operador de *seleção espacial* é tal que o resultado desta operação é um subconjunto do conjunto original composto de todos os geo-objetos que satisfazem o predicado espacial, como ilustrado no exemplo da Figura 5.5:

- “selecione todas as regiões da França adjacentes à região de Midi-Pirenées (que contém a cidade de Toulouse)”.

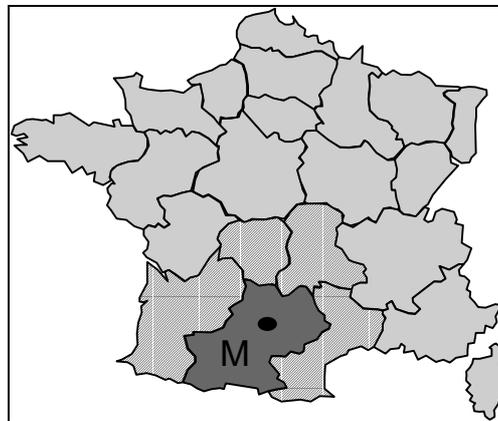


Figura 5.5 - Exemplo de operação de seleção espacial.

8.4.3 JUNÇÃO ESPACIAL

O termo *junção espacial* é empregado por analogia à operação de *junção* em banco de dados convencionais e denota o conjunto de operações onde ocorre a comparação entre dois conjuntos de objetos, baseado num predicado espacial computado sobre suas representações. A operação de junção espacial é tal que produz como resultado uma *coleção de objetos e valores* que satisfazem a restrição espacial. Exemplos:

- “para cada estrada da Amazônia, ache as reservas indígenas a menos de 5 km de uma estrada”;
- “para as cidades do sertão cearense, ache quais estão a menos de 10 km de algum açude com capacidade de mais de 50.000 m³ de água”;

No primeiro exemplo a resposta é um conjunto de pares (reserva, estrada); no segundo, um conjunto de pares (cidade, açude).

8.5 OPERAÇÕES ENTRE GEO-CAMPOS E GEO-OBJETOS

8.5.1 ATUALIZAÇÃO DE ATRIBUTOS DE GEO-OBJETOS A PARTIR DE GEO-CAMPOS

Uma das operações muito úteis e necessárias diz respeito à atualização de atributos de geo-objetos a partir de dados de um geo-campo. Por exemplo, considere a situação aonde temos:

- Um mapa de municípios de uma região.
- Um conjunto de municípios representado nesse mapa (geo-objetos).
- Um mapa de altimetria da região (geo-campo).

Neste caso, pode ser útil responder à seguinte questão: “Dados a altimetria e o mapa de municípios, calcule a altimetria média para cada município e atualize esta informação no bancos de dados, criando um novo atributo para o município”.

Esta operação é ilustrada na Figura 5.6, em que temos um exemplo de atualização de atributos de talhões de cultura com valores médios de níveis de cinza de uma imagem.

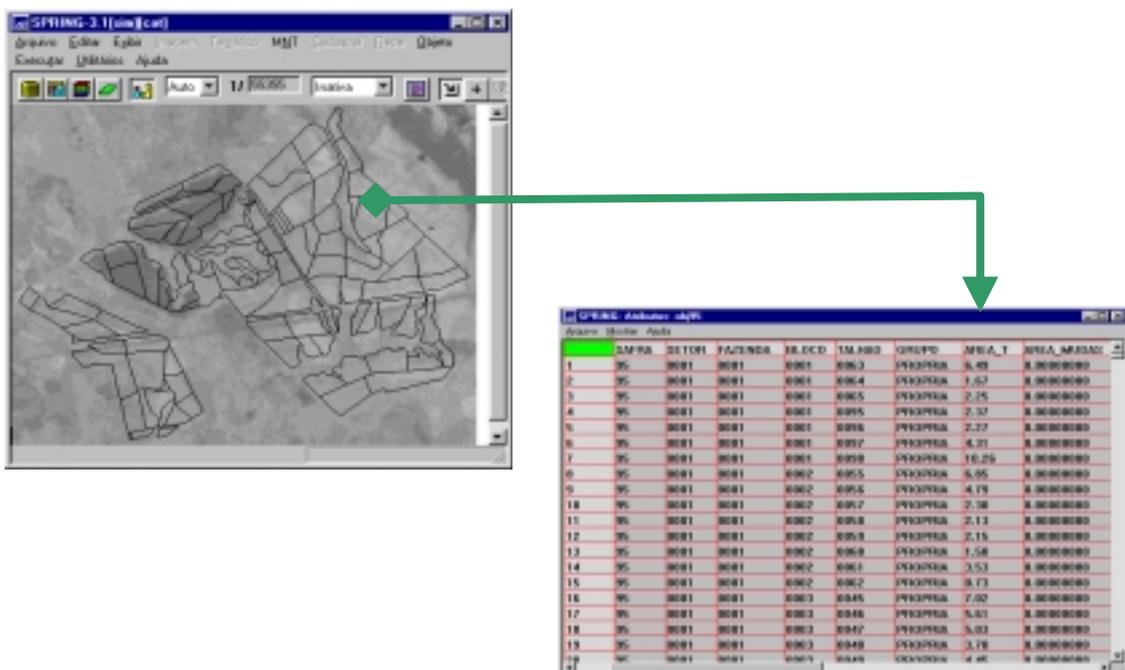


Figura 5.6 - Operação de Atualização de Atributos de Geo-Objetos.

8.5.2 ESPACIALIZAÇÃO DE GEO-CAMPOS A PARTIR DE GEO-OBJETOS

A partir de atributos (descritivos ou espaciais) de conjuntos de geo-objetos, pode-se fazer a geração de geo-campos. O novo geo-campo representa a *variação espacial de um atributo dos geo-objetos* (operação de *especialização*).

A operação de *especialização* gera, a partir dos valores de um atributo específico dos geo-objetos de um mapa, um geo-campo com a distribuição espacial deste atributo. Pode haver necessidade de recalcular a topologia do mapa resultante pois algumas regiões serão combinadas. Veja-se o exemplo da figura 5.7, onde temos unidades de paisagem (geo-objetos), que possuem vários atributos, os quais indicam os diferentes classificações do meio físico (geomorfologia, solos, geologia e vegetação). Um destes atributos (o tipo de solos) foi espacializado no mapa resultante.

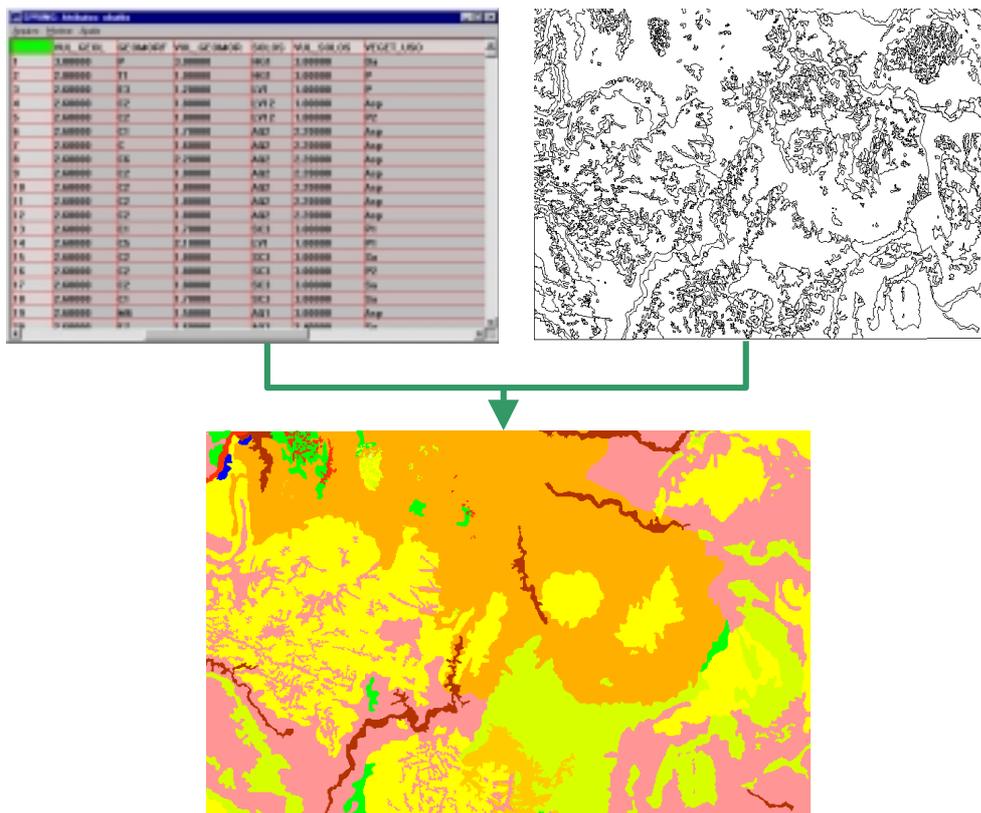


Figura 5. 8 - Exemplo da operação de espacialização.

Um caso especial da operação de espacialização ocorre no caso de tratarmos com um atributo do geo-objeto que seja numérico (inteiro ou real). Neste caso, em vez de criar um geo-campo numérico com a variação espacial do atributo considerado, fazemos uma operação de reclassificação neste atributo, de forma a gerar um geo-campo temático. A esta operação denominamos de *reclassificação por atributos*. A figura 5.9 ilustra essa operação, com o exemplo: “Para todos os países da América do Sul, gere um geo-campo temático com o crescimento demográfico de cada país, dividido em classes: { (de 0 a 2% ao ano), (de 2 a 3% a.a.), (mais de 3% a.a.)}.”

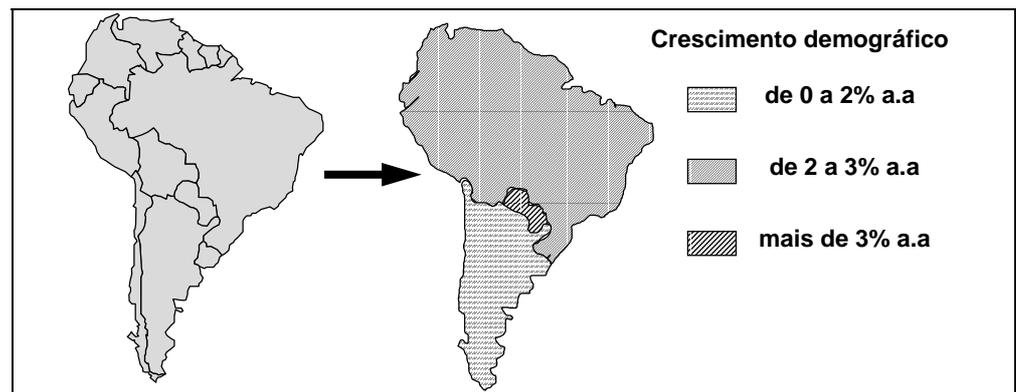


Figura 5.9 - Exemplo de *reclassificação por atributo*.

8.5.3 MAPAS DE DISTÂNCIA ("BUFFER")

Um *mapa de distâncias* é um mapa de geo-campos contendo as distâncias de cada ponto do mapa a um geo-objeto de referência (representado por um ponto, linha ou região). Trata-se de operação puramente geométrica (espacial). A Figura 5.7 ilustra esta operação.

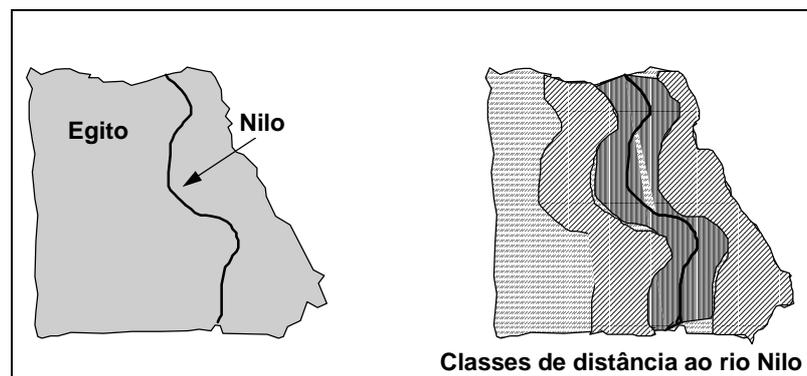


Figura 5.7 - Exemplo de mapa de distâncias.

8.6 RESUMO DAS OPERAÇÕES SOBRE GEO-CAMPOS E GEO-OBJETOS

Apresentam-se a seguir um resumo das operações propostas, aplicáveis a geo-campos e geo-objetos, na Tabela 4.5. Estão indicados para cada operação: a classe dos objetos de entrada e de saída, e dos objetos modificadores (quando cabível). Indicam-se ainda as restrições de cada operação.

TABELA 4.5

RESUMO DAS OPERAÇÕES

<i>Operação</i>	<i>Objeto Entrada</i>	<i>Objeto Modificador</i>	<i>Objeto Saída</i>	<i>Restrição</i>
Ponderação	TEMÁTICO		NUMÉRICO	(função unária)
Fatiamento	NUMÉRICO		TEMÁTICO	(função unária)
Reclassificação	TEMÁTICO		TEMÁTICO	(função unária)
Booleana	NUMÉRICO, TEMÁTICO		TEMÁTICO	(regras)
Matemática	NUMÉRICO		NUMÉRICO	(fórmula)
Zonais	NUMÉRICO	TEMÁTICO	NUMÉRICO	
Atualização	GEO-OBJETO	NUMÉRICO (OU TEMÁTICO)	GEO-OBJETO (atributo)	
Espacialização	GEO-OBJETO (ATRIBUTO)		NUMÉRICO, TEMÁTICO	
Reclassificação por Atributo	GEO-OBJETO (ATRIBUTO)		TEMÁTICO	(regras de classificação)
Mapa de Distância ("buffer")	GEO-OBJETO		NUMÉRICO	
Seleção Espacial	GEO-OBJETO (conjunto)	CADASTRAL	GEO-OBJETO (conjunto)	(predicado espacial)
Junção Espacial	GEO-OBJETO (conjuntos)	CADASTRAL	GEO-OBJETO e VALORES (conjunto)	(predicado espacial)

8.7 EXEMPLO DE LINGUAGEM DE MANIPULAÇÃO

A equipe do INPE engajada no desenvolvimento do SPRING tem procurado caracterizar, de forma ampla, as operações sobre dados geográficos. Deste estudo nasceu o projeto da linguagem LEGAL (**L**inguagem **E**spacial para **G**eoprocessamento **A**lgebrico), descrita em Câmara (1995).

A álgebra de campos proposta em Câmara (1995) foi usada como base para a implementação parcial da linguagem LEGAL no SPRING, com os seguintes tipos de operações: *transformação*, *booleanas*, *matemáticas* e de *classificação contínua* (Cordeiro et al., 1996) e operadores zonais (Barbosa et al., 1998).

Um programa em LEGAL é estruturado em três partes: *declarações*, *instanciações* e *operações*. No que segue, as sentenças em LEGAL serão escritas em fonte **Courier New** e as palavras reservadas da linguagem começam com **Maiúscula**. A sintaxe do LEGAL está descrita em detalhe no Apêndice A.

8.7.1 DECLARAÇÃO

Toda variável em LEGAL deve ser declarada antes de ser utilizada, de acordo com a sintaxe:

Tematico <var> (<categoria>);

Numerico <var> (<categoria>);

Imagem <var> (<categoria>);

No SPRING, o termo “*categoria*” identifica uma especialização das classes geográficas básicas, no caso de geo-campos, as classes **Tematico**, **Numerico** ou **Imagem**. Por exemplo, pode-se definir uma categoria “Altimetria” como especialização de **Numerico**.

8.7.2 INSTANCIAÇÃO

A instanciação é caracterizada pelos operadores **Recupere** e **Novo**. O operador **Recupere** associa uma variável a um geo-campo existente no banco de dados geográfico a partir de seu nome. O operador **Novo** cria um novo geo-campo no banco de dados e requer parâmetros, dependendo da representação geométrica associada:

- imagem em tons de cinza: resolução horizontal e vertical;

- grade regular: resolução horizontal e vertical, valores máximos e mínimos aceitáveis;
- imagem temática (geo-campo temático em representação matricial): resolução horizontal e vertical e escala;
- representação vetorial: escala.

8.7.3 OPERAÇÕES

8.7.3.1 Transformação

Operações de transformação são usadas para realizar mapeamentos entre diferentes tipos de campos geográficos:

- **Pondere**: transforma uma instância do campo **Temático** em um **Número**;
- **Fatie**: transforma uma instância do campo **Número** ou **Imagem** em um **Temático**;
- **Reclassifique**: transforma uma instância do campo **Temático** em outra com diferentes classes.

Como regra geral, os operadores de transformação exigem que o usuário defina um mapeamento entre os domínios de entrada e de saída sob a forma de uma *tabela*. A linguagem permite a definição de tabelas específicas para cada tipo de tais mapeamentos. As especializações de tabelas previstas pela linguagem são: **Ponderacao**, **Fatiamento** e **Reclassificacao**.

A seguir, apresentamos um exemplo de uma operação de fatiamento, que transforma um campo numérico de declividade em um campo temático de classes de declividade.

```

{
// Declaracao das variaves
Numerico decNumerico ("GradeDeclive");
Tematico decClasses ("ClassesDeclividade");
Tabela tabfatia (Fatiamento);

// Instanciacao das variaves
decNumerico = Recuperar(Nome="decliv-30x30");
decClasses = Novo(Nome= "decli_fat_30x30", ResX=30, ResY=30,
Escala=100000);

tabfatia=Novo(CategoriaFim = "ClassesDeclividade",
              [0.0,   3.0] : "A-0a3",
              [3.0,   8.0] : "B-3a8",
              [8.0,  12.0] : "C-8a12",
              [12.0, 20.0] : "D-12a20",
              [20.0, 45.0] : "E-20a45",
              [45.0, 300.0] : "F>45" );

// Operacao de Fatiamento
decClasses = Fatie( decNumerico, tabfatia );
}

```

O programa a seguir apresenta um exemplo de operação de ponderação, aplicada a um mapa de tipos de solos, para obter a erodibilidade.

```

{
Tematico mapaSolos ("Solos");
Numerico erod      ("Erodibilidade");

Tabela pond (Ponderacao) ;

mapaSolos = Recuperar (Nome = "solos");

erod      = Novo(Nome="soloPond", ResX=30, ResY=30, Escala=100000,
Min=0, Max=1.);

pond = Novo (CategoriaIni = "Solos",
             "PV2" : 0.0462, "PV3" : 0.0280,
             "LEd1" : 0.0143, "LRd" : 0.0128,
             "PV5" : 0.0462, "LV1" : 0.0167, "agua" : 0);

erod = Pondere (solo,pond );
}

```

8.7.3.2 Operações booleanas

Nas operações booleanas, o valor do geo-campo resultante em cada posição é uma função apenas do valor da posição correspondente nos geo-campos de entrada. A saída de uma operação booleana é um GEO-CAMPO TEMÁTICO, cujos valores do contra-domínio necessitam ser especificados em função dos valores dos campos de entrada. Essas condições são calculadas através do operador *Atribua*, com as condições E (&&), OU (||) e NÃO (~). Um exemplo de uso desta operação é dado abaixo, onde um mapa de aptidão agrícola é calculado com base na declividade e no tipo de solo.

```
{
Tematico      mapa_solos ("Solos"),mapa_aptidao ("Aptidão");
Numerico      mapa_decl ("Declividade");
mapa_decl = Recuperar(Nome="Decl92");
mapa_solos = Recuperar(Nome="Solos92");
mapa_aptid = Novo (Nome = "Aptidao92", Representacao = Matricial,
ResX = 250, ResY =250, Escala =100000);
mapa_aptid = Atribua (CategoriaFim = "AptidaoAgricola",
{ "Bom" : mapa_solos.Tema = "Le" && mapa_decl >= 0.05;
  "Medio" : mapa_solos.Tema = "Aq" && mapa_decl >= 0.1;
  "Ruim" : Outros;
});
}
```

8.7.3.3 Operações matemáticas

As operações matemáticas sobre geo-campos que são especializações de NUMÉRICO e IMAGEM incluem:

- operações aritméticas: soma (+), subtração (-), multiplicação (*) e divisão(/);
- funções matemáticas: seno (sin), cosseno (cos), tangente (tan), arco tangente (atan), logaritmo (log), exponencial (exp), raiz quadrada (sqrt);
- relações: menor que (<), maior que (>), menor ou igual (<=), maior ou igual (>=), igual (==), diferente (!=).

Exemplo de aplicação de operações matemáticas refere-se à geração do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (IVDN) para estas novas imagens LANDSAT TM.

```
{
// Declaracao
Imagem tm3 ("LandsatTM"), tm4 ("LandsatTM"), IVDN ("IndiceVeget");
// Instanciacao
tm3 = Recuperar (Nome="231_067_B3");
tm4 = Recuperar (Nome="231_067_B4");
IVDN = Novo (Nome = "IVDN", ResX = 30, ResY = 30);
// Operacao
IVDN = Imagem (255*(tm4 - tm3)/( tm4 + tm3 ));
}
```

8.7.3.4 Atributos de Geo-Objetos a partir de Geo-Campos

Esta operação é uma variação da operação zonal sobre geo-campos, gerando atributos de geo-objetos a partir de valores de geo-campos, onde a restrição é a representação espacial dos geo-objetos. Por exemplo, considere a operação “obtenha a altitude média de todas os municípios do Estado de São Paulo”. Ela pode ser representada por:

```
Municipios."altitude" = Atualize( Altimetria,      municipios
ONMAP mapa_SP);
```

Numa formulação mais geral, esta classe de operações pode ser indicada por:

```
<objeto>.<atributo> = Atualize ( <geo-campo>,
                                <objeto> ONMAP <cadastral>);
```

Uma operação adicional computa atributos de geo-objetos a partir de uma condição dada. Por exemplo, a operação “Calcule o desmatamento de cada município da Amazônia, baseado num mapa de uso de solo” pode ser feita em LEGAL por

```
Municipio."desmat" = Atualize ( usosolo = "Desmatamento",
                                municipio ONMAP mapa_AMZ);
```

8.7.3.5 Geo-Campos a partir de Geo-Objetos

Esta operação permite a geração de um novo campo, a partir de um atributo de geo-objetos. Neste caso, a saída será um campo numérico ou temático, obtido preenchendo-se a representação geométrica do geo-objeto com o valor do atributo.

A operação de reclassificação por atributos pode ser realizada em LEGAL pela seguinte sintaxe:

```
<geo-campo> = Espacialize ( <objeto>.<atributo>  
                           ONMAP <cadastral>);
```

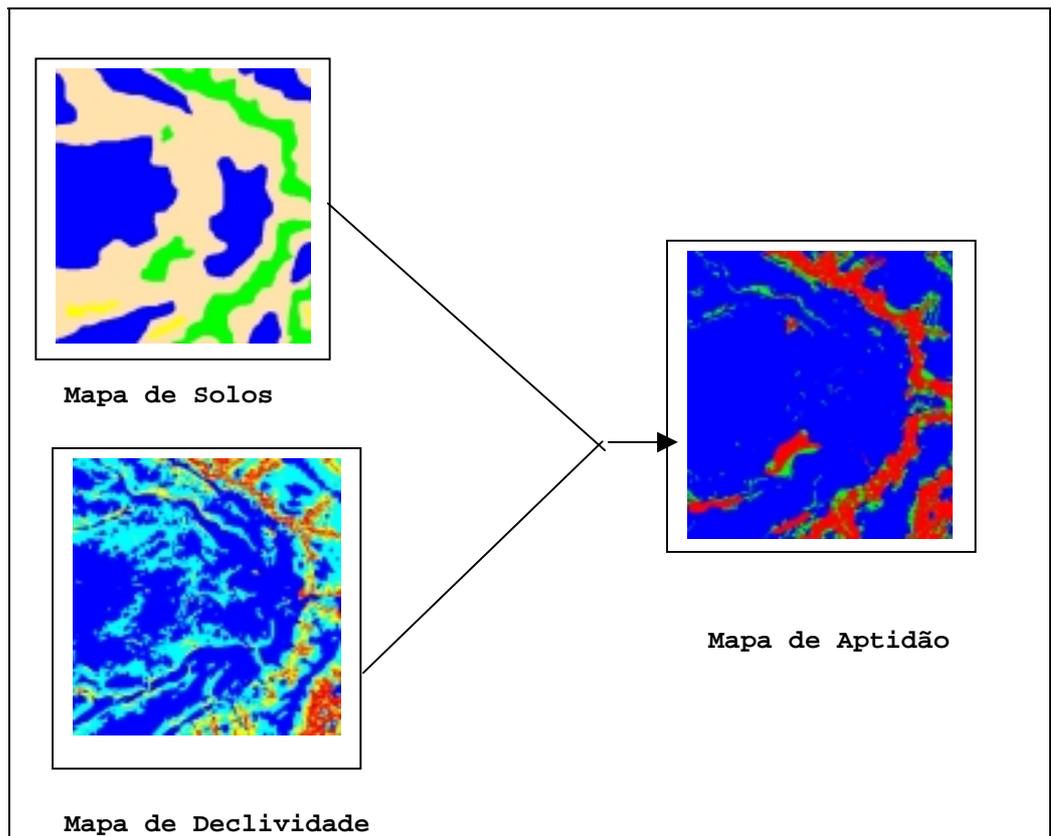
Como exemplo dessa operação, considere um programa em LEGAL que gera, a partir de dados de talhões, dois geo-campos: um campo temático contendo a distribuição das classes de solo e um campo numérico com a variação do pH para cada unidade de solo.

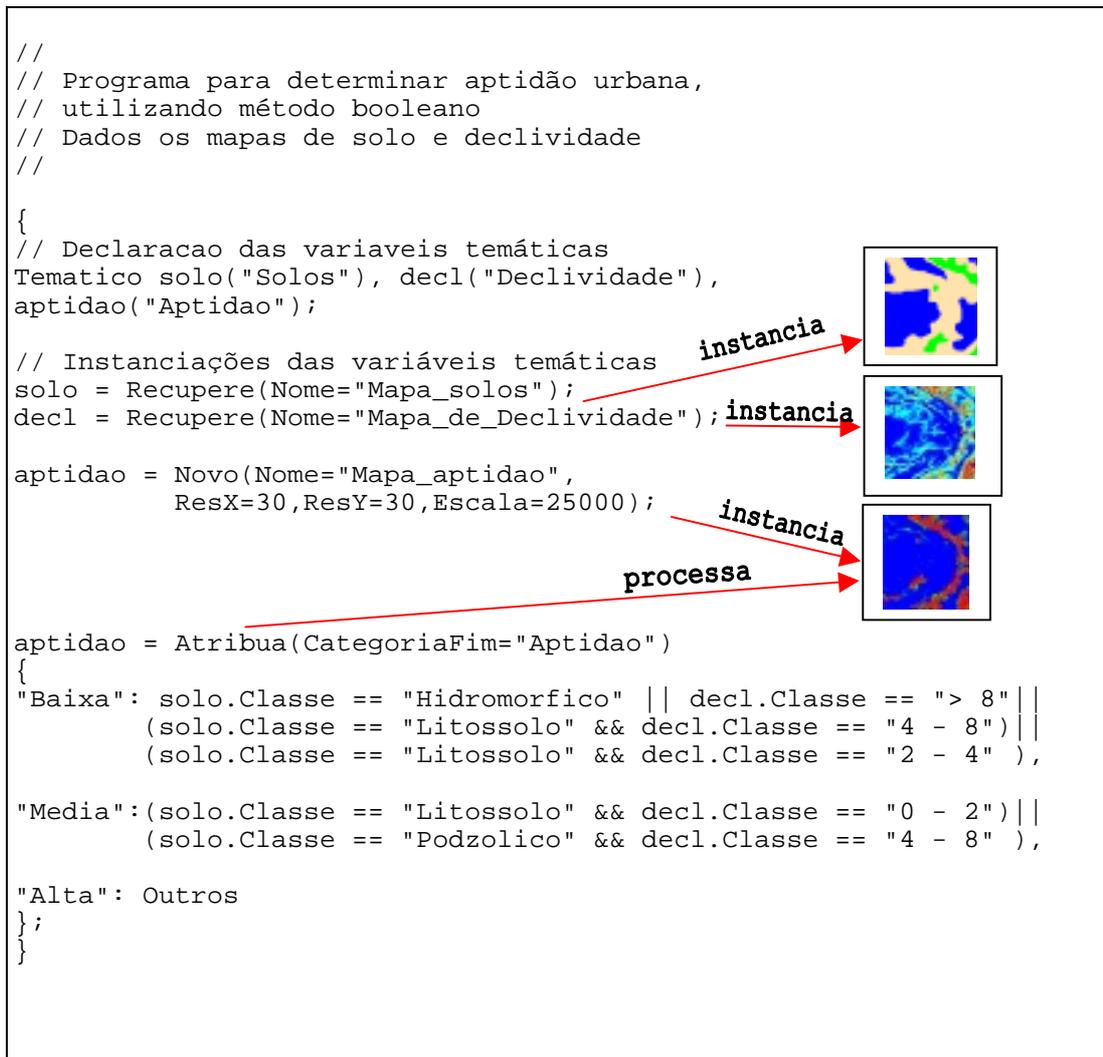
```
{  
// Inicio de programa  
// Declarando os nomes das variáveis usadas  
Objeto      limites ("Talhoes");  
Cadastral   fazendas ("MapaFazendas");  
Tematico    mapaSolos ("Solos");  
Numerico    phSolos ("GradePh")  
  
// Instanciações  
//Dados de entrada  
fazendas = Recupere (Nome = "mt");  
// Dados de Saida  
mapaSolos = Novo (Nome="mapa_de_solos", ResX =30, ResY =30,  
Escala =10000, Repres = Vetor);  
phSolos = Novo (Nome="phSolos", ResX=30, ResY=30,  
Escala=10000, Min=0., Max=15. );  
  
// Resultado em geo-campo Temático  
mapaSolos = Atualize (limites."SOLO" OnMap fazendas);  
// Resultado em campo Numérico  
phSolos = Atualize (limites."ph" OnMap fazendas);  
}
```

8.8 EXEMPLOS DE PROGRAMA EM LEGAL

8.8.1 OPERAÇÕES BOOLEANAS

Para ilustrar o uso do LEGAL, apresentamos a seguir um programa que cruza dois geo-campos (Solos e Declividade) e daí calcular o mapa de Aptidão de Uso.





O próximo exemplo também identifica as áreas de aptidão, mas com uma metodologia diferente:

- Pondera os mapas temáticos,
- Realiza a soma ponderada dos mapas e
- Faz o fatiamento da soma.

```
// Programa para determinar aptidão urbana, pela média ponderada
// Dados os mapas de solo e declividade
{
// Declaração das variáveis temáticas
Tematico solo("Solos"), aptidao("Aptidao");
Numerico decl ("Declividade");

// Declaração da tabela de ponderação e fatiamento
Tabela tabSolo (Ponderacao), tabfat (Fatiamento);

// Declaração das variáveis numéricas
Numerico numSolo, numClassif, numDecl ("Grade_Aptidao");

// Instanciações das variáveis temáticas
solo = Recuperar (Nome="Mapa_solos");
decl = Recuperar (Nome="Mapa de Declividade");

// Instanciações das variáveis numéricas
numSolo = Novo(Nome = "grade_solo", ResX=25, ResY=25,
               Escala=25000,Min=0,Max=1.0);

numDecl = Novo(Nome = "grade_declividade",
               ResX=25,ResY=25,Escala=25000,Min=0,Max=1.0);

// Instanciação da tabela de ponderação de solos
tabSolo = Novo(CategoriaIni="Solos",
               "Latosolo" : 1.0,
               "Podzolico" : 0.7,
               "Litossolo" : 0.3,
               "Hidromorfico": 0.1);
// Ponderar o mapa de solos
NumSolo = Ponderar(solo,tabSolo);

// Transformação da Declividade em escala [0..1]
numDecl = 1 / ( 1 + 0.025 * decl^2 );

// classificacao : solo tem peso maior que a declividade
NumClassif = Novo (Nome = "grade_classif",
                  ResX=25,ResY=25,Escala=25000,Min=0,Max=1.0);
NumClassif = 0.4 * NumDecl + 0.6 * NumSolo;
// Instanciação da tabela de fatiamento
tabfat = Novo(CategoriaFim = "Aptidao",
              [0.0 , 0.33] : "Baixa",
              [0.33 , 0.66] : "Media",
              [0.66 , 1.0] : "Alta");
// Instanciação do PI temático da categoria Aptidao
aptidao = Novo(Nome="aptidao_urbana_media",
               ResX=25,ResY=25,Escala=25000);
// fatiamento da grade
aptidao = Fatiar(NumClassif,tabfat);
}
```

BIBLIOGRAFIA

- ASSAD, E.D.; SANO, E.E. *Sistemas de Informações Geográficas - Aplicações na Agricultura*. Brasília, EMBRAPA, 1998 (2^a. edição).
- BARBOSA, C.C.F.; CAMARA,G.; MEDEIROS, J.S.; CREPANI, E.; NOVO, E.M.L.M. ; CORDEIRO, J.P.C. “Operadores Zonais em Álgebra de Mapas e Sua Aplicação a Zoneamento Ecológico-Econômico”. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Bahia, 1998. Anais, INPE, 1998 (em CD-ROM).
- BERTRAND, G. *Paisagem e Geografia Física Global: Esboço metodológico*. Caderno de Ciências da Terra, 13. Inst. de Geografia-USP. São Paulo. 1971.
- BONHAM-CARTER, G.F. - *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon, Oxford, 1994.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. *Principles of geographical information systems*. Oxford, Oxford University Press, 1998.
- CÂMARA, G. *Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos*. Tese de Doutorado em Computação Aplicada. São José dos Campos, INPE, 1995. www.dpi.inpe.br/teses/gilberto.
- CLEMENTINI, E.; DI FELICE, P.; VAN OOSTEROM, P. “A Small Set of Formal Topological Relationships Suitable for End-User Interaction”. In: Third International Symposium on Spatial Data Handling. Proceedings, Singapore, 1993, pp. 277-295.
- CORDEIRO, J. P.; AMARAL, S.; FREITAS, U.M.; CÂMARA, G. “Álgebra de geo-campos e suas aplicações”. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Salvador. 14-19 de abril. 1996.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G. DUARTE, V. AZEVEDO, L. G.. “Uso de sensoriamento remoto no zoneamento ecológico-econômico”. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Salvador. 14-19 de abril. 1996.
- EGENHOFER, M. “Spatial SQL: A Query and Presentation Language”. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 6:86-95, 1994.
- FREEMAN, J. “The Modelling of Spatial Relations”. *Computer Graphics and Image Processing*, 4: 156-171, 1975.
- GOODCHILD, M. A spatial analytical perspective on geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1 (4): 327-334, 1987.

- GUTING, R.H. An Introduction to Spatial Database Systems. *VLDB Journal*, 3(4), October 1994.
- HARTSHORNE, R. Propósitos e natureza da geografia. São Paulo, Editora HUCITEC, Editora da Universidade de São Paulo, 2. Ed., 1978.
- MAGUIRE, D.; DANGERRAMOND, J. The Functionality of GIS. In: Maguire, D.; Goodchild, M.; Rhind, D. (eds) *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. New York, John Wiley and Sons, 1991, pp. 319-35.
- ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. *Revista do Dpto. de Geografia da FFLCH-USP*. N. 7. pp. 65-74. 1993.
- TOMLIN, D. *Geographic information systems and Cartographic Modeling*. Prentice Hall, New York, 1990.
- TRICART, J. *Ecodinâmica*. IBGE-SUPREN, (Recursos Naturais e Meio Ambiente). Rio de Janeiro. 1977.
- TRICART, J.; KIEWIETDEJONGE, C. *Ecogeography and Rural Management: A Contribution to the International Geosphere-Biosphere Programme*. Essex. Longman Scientific & Technical. 1992.

TÉCNICAS DE INFERÊNCIA GEOGRÁFICA

Gilberto Câmara

Fábio Roque Moreira

Cláudio Barbosa

Raimundo Almeida Filho

Simone Bönisch

9.1 INTRODUÇÃO

Na maioria dos projetos desenvolvidos em SIG a principal proposta é a combinação de dados espaciais, com o objetivo de descrever e analisar interações, para fazer previsões através de modelos, e fornecer apoio nas decisões tomadas por especialistas. A combinação desses dados multi-fonte permitirá uma redução na ambigüidade das interpretações que normalmente são obtidas através da análise individual dos dados (Pendock e Nedeljkovic, 1996).

Este trabalho apresenta uma visão geral das diferentes técnicas de análise geográfica, no contexto de produção de novos mapas a partir de dados já existentes. Serão apresentados vários métodos de inferência espacial para a integração dos dados (evidências). Os métodos geram como resultado planos de informação (geocampos) em diferentes formatos. O método *Booleano* gera dados em formato Temático sendo a potencialidade expressa espacialmente em forma de polígonos que representam classes (favorável e não favorável). Os outros métodos, Média Ponderada, *Fuzzy*, *Bayesiano* e inferência por Redes Neurais, geram dados em formato Numérico sendo a potencialidade expressa de forma numérica.

9.2 MODELOS TEÓRICOS E EMPIRICOS

Do ponto de vista conceitual, os modelos de processos ambientais no contexto de SIG, podem ser descrito como a combinação de um conjunto de dados de entrada através de uma função, produzindo um novo dado de saída.

$$\text{Saída} = f(\text{dados de entrada})$$

A função, f , pode tomar muitas formas diferentes, mas os relacionamentos expressados por esta função são baseados no entendimento **teórico** de princípios físicos e químicos, ou são **empíricos**, baseados em dados observados ou ainda na combinação destes dois anteriores tipos.

Na categoria de **modelos teóricos**, equações de movimento derivadas de princípios mecânicos, são utilizadas em modelos de circulação atmosférica, modelos de fluxo oceânicos e modelos de fluxo de águas subterrâneas. Um modelo de circulação de águas de um lago, por exemplo, usa-se com entrada mapas de profundidade do lago, mapa de declividade do fundo do lago, fluxo de entrada e de saída, etc. e tem-se como resultado, campos de velocidades.

Modelos baseados em relacionamentos estatísticos ou relacionamentos heurísticos, são exemplos de **modelos empíricos**. Nestes modelos, os relacionamentos espaciais entre as variáveis de estudo, são estimados por critérios estatísticos, a partir de amostras uma região experimental, ou a partir de um conjunto de classes, onde os limites destas classes definidos por especialistas.

Modelos para predição de potencial mineral são exemplo de modelos empíricos. Os modelos empíricos podem ser divididos em dois tipos; **modelos baseados em conhecimento** que são implementados a partir do conhecimento de especialistas, e **modelos baseados em dados**, que são implementados a partir de um conjunto de dados observados.

9.3 MODELOS BASEADOS EM CONHECIMENTO

No caso de modelos baseados em conhecimento, dispomos de um conjunto de informação de entrada e uma metodologia que nos permitirá descobrir localizações ou zonas que satisfaçam um conjunto de critérios. Se o critério é definido segundo regras determinísticas, o modelo consiste em aplicar operadores de lógica booleana em um conjunto de dados (mapas) de entrada. O dado de saída é um mapa binários onde cada ponto no mapa, satisfaz ou não as condições do modelo (Bonham-Carter, 1994). Harris (1989) descreve esse modelo como técnica de co-ocorrência aditiva na qual os mapas binários são simplesmente sobrepostos, e as áreas de maior potencialidade à ocorrência mineral são aquelas que apresentam o maior número de interseção de evidências favoráveis definidas pelo modelo.

De um modo alternativo, cada localização pode ser avaliada de acordo com critérios ponderados, que resultam em um patamar (grau) em uma escala de potencialidade (Bonham-Carter, 1994). Essa técnica também é definida como co-ocorrência ponderada (Harris, 1989). Este método tem como vantagem a habilidade de avaliar graus de potencialidade em vez de apenas avaliar presença ou ausência da potencialidade.

A potencialidade é calculada pela ponderação e combinação de evidências de fontes múltiplas. A avaliação do peso a ser atribuído a um mapa depende da análise da importância da evidência em relação a um ocorrência conhecida ou do julgamento subjetivo de especialistas.

9.3.1 CONJUNTOS BOOLEANOS VERSUS CONJUNTOS NEBULOSOS

A introdução dos conjuntos *Fuzzy* para lidar com conceitos inexatos foi primeiramente introduzida por Zadeh em 1965. O conjunto *Fuzzy* é uma metodologia de caracterização de classes, que por varias razões não tem ou não pode definir limites rígidos (bordas) entre classes. Essas classes definidas de maneira inexata são chamadas de conjunto *Fuzzy*. A utilização de um conjunto *Fuzzy* é indicada sempre que se tiver que lidar com ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos (Burrough & McDonnell, 1998).

Para caracterizar formalmente um conjunto, pode-se recorrer ao conceito de *função de pertinência* (Fp). Onde função de pertinência, é uma função que dado o valor de um atributo z, ela determina se o elemento avaliado pertence ou não a um determinado conjunto em análise.

A figura 9.1 mostra exemplos de funções de pertinência que podem ser usadas para classificação de qualquer tipo de entidade. No eixo x, esta a variação do atributo (z) dos elementos, usado como parâmetro para classificação. No eixo y, esta a faixa de valores possíveis para a função de pertinência (Fp). Na Figura 9.1a, se o valor do atributo z estiver entre limiar inferior (L_i) e o limiar superior (L_s), a função retorna 1, caso contrario retorna zero, conforme mostra a equação 9.1. Para a Figura 9.1b, a função retorna um valor entre 0 e 1, se o valor do atributo z estiver entre limiar inferior (L_i) e o limiar superior (L_s). Na Figura 9.1b, a região entre (L_{f_i}) e (L_s). é denominada de *zona de transição*.

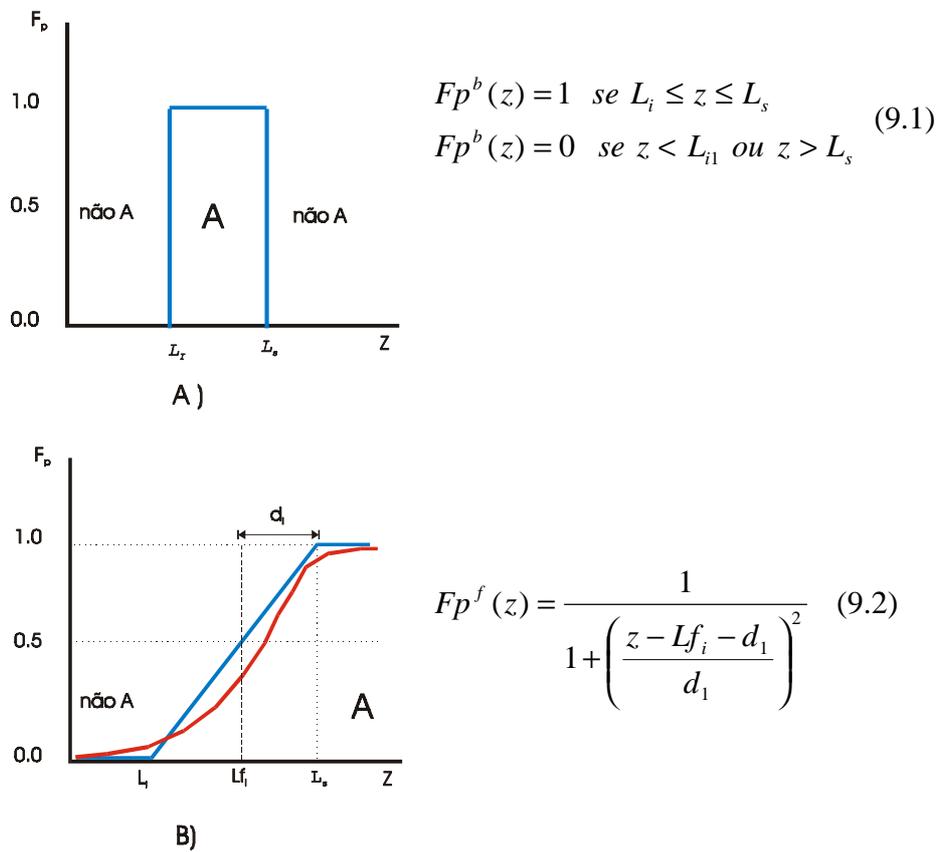


Fig. 9.1 – Exemplo de função de pertinência para conjunto

Um conjunto *booleano*, possui uma função de pertinência similar ao da Figura 9.1a, ou seja, seus limiares são definidos de forma nitida. Por exemplo, se um especialista em qualidade de água determinar que os limiares entre água *não poluída*, *moderadamente poluída* e *poluída* são: $Lb_i = 200$ unidades e $Lb_s = 500$

unidades, então a função de pertinência $Fp^b(z)$, eq: 9.1, define a classe de água *moderadamente poluída*.

Um conjunto que tem uma função de pertinência como a da Figura 9.1b, é denominado de *conjunto fuzzy*. Um conjunto deste tipo, tem como característica a indefinição de fronteiras ou limiares entre as classes. Por exemplo, o conjunto de classes de solo, de cobertura vegetal ou o caso de altura de pessoas citado na seção anterior, são exemplos de conjuntos que podem ser denominados de *conjuntos fuzzy*. A figura 9.2 ilustra a diferença de fronteiras entre conjuntos booleano e conjuntos fuzzy.

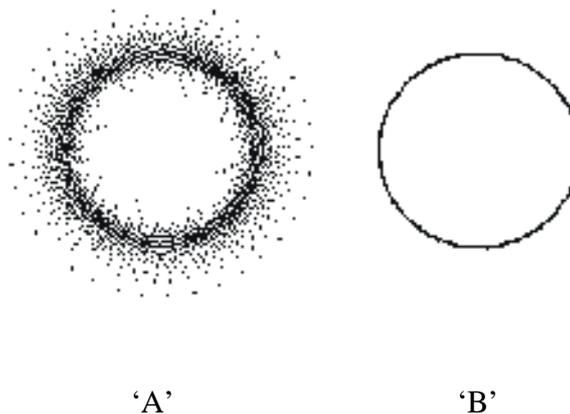


Fig. 9.2 – Diagrama de Venn ilustrando a diferença de fronteira entre um conjunto fuzzy (A) e um conjunto booleano (B)

FONTE: Burrough(1998)

Matematicamente, um conjunto fuzzy pode ser definido como: Dado o universo de amostras ou objetos 'Z', um conjunto fuzzy 'A' neste universo 'Z' é um conjunto de pares ordenados:

$$A = (z, FP_A^F(O_z)) \quad \text{para todo } O_z \in Z. \quad (9.3)$$

Onde $FP_A^F(O_z)$ é a função de pertinência fuzzy do conjunto 'A'. O valor da função $FP_A^F(O_z)$ pode ser entendido como o grau de compatibilidade do objeto O_z com o conjunto 'A', sendo que o objeto O_z pertence ao universo 'Z' (O_z

$\in Z$). A função $FP_A^F(O_z)$ é um número entre 0 e 1, assumindo o valor 1 quando o grau de compatibilidade entre o conjunto 'A' e o objeto O_z for completa, assumindo um valor entre 1 e 0 quando este grau de compatibilidade não for total, e assumindo o valor 0 quando não houver nenhuma compatibilidade entre o objeto e o conjunto em análise.

Segundo Burrough e McDonnell (1998), há diferentes tipos de funções de associação *fuzzy*, sendo as mais comuns as funções linear e senoidal. A função linear é dada por um par de linhas inclinadas que se encontram no ponto central de A, com MF=1; e nas bordas MF assume valor 0,5 (Figura 9.3b). A inclinação das linhas define a largura da região de transição *fuzzy*.

A função senoidal (Figura 9.3c) é definida por (eq: 9.4):

$$MF_A^F(z) = \frac{1}{(1 + a(z - c)^2)} \text{ para } 0 \leq z \leq P$$

onde o parâmetro a determina a forma da função e c , o valor de z no ponto central de A.

Em alguns casos é apropriado estender o ponto central de A para um intervalo de valores, substituindo o parâmetro a por uma região de transição de largura d_1 e d_2 , para definir a forma da função de associação *fuzzy* (Figura 9.3d). Neste caso, a $MF_A^F(z)$ é definida como (eq: 9.5):

$$MF_A^F(z) = \frac{1}{1 + \left(\frac{z - b_1 - d_1}{d_1} \right)^2} \text{ se } z < b_1 + d_1$$

$$MF_A^F(z) = 1 \text{ se } b_1 + d_1 \leq z \leq b_2 - d_2$$

$$MF_A^F(z) = \frac{1}{1 + \left(\frac{z - b_2 + d_2}{d_2} \right)^2} \text{ se } z > b_2 - d_2$$

Os valores de d_1 e d_2 correspondem à metade da largura da região de transição e, as bordas b_1 e b_2 recebem MF=0,4.

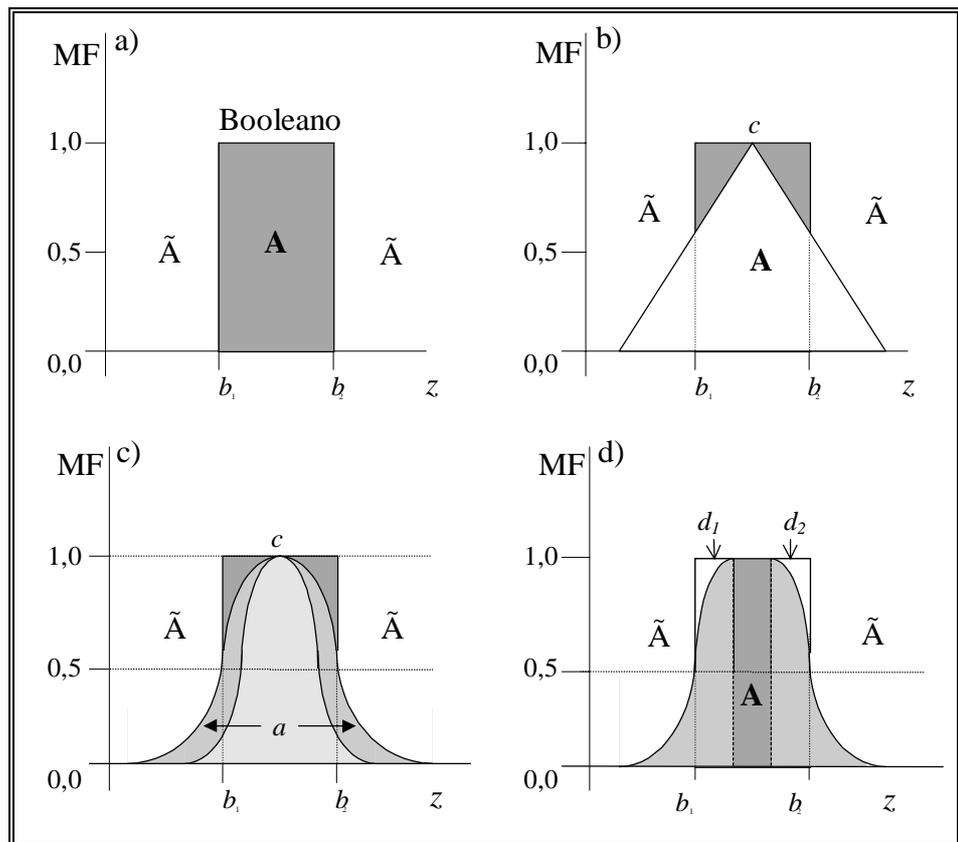


Figura 9.3 - Funções de associação Booleana e Fuzzy

FONTE: Burrough e McDonnell (1998).

A escolha dos valores d_1 e d_2 que determinam a largura da região de transição pode ser baseada na precisão de medida do atributo do fenômeno, ou do objeto em questão, ou ainda no conhecimento intuitivo subjetivo.

9.3.2 INFERÊNCIA BOOLEANA

O Modelo *Booleano* envolve combinação lógica de mapas binários através de operadores condicionais. Cada mapa utilizado como uma condição pode ser entendido como um plano de informação (evidência). Os vários planos de informação são combinados para dar suporte a uma hipótese ou preposição. Cada localização é então testada, para determinar se as evidências nesse ponto satisfazem ou não as regras definidas pela hipótese .

O resultado é expresso de forma binária, “0” (hipótese não satisfeita) e “1” (hipótese satisfeita), não sendo possível a condição talvez. Embora esse método seja prático, normalmente não é o mais adequado, pois o ideal é que as evidências, que apresentam importância relativa diferente, recebam pesos de diferentes valores e não sejam tratadas igualmente como acontece.

A álgebra *booleana* utiliza os ponderadores lógicos “E”, “OU”, “Exclusivo OU (XOR)” e “NÃO” para determinar se uma hipótese satisfaz ou não uma particular condição. Para melhor entendimento, imagine cada atributo como um conjunto (figura 9.4). O operador “E” retorna a interseção entre dois ou mais conjuntos ,ou seja as entidades que pertencem tanto ao conjunto A e B. O operador “OU” retorna a união dos conjuntos, que são entidades que pertencem tanto ao conjunto A como ao B. O “XOR” recupera as entidades que pertencem a um conjunto e ao outro, mas não aos dois conjuntamente. E o “NÃO” é o operador da diferença identificando as entidades que pertencem a um conjunto A mas não ao B.

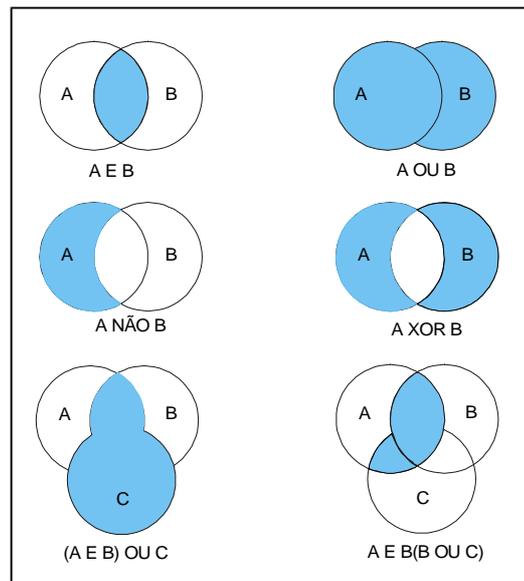


Figura 9.4 – Diagrama de Venn mostrando os resultados da aplicação de operadores de lógica *booleana* para dois ou mais conjuntos (Burrough & McDonnell, 1998).

O apelo da abordagem *Booleana* é sua simplicidade. A combinação lógica de mapas em GIS é diretamente análoga a sobreposição de “overlayers” de mapas em uma mesa de luz, método este tradicionalmente utilizado por geólogos. Em casos onde limiares de corte foram estabelecidos por lei ou por códigos, combinações Booleanas são abordagens práticas e de fácil aplicação. Na prática, entretanto, normalmente não é indicado a atribuição de importâncias iguais para cada critério a ser combinado. Evidências precisam ser ponderadas dependendo da sua importância relativa (Bonham-Carter, 1994).

9.3.3 MÉDIA PONDERADA

Dentre os métodos de análise multi-critério Eastman et al. (1995) cita a Média Ponderada como a técnica mais utilizada em projetos que envolvam análise espacial. Neste método cada mapa de entrada será utilizado como uma evidência que receberá um peso diferente dependendo da importância para com a hipótese sobre consideração. Neste caso cada plano de informação receberá pesos diferentes, bem como as respectivas classes dos planos de informação. O resultado será um mapa com áreas que expressam um grau de importância relativa através dos valores numéricos de saída.

O primeiro passo para a aplicação do método é a ponderação das classes de cada plano de informação segundo pesos definidos empiricamente. Os planos de informação ponderados são então somados através de uma soma ponderada onde

cada plano de informação recebeu pesos segundo sua importância relativa. A função matemática é expressa por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ij} * y_i}{\sum_{i=1}^n y_i}, \text{ onde } w_{ij} \text{ é o peso da classe "i" do plano de informação "j", e } y_j \text{ o}$$

peso do plano de informação "j".

O método de Média Ponderada permite uma maior flexibilidade na combinação de mapas do que o método *Booleano*. O mapa ponderado pode ser ajustado para refletir o julgamento de um especialista, segundo os pesos de importância definidos para cada critério. A maior desvantagem deste método, entretanto, recai provavelmente no caráter linear de adição das evidências (Bonham-Carter, 1994).

9.3.4 INFERÊNCIA FUZZY

Assim como em conjuntos Booleanos, dados em conjuntos fuzzy podem ser manipulados utilizando métodos lógicos para selecionar e combinar dados provenientes de vários conjuntos. Para que isto seja possível, linguagens de consulta a sistemas gerenciadores de bancos de dados, precisam ser modificadas para tratar operações da lógica contínua. As operações básicas sobre subconjuntos fuzzy são similares e são uma generalização das operações básicas da lógica binária. Estas operações podem ser utilizadas de forma a se obter um dado resultante (mapa) da sobreposição de vários dados fuzzy (planos de Informação). Os seguintes operadores fuzzy: AND, OR, Soma Algébrica, Produto Algébrico, Operador Gama e Soma Convexa, que serão detalhados a seguir.

a) Fuzzy AND (interseção)

Esta operação equivale ao AND Booleano. A interseção significa uma sequência de "E" e é obtida através do operador MIN.

$$\mu = \text{MIN} (\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots),$$

onde μ_a , μ_b , e μ_c são valores de pertinência dos mapas A, B e C, para uma dada localização.

b) Fuzzy OR (União)

Fuzzy OR é como o OR Booleano, onde o valor de pertinência de saída é controlado pelos valores máximos dos mapas de entrada de cada localização e é dado por :

$$\mu = \text{MAX} (\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots)$$

c) Produto Algébrico Fuzzy

A função de pertinência combinada, neste caso, é dada por:

$$\mu = \prod \mu_i$$

onde μ_i é o valor de pertinência fuzzy para o i-ésimo mapa e $I = 1, 2, \dots, n$, mapas que deverão ser combinados. Os valores de pertinência tendem a ser muito pequenos quando se utiliza este operador, devido ao efeito de se multiplicar diversos números menores do que 1.

d) Soma Algébrica Fuzzy

Este operador é complementar ao produto Algébrico Fuzzy, e é representado por:

$$\mu = 1 - \prod (1 - \mu_i)$$

O resultado desta operação é sempre um valor maior ou igual ao maior valor de pertinência fuzzy de entrada. O efeito desta operação é, portanto, de aumentar o valor de pertinência. Observa-se que, enquanto o produto algébrico Fuzzy é um produto algébrico, a soma algébrica Fuzzy, não é uma simples soma algébrica.

e) Operador *gama*

Este operador é definido por dois termos, um produto algébrico *Fuzzy* e uma soma algébrica *Fuzzy*. Este operador é expresso pela função:

$$\mu = (\text{soma algébrica Fuzzy})^\gamma \times (\text{produto algébrico Fuzzy})^{1-\gamma}$$

O produto algébrico *Fuzzy* é expresso pela função,

$$\mu = \prod_{i=1}^n \mu_i, \quad \text{onde } \mu_i \text{ representa o valor do membro Fuzzy para um plano de informação "i".}$$

O operador executa a multiplicação dos membros dos diferentes planos de informação ($i= 1,2,3,\dots$), sendo que o valor de saída de um dado ponto é sempre menor ou igual ao valor do menor membro *Fuzzy*. Isto ocorre devido a multiplicação de valores iguais ou menores que 1.

A soma algébrica *Fuzzy* é definida pela função:

$$\mu = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$
, onde o termo μ_i representa o valor dos membros *Fuzzy* para um plano de informação “i”. O operador executa a multiplicação do termo $(1 - \mu_i)$. Na soma algébrica o resultado é sempre maior ou igual ao valor de entrada do maior membro *Fuzzy* (μ_i).

No operador gama pode-se variar a importância de cada termo (soma algébrica e produto algébrico *Fuzzy*). A importância de cada termo no operador gama é definida atribuindo-se valores entre (0,1) para o expoente “ γ ”. Esta distribuição de importância é melhor entendida através da figura 9.5.

No gráfico da figura 9.5 pode-se observar que quando o gama for igual a $\gamma=0$, o resultado dependerá apenas do termo “produto algébrico *Fuzzy*”, e quando $\gamma=1$, o resultado dependerá apenas do termo “soma algébrica *Fuzzy*”. Os valores de gama entre $0 < \gamma < 0,35$ apresentaram um caráter “diminutivo”, ou seja sempre menor ou igual que o menor membro *Fuzzy* de entrada (μ_i). Na outra extremidade do gráfico valores gama entre $0,8 < \gamma < 1,0$ terão um caráter “aumentativo” onde o valor de saída será igual ou maior que o valor do maior membro *Fuzzy* de entrada (μ_i). Por fim, para os valores de gama entre $0,35 < \gamma < 0,8$, os μ_i não apresentaram nem um caráter “aumentativo” nem “diminutivo”, os valores dos μ_i de saída, cairão sempre entre o menor e o maior valor dos μ_i de entrada (Bonham-Carter, 1994).

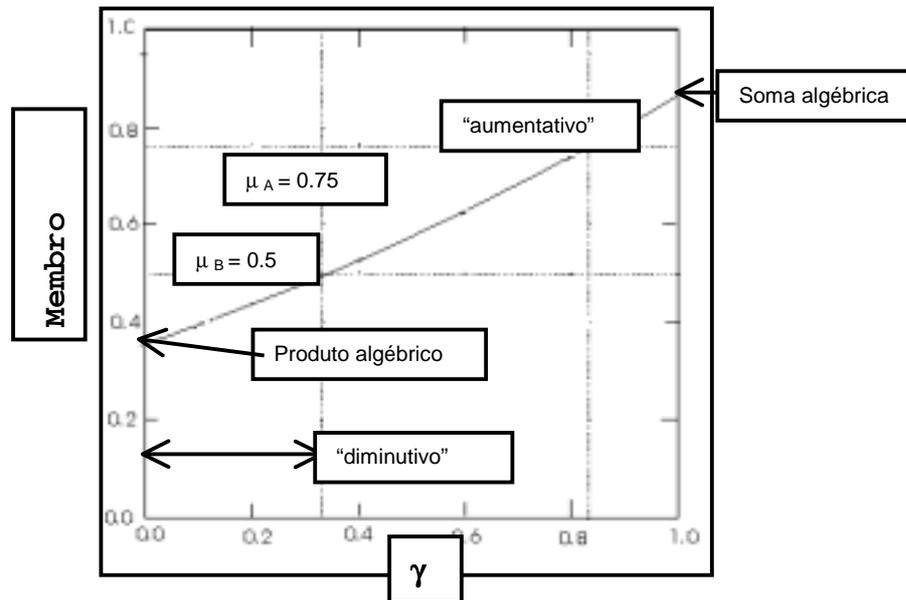


Figura 9.5 – Gráfico de distribuição da função *Fuzzy Gama*. Modificado: Bonham-Carter (1994).

9.4 MODELOS EMPÍRICOS BASEADOS EM DADOS.

Até este ponto, discutimos os modelos baseados em conhecimento, onde a importância (peso) e limites dos atributos eram definidos baseado na experiência de especialistas. Quando os dados disponíveis são suficientes para que se possa estimar a contribuição de determinados atributos no processo de modelagem, recorre-se a métodos estatísticos que são aplicados sobre estes dados, daí o nome de modelos empíricos baseado em dados. Apresentaremos a seguir a abordagem bayesiana, conhecida como evidências de pesos.

9.4.1 MÉTODOS BAYESIANOS – CONCEITOS BASICOS

Na abordagem bayesiana, os principais conceitos envolvidos são a probabilidade a priori e a probabilidade a posteriori. Para introduzirmos o conceito de probabilidade a priori e posteriori, suponha que um indivíduo deseje estimar a probabilidade de que ocorra chuva no dia seguinte, e que para isto, ele tenha em mãos um histórico sobre chuvas na região nos últimos 20 anos, e que ele conclua, a partir do histórico, que em média chove 80 dias por ano na região. Com esta informação, seria uma estimativa razoável dizer que a *probabilidade a priori* de que vai chover no dia seguinte é 80/365. Pode-se refinar esta estimativa com outros dados históricos, como por exemplo a época do ano. Com isto teríamos a probabilidade de chuva no dia seguinte, dado que estamos em uma determinada época do ano, ou seja, a probabilidade seria modificada por um fator que varia com o mês do ano. Esta nova probabilidade é denominada *probabilidade a posteriori* ou probabilidade condicional de chuva dado a época do ano. Este fator multiplicativo pode também ser determinada a partir de dados históricos. Colocando isto na forma de uma expressão temos:

$$P\{\text{chuva}/\text{época do ano}\} = P\{\text{chuva}\} * \text{Fator}_{\text{época do ano}} \quad (9.6)$$

onde:

$P\{\text{chuva}\}$	probabilidade a priori
$P\{\text{chuva}/\text{época do ano}\}$	probabilidade a posteri

Outros fatores que também afetam a possibilidade de chuva no dia seguinte, são : choveu ontem, choveu hoje. Estes fatores são evidências, que contribuem para refinar a estimativa de chuva no dia seguinte. Eles podem ser combinados conforme a expressão abaixo:

$$P\{chuva|evidencia\} = P\{chuva\} * Fator_{\text{época do ano}} * Fator_{\text{dia anterior}} * Fator_{\text{dia corrente}}$$

(9.7)

Algumas evidências podem aumentar da probabilidade a posteriori, em relação a probabilidade a priori, neste caso o fator é maior do que 1, em outros casos este fator reduzir a probabilidade, e neste caso ser menor do que 1.

Consideremos o problema de se encontrar depósitos de um determinado mineral em uma região que possui uma área de 10.000 km², e que já tenham sido identificados nesta região 200 depósitos. Para efeito de análise, cada depósito ocupa uma unidade de área ou célula de 1 km². Se particionarmos a nossa região de estudo em unidades geográficas com área de 1 km², nosso universo de estudo terá 10.000 unidades. Usando a notação N{ } para representar a contagem de unidades, teremos: N{R} = 10.000 unidades de área e N{D} = 200 depósitos conhecidos com área de 1 km². A densidade média de depósitos conhecidos na região é N{D}/N{T}, ou 200/10000=0.02, assumindo que cada unidade de área só contém um depósito. O valor 0.02 pode ser interpretado como a probabilidade de ao se apontar aleatoriamente uma célula na região, ela ser uma célula que contém depósito mineral. Não existindo outras informações disponíveis sobre a área, esta razão N{D}/N{T} pode ser usada como a probabilidade a priori P{D} de se encontrar um depósito na região analisada. Suponhamos que, surja alguém de posse de um mapa de anomalia magnética para a mesma região, e que 180 dos 200 depósitos conhecidos ocorram dentro da área de anomalia. A Figura 9.6 ilustra esta situação.

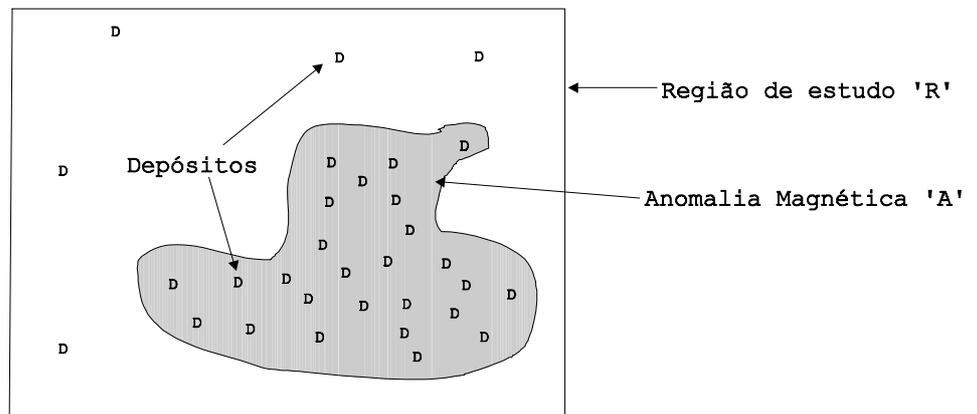


Fig. 9.6 – Região de estudo R sobreposta a um mapa binário de anomalia magnética .

A partir da constatação de que 180 dos 200 depósitos estão dentro da área de anomalia, pode-se afirmar que a probabilidade de depósito em uma célula que esteja dentro da área de anomalia é maior do que 0.02, e que esta probabilidade poderá ser menor do que 0.02 para uma célula fora da área de anomalia. A condição favorável para se encontrar um depósito dado a presença de evidências pode ser expressada por uma probabilidade condicional:

$$P\{D/A\} = \frac{P\{D \cap A\}}{P\{A\}} \quad (9.8)$$

Onde $P\{D/A\}$ é a probabilidade condicional de um depósito 'D' dado que a célula está dentro da área de anomalia 'A'. O numerador $P\{D \cap A\}$ é igual a proporção da área total onde ocorre simultaneamente depósito e anomalia ou $P\{D/A\} = N\{D \cap A\}/N\{T\}$. De maneira similar, $P\{A\} = N\{A\}/N\{T\}$, onde $P\{A\}$ e $N\{A\}$ são respectivamente a probabilidade e a área da anomalia 'A'. Substituindo na equação 9.8 tem-se:

$$P\{D/A\} = \frac{N\{D \cap A\}}{N\{A\}} \quad (9.9)$$

A partir do diagrama de Venn apresentado na Figura 9.7 vemos que a probabilidade condicional é a proporção da área de anomalia 'A' ocupada por depósitos conhecidos. No nosso exemplo, existe 180 depósitos dentro da área de anomalia, e a área de anomalia ocupa 3600 km², assim sendo, a probabilidade condicional de depósitos dada a presença de anomalia magnética é 180/3600=0.05, que é duas vezes e meia maior do que a probabilidade a priori. Usando-se esta evidência, a exploração de novos depósitos do mesmo tipo, será muito mais eficiente e com uma área de pesquisa reduzida de 10.000 km² para 3.600 km².

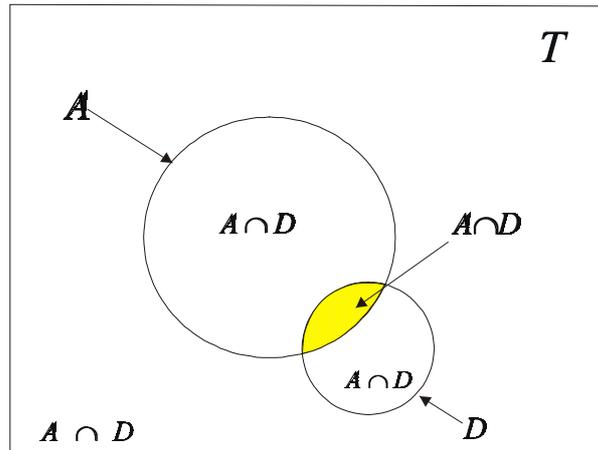


Fig. 9.7 – Diagrama de Venn mostrando a relação de sobreposição espacial entre anomalia magnética e ocorrência de depósitos mineral .

Conforme apresentado na equação 9.8, podemos obter uma expressão relacionando a probabilidade a posteriori de depósitos em termos da probabilidade a priori mais um fator multiplicativo. Para isto, notemos que a probabilidade condicional de uma célula estar na região de anomalia magnética 'A', dado que esta célula contém um depósito é:

$$P\{A/D\} = \frac{P\{A \cap D\}}{P\{D\}} \quad (9.10)$$

No nosso exemplo ilustrado nas Figuras 9.6 e 9.7, $P\{A/D\} = 180/200 = 0.9$. Da teoria da probabilidade sabemos que $P\{A \cap D\}$ é a mesma de $P\{D \cap A\}$, combinando as equações 9.8 e 9.10 obtemos a equação 9.11 :

$$P\{D/A\} = P\{D\} \frac{P\{A/D\}}{P\{A\}} \quad (9.11)$$

A equação 9.11 nos diz que: A probabilidade a posteriori de um depósito, dado que a célula esta na área de anomalia é igual a probabilidade a priori de depósito $P\{D\}$ multiplicado pelo fator $P\{A/D\}/P\{A\}$. O numerador deste fator é 0.9, conforme calculamos no parágrafo anterior e o denominador é $3600/10000 = 0.36$, ou seja, o fator é $0.9/0.36 = 2.5$. Podemos concluir que dado a presença de anomalia magnética, a probabilidade de depósito é 2.5 vezes maior do que a probabilidade a priori. Substituindo estes valores na equação 9.11, obtemos: $P\{D/A\} = 0.2 * 2.5 = 0.05$, que é igual a calculada anteriormente pela equação 9.9. No fator multiplicativo $P\{A/D\}/P\{A\}$, a informação sobre o numerador $P\{A/D\}$ pode ser obtida a partir de uma análise sobre os depósitos, onde se busca

determinar a proporção deles que estão relacionados com um determinado indicador de evidência. O denominador, pode ser determinado a partir do conhecimento da ocorrência esperada do indicador de evidência na região analisada.

Uma expressão similar a anterior, pode ser obtida para a probabilidade a posteriori da ocorrência de um depósito, dada a ausência da anomalia.

$$P\{D/\bar{A}\} = P\{D\} \frac{P\{\bar{A}|D\}}{P\{\bar{A}\}} \quad (9.12)$$

Onde: $P\{\bar{A}\} = (10000-3600)/10000=0.64$, $P\{\bar{A}|D\}=20/200=0.1$, que resulta em um fator de multiplicação $P\{\bar{A}|D\}/P\{\bar{A}\}=0.1/0.64=0.15625$. Podemos assim concluir que a probabilidade a posteriori da ocorrência de depósitos em posições onde não há anomalia magnética é 0.15625 vezes menor do que a probabilidade a priori. No nosso exemplo $P\{D/\bar{A}\}=0.2*0.15625=0.003125$. Então, baseado em uma única fonte de evidência, podemos reduzir a área de pesquisa de 10.000 km² para 3600 km², porque a chance de se encontrar depósito onde não há anomalia é significativamente menor(50 vezes) do que onde há anomalia.

9.4.2 MÉTODOS BAYESIANOS – APLICAÇÃO A GEOPROCESSAMENTO

Um dos usos mais importantes da inferência bayesiana em Geoprocessamento se dá no caso de geração de mapas de prospecção mineral. Em termos prospectivos pode-se pensar na definição da probabilidade de um depósito ocorrer, condiciona pela ocorrência de uma certa evidência (exemplo: litologia favorável).

A probabilidade à *priori* seria a probabilidade do dado bruto, ou seja a probabilidade da ocorrência mineral para com a área total. A probabilidade à *posteriori* seria um refinamento do conhecimento (probabilidade à *priori*), onde através de uma ou mais evidências, que possuem uma relação direta com a mineralização, calcula-se o aumento das chances de sucesso no encontro de um novo depósito mineral. Ou seja, dado que se está pesquisando sobre uma evidência favorável, determina-se quanto esta condição aumenta as chances da descoberta de um novo depósito mineral.

A probabilidade a *priori* para a presença de um dado pode ser estimada por modelos simples de distribuição espacial aleatória ou por análises estatísticas multivariadas (Agterberg, 1989). Os dados para o cálculo da probabilidade à *posteriori* podem ser obtidos através da tabulação cruzada, entre o plano de

informação com os depósitos e os planos de informação com as evidências. Para isso é necessário que os planos de informação das evidências sejam antes transformados em mapas binários, subdivididos em classes favorável e não favorável.

Com os mapas binários gerados, faz-se a tabulação cruzada das evidências com os depósitos (verdades de campo) obtendo-se assim uma matriz onde cada célula " m_{ij} " corresponde a interseção das classes das evidências com as ocorrências minerais. Esses valores são utilizados nas formulações para a obtenção das probabilidades à *posteriori* (Figura 9.7).

Bonham-Carter (1994) propõe ainda outro tipo de formulação, expressa pelo cálculo da chance à *priori* $O(d)$ e da chance à *posteriori* $O(d/e)$. Esta formulação permite a integração de diferentes evidências como fatores explicativos para a ocorrência mineral.

A chance à *priori* é expressa por:

$$O(d) = \frac{p(d)}{(1 - p(d))}, \quad (9.13)$$

onde $p(d)$ é probabilidade a *priori*.

A chance à *posteriori* é obtida a partir do desenvolvimento da probabilidade à *posteriori*. O desenvolvimento esta apresentado abaixo:

$$p(d | e) = \frac{p(d) * p(e | d)}{p(e)} \quad (9.14)$$

$$p(\sim d | e) = \frac{p(\sim d) * p(e | \sim d)}{p(e)} \quad (9.15)$$

Substitui-se $p(\sim d/e)$ nos dois termos da equação $p(d/e)$:

$$\frac{p(d | e) = p(d) * p(e | d)}{p(\sim d | e) p(\sim d | e) * p(e)}$$

$$\frac{O(d|e) \quad O(d) \quad 1}{P(d|e) = \cancel{p(d)} * \cancel{p(e|d)} * \cancel{p(e)}}{\cancel{p(\sim d|e)} \cancel{p(\sim d)} * \cancel{P(e|\sim d)} * p(e)}$$

$$O(d | e) = \frac{O(d) * p(e | d)}{p(e | \sim d)} \quad (9.16)$$

A razão $p(e|d) / p(e|\sim d)$ é chamada de *razão de suficiência* (LS).

De modo semelhante obtêm-se a chance da ocorrência do minério, dado a ausência da evidência.

$$O(d | \sim e) = \frac{O(d) * p(\sim e | d)}{p(\sim e | \sim d)} \quad (9.17)$$

A razão $p(\sim e|d) / p(\sim e|\sim d)$ é chamada *razão de necessidade* (LN).

As razões de suficiência (LS) ou de necessidade (LN) são computadas dependendo da presença ou ausência da evidência para um dado ponto. As razões de suficiência e de necessidade são obtidas através da tabulação cruzada dos planos de informação das evidências com o plano de informação das ocorrências minerais.

A condição de suficiência de uma evidência (e) é satisfeita quando a probabilidade de existência do depósito (d) é maximizada ($P(e | d) = \text{máximo}$). A condição de necessidade da evidência é satisfeita quando a probabilidade de não ocorrência do depósito é maximizada com a não existência da evidência ($P(\sim d | \sim e) = \text{máximo}$) (Rostirolla, 1997).

Extraindo-se o Logaritmo das equações (1) e (2) acima obtêm-se:

$$\log[o(d | e)] = \log[o(d)] + \omega^+$$

$$\log[o(d | \sim e)] = \log[o(d)] + \omega^-$$

Bonham-Carter (1994) demonstra ainda que para um número maior de evidências, estas seriam integradas através da formulação que computaria a chance à priori, somada à somatória dos logaritmos das razões de suficiência e/ ou

necessidade. Sendo necessário porém que as evidências consideradas apresentem uma independência condicional (Agterberg, 1989).

$$\log[o(d | e)] = \log[o(d)] + \sum_{i=1}^n \omega_i^+$$

$$\log[o(d | \sim e)] = \log[o(d)] + \sum_{i=1}^n \omega_i^-$$

Esta soma das razões de suficiência e razão de necessidade pode ser efetuada a partir de uma operação matemática condicional, controlada pela presença ou ausência da classe favorável do plano de informação para todos os pontos de interesse.

$$\mu_n = \log[o(d)] + \sum_{i=1}^n ((\mu_i = \text{favorável}) ? \omega_i^+ : \omega_i^-)$$

A partir do plano de informação da chance à *posteriori* gerado, é aplicada uma expressão matemática para a geração do plano de informação com os valores de probabilidade à *posteriori*.

$$p(d | e) = \frac{o(d | e)}{1 + o(d | e)}$$

O resultado final é uma grade regular com valores de "z" indicando a probabilidade à *posteriori* da ocorrência mineral. Essa grade pode ser então fatiada em faixas que expressarão o grau de probabilidade à ocorrência de novos depósitos.

9.5 REDES NEURAS ARTIFICIAIS

Redes Neurais Artificiais são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência (Carvalho,1999). O processamento em redes neurais ocorre na sua maioria de modo paralelo diferentemente da computação convencional, que apresenta processamento seqüencial

Uma rede neural artificial é composta por vários elementos de processamento (EP). Esses elementos geralmente são conectados por canais de comunicação que estão associados a determinados pesos. Os pesos são coeficientes adaptativos da rede que determinam a intensidade dos sinais de entrada, ou seja são medidas de força de conexão (Nelson e Illingworth, 1991). Os elementos fazem operações apenas sobre seus dados locais, que são as entradas recebidas pelas suas conexões. O comportamento inteligente de uma Rede Neural Artificial vem das interações entre EP da rede.

As arquiteturas neurais são na maioria das vezes organizadas em camadas, com EP's que podem estar conectados aos EP's da camada posterior (Figura 9.8). Usualmente as camadas são classificadas em três grupos:

- Camada de Entrada: onde os sinais (padrões) são apresentados à rede;
- Camadas Intermediárias ou Escondidas: onde é efetuada a maior parte do processamento, através das conexões ponderadas;
- Camada de Saída: onde o resultado final é concluído e apresentado.

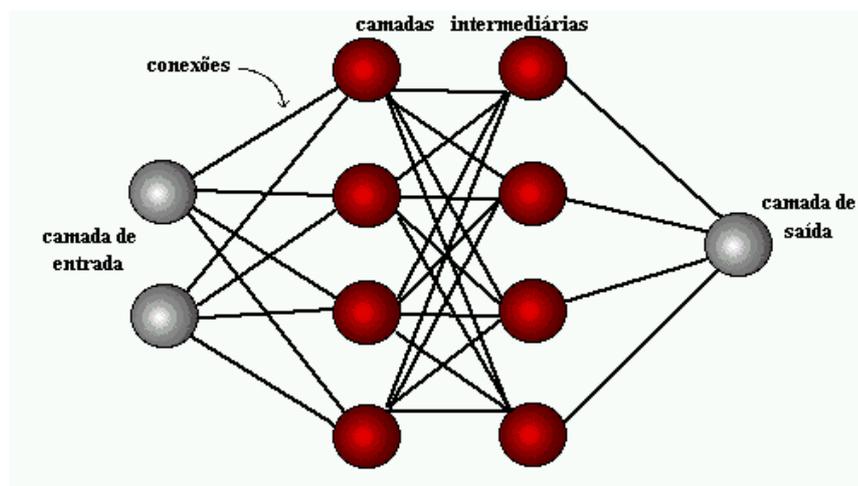


Figura 9.8 – Organização em camadas de uma rede neural. Fonte (Carvalho, 1999).

A operação de um EP pode ser entendida da seguinte maneira: sinais são apresentados à entrada; cada sinal é multiplicado por um peso, que indica a sua influência na saída da unidade; é efetuada a soma ponderada dos sinais que produz um nível de atividade; se este nível de atividade exceder um certo limite a unidade produz uma determinada resposta de saída.

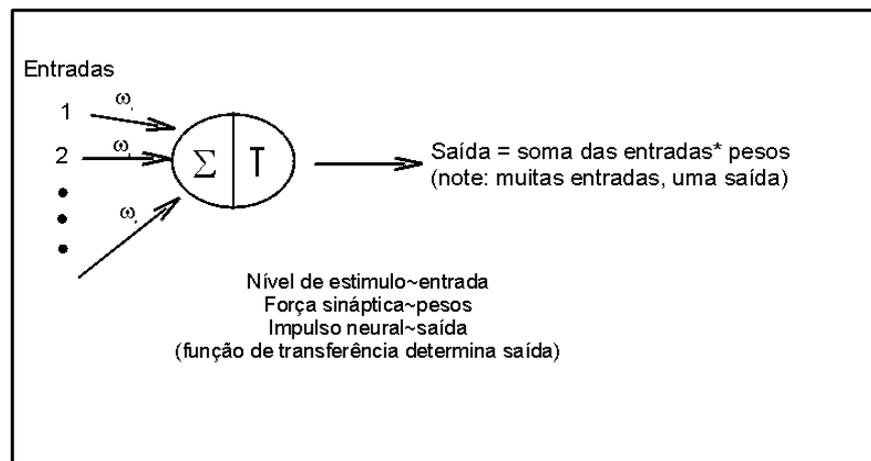


Figura 9.9 – Elemento de processamento – função de soma. Modificado: Nelson e Illingworth, 1991.

Matematicamente pode-se pensar nas entradas e nos pesos como vetores (i_1, i_2, \dots, i_n) e (w_1, w_2, \dots, w_n) . É efetuada a multiplicação de cada componente i_n pelo correspondente w_n , e posteriormente a soma de todos os produtos (Figura 9.9). No resultado é aplicada uma função de transferência (função de ativação) que geralmente é não-linear (Figura 9.10). As funções lineares na prática mostram-se pouco eficientes pois fornecem simplesmente saídas proporcionais as entradas. As funções mais utilizadas são as *Hard limiter*, *Ramping function* e sigmóide, sendo as sigmóides as mais utilizadas devido ao seu caráter contínuo (Nelson e Illingworth, 1991).

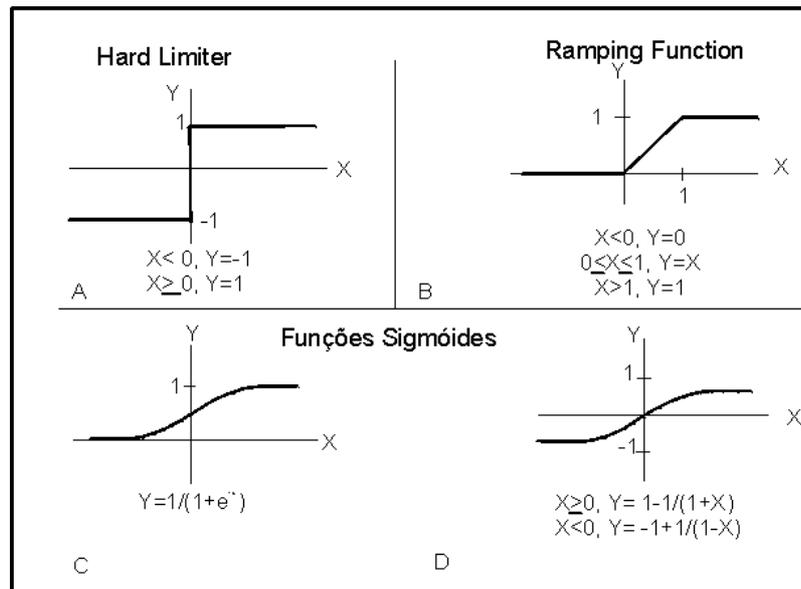


Figura 9.10 – Exemplos de funções de transferência. Modificado: Nelson e Illingworth (1989).

A maioria dos modelos de redes neurais possui alguma regra de treinamento, onde os pesos de suas conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados (sinais). Em outras palavras, elas aprendem através de exemplos. Os sinais podem ser positivos (excitadores) ou negativos (inibidores). Uma entrada positiva promove o disparo de um EP, enquanto a negativa tende a manter o EP inerte.

A propriedade mais importante das redes neurais é a habilidade de aprender e com isso melhorar o seu desempenho. Isso é feito através de um processo iterativo de ajustes aplicado a seus pesos, o treinamento. O aprendizado é efetuado através de algoritmo de aprendizado que são um conjunto de regras bem definidas para a solução de um determinado problema. Existem muitos tipos de algoritmos de aprendizado específicos para determinados modelos de redes neurais. O aprendizado ocorre quando a rede neural atinge uma solução generalizada para uma classe de problemas.

As formas de aprendizado podem ser subdivididas em: supervisionadas; não supervisionadas; e por reforço. No aprendizado supervisionado são apresentadas à rede um conjunto de padrões de entrada e seus correspondentes padrões de saída. Durante os processos sucessivos, a rede realiza um ajustamento dos pesos das conexões entre os elementos de processamento, segundo alguma lei de aprendizado (algoritmo), até que o erro entre os padrões de entrada e saída esteja abaixo de um valor mínimo desejado (Figura 9.11). Dentre os algoritmos de aprendizado supervisionado os mais utilizados são *Perceptron*, *Adeline* e *Madaline*, *Backpropagation* (Hetch-Nielsen, 1989). O aprendizado por reforço é

similar ao supervisionado com a diferença que um crítico externo avalia a resposta fornecida pela rede (Carvalho, 1999).

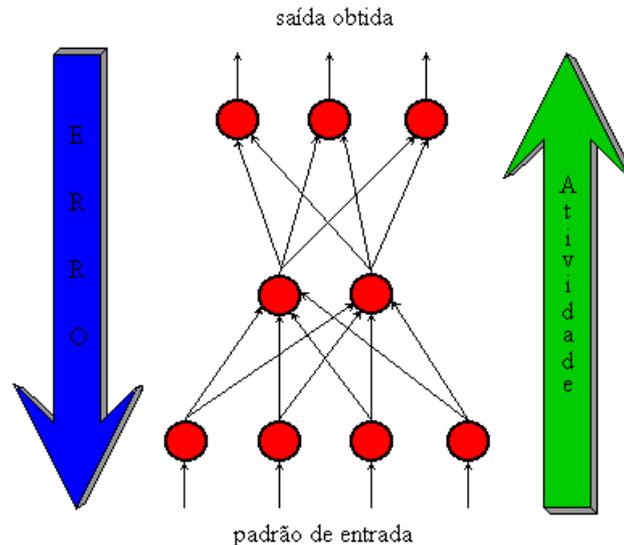


Figura 9.11 – Exemplificação do processo de aprendizado. Fonte: Carvalho (1999).

No aprendizado não-supervisionado a rede analisa os conjuntos de entradas apresentadas e determina algumas das propriedades dos conjuntos de dados e aprende a refletir sobre suas propriedades de saída. Os métodos de aprendizado mais utilizados são Mapa Auto-Organizável de Kohonen, Redes de Hopfield e Memória Associativa Bidirecional (Hecht-Nielsen, 1989).

O primeiro passo do processo de desenvolvimento de redes neurais artificiais são a coleta de dados relativos ao problema e a sua separação em um conjunto de treinamento e um conjunto de teste. Os dados de treinamento serão utilizados para o treinamento da rede e dados de teste serão utilizados para verificar sua performance sob condições reais de utilização.

O segundo passo é a definição da configuração da rede, que pode ser dividido em três etapas:

- seleção do paradigma neural apropriado à aplicação;
- determinação da topologia da rede a ser utilizada (número de camadas, número de unidades em cada camada, etc);
- determinação de parâmetros do algoritmo de treinamento e funções de ativação (Carvalho, 1999).

O terceiro passo é o treinamento da rede. Nesta fase, seguindo o algoritmo de treinamento escolhido, serão ajustados os pesos das conexões. Normalmente, os

valores iniciais dos pesos da rede são números aleatórios uniformemente distribuídos em um intervalo definido.

O quarto passo é o teste da rede. Durante esta fase o conjunto de teste é utilizado para determinar a performance da rede com dados que não foram previamente utilizados. A performance da rede é uma boa indicação de sua performance real (Carvalho,1999). Finalmente, com a rede treinada e avaliada, ela pode ser integrada em um sistema do ambiente operacional da aplicação.

9.6 GEOPROCESSAMENTO E SUPORTE À DECISÃO

9.6.1 INTRODUÇÃO

Qual o grande desafio da produção de novas informações em um SIG ? A capacidade de comparar e avaliar as diferentes possibilidades de geração de novos mapas. Como o SIG oferece uma grande quantidade de funções de Álgebra de Mapas, nem sempre é fácil escolher qual a forma de combinação de dados mais adequada para nossos propósitos.

Neste contexto, é muito útil dispor de ferramentas de suporte à decisão, que nos ajudam a organizar e estabelecer um modelo racional de combinação de dados. Uma das técnicas mais úteis é o processo analítico hierárquico - *Analytical Hierarchy Process* (AHP), desenvolvida por Saaty (1992), considerada como sendo a mais promissora no contexto do processo de tomada de decisão.

9.6.2 SUPORTE À DECISÃO - CONCEITOS BÁSICOS

Decidir é escolher entre alternativas. Com base nesta visão, podemos encarar o processo de manipulação de dados num sistema de informação geográfica como uma forma de produzir diferentes hipóteses sobre o tema de estudo.

O conceito fundamental dos vários modelos de tomada de decisão é o de *racionalidade*. De acordo com este princípio, indivíduos e organizações seguem um comportamento de escolha entre alternativas, baseado em critérios objetivos de julgamento, cujo fundamento será satisfazer um nível pre-estabelecido de aspirações.

O modelo racional de tomada de decisão preconiza quatro passos que devem ser seguidos para uma escolha apropriada:

- Definição do problema: formular o problema como uma necessidade de chegar a um novo estado.
- Busca de alternativas: estabelecer as diferentes alternativas (aqui consideradas como as diferentes possíveis soluções do problema) e determinar um critério de avaliação.
- Avaliação de alternativas: cada alternativa de resposta é avaliada.

- Seleção de alternativas: as possíveis soluções são ordenadas, selecionando-se a mais desejável ou agrupando-se as melhores para uma avaliação posterior.

9.6.3 A TÉCNICA AHP - PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO

Quando temos diferentes fatores que contribuem para a nossa decisão, como fazer para determinar a contribuição relativa de cada um ? Para abordar este problema, Thomas Saaty propôs, em 1978, uma técnica de escolha baseada na lógica da comparação pareada. Neste procedimento, os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão são comparados dois-a-dois, e um critério de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre estes fatores, conforme uma escala pré-definida (veja tabela).

O primeiro passo para a aplicação dessa técnica é a elaboração de uma relação de importância relativa entre as evidências. Essa relação é utilizada como dado de entrada em uma matriz de comparação pareada, onde são calculados os autovalores e autovetores da matriz. Os pesos de cada membro *Fuzzy*, equivalem então aos autovetores da matriz de comparação pareada.

A AHP é uma teoria com base matemática que permite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios e medir a consistência dos julgamentos. Requer a estruturação de um modelo hierárquico, o qual geralmente é composto por meta, critérios, sub-critérios e alternativas; e um processo de comparação pareada, por importância relativa, preferências ou probabilidade, entre dois critérios, com relação ao critério no nível superior. Com base na comparação, a AHP pondera todos os sub-critérios e critérios e calcula um valor de razão de consistência entre [0, 1], com 0 indicando a completa consistência do processo de julgamento.

Escala de Valores AHP para Comparação Pareada

Intensidade de importância	Definição e Explicação
1	Importância igual - os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada - um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5	Importância essencial - um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada - Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
9	Importância extrema - A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível.
2,4,6,8	Valores intermediários entre julgamentos - possibilidade de compromissos adicionais

A partir do estabelecimento de critérios de comparação para cada combinação de fatores, é possível determinar um conjunto ótimo de pesos que podem ser utilizados para a combinação dos diferentes mapas.

9.6.4 SUPORTE À DECISÃO EM GEOPROCESSAMENTO

Consideramos uma das situações mais comuns em SIG: classificar o espaço em áreas mais ou menos adequadas para uma finalidade. Este problema ocorre em grande número de aplicações, como zoneamento, prospecção mineral, e seleção de áreas para um novo empreendimento comercial.

Tome-se, por exemplo, um estudo de preservação ambiental em áreas de encosta, para estabelecer uma política de ocupação, associada a mapas de risco de desmoronamento e impacto ambiental. Para tanto, vamos supor que dispomos de um mapa topográfico, da carta geotécnica, e de um mapa de uso e ocupação do solo (obtido a partir de foto-interpretação ou classificação digital de imagens de satélite).

O procedimento tradicional de análise baseia-se no princípio de “interseção de conjuntos espaciais de mesma ordem de grandeza” (Yves Lacoste) e está baseada em condicionantes (“risco máximo ocorre em áreas cuja declividade é maior que 10%, não são áreas de preservação ambiental, e o tipo de terreno é inadequado”). A transposição deste metodologia analógica para o ambiente de SIG requer o uso de operações booleanas (OU, E, NÃO) para expressar as diferentes condições. Esta técnica utiliza o computador como mera ferramenta automatizada de desenho, ignorando todo o potencial de processamento numérico do SIG, e gera descontinuidades inexistentes no dado original. Por exemplo, áreas com declividade igual a 9,9% serão classificadas diferentemente de regiões com inclinação de 10,1%, não importando as demais condições.

Mapas são dados e não desenhos. Tratar mapas como dados significa dar forma numérica ao espaço ao associar, a cada localização, um valor que representa a grandeza em estudo; requer ainda, na maior parte dos casos, o uso do formato matricial (“raster”), mais adequado a uma representação contínua do espaço.

No caso em apreço, a análise espacial em SIG será muito melhor realizada com uso da técnica de classificação contínua: os dados são transformados para o espaço de referência [0..1] e processados por combinação numérica, através de média ponderada ou inferência “fuzzy”. Ao invés de um mapa temático com limites rígidos gerados pelas operações booleanas, obteremos uma superfície de decisão, sob forma de uma grade numérica. O que representa este resultado? Uma visão contínua da variação da nova grandeza (seja ela adequação a plantio, indicador de mineralizações ou susceptibilidade ambiental).

No exemplo citado, o resultado será uma grade numérica que indica, para cada localização, o risco de desmoronamento, numa gradação de 0% a 100%. Qual a grande vantagem desta situação? Ela nos permite construir cenários (por exemplo, risco de 10%, 20% ou 40%), que indicam os diferentes compromissos de tomada de decisão (maior ênfase em proteção ambiental ou em minimizar o custo econômico). Obtemos assim uma flexibilidade e um entendimento muito maiores sobre os problemas espaciais.

9.7 ESTUDO DE CASO

Para a comparação das metodologias de integração e análise espacial dos dados tomou-se como área de estudo o maciço alcalino de Poços de Caldas, o qual encerra mineralizações radioativas há muito conhecidas.

O interesse pelos minerais radioativos no complexo alcalino de Poços de Caldas tiveram início em 1952, quando trabalhos preliminares de campo foram executados pelo Conselho Nacional de Pesquisa (Tolbert, 1966), para investigar e determinar fontes de anomalia radioativa.

Esse interesse gerou uma boa base de dados e trabalhos (Ellert, 1959; Tolbert, 1966; Oliveira, 1974; Almeida e Paradella, 1977; Ulbrich, 1984; Fraenkel et al., 1985; Almeida Filho, 1995), sendo esses os fatores que influenciaram na escolha dessa área para a aplicação de modelos prospectivos baseados em inferência espacial. A seguir será apresentado um resumo sobre as características gerais, geológicas e do banco de dados do maciço de Poços de Caldas.

9.7.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

O planalto de Poços de Caldas, na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, constitui uma estrutura em forma de cratera vulcânica grosseiramente circular, com cerca de 705 km². A cidade de Poços de Caldas, a qual tem como atividades econômicas principais a mineração (bauxita, argilas, minerais radioativos) e o turismo ligado à suas águas e ao clima agradável, localiza-se na borda norte dessa cratera. A Figura 9.12 mostra o planalto de Poços de Caldas através de uma composição colorida obtida com imagens do satélite Landsat-1. Como referência estão indicadas a cidade de Poços de Caldas, principais drenagens, vias de acesso etc, extraídas de cartas planimétricas da região.

Do ponto de vista geológico, o planalto é constituído por rochas mesozóicas-cenozóicas, representadas em sua maioria por nefelina-sienitos, os quais ocorrem

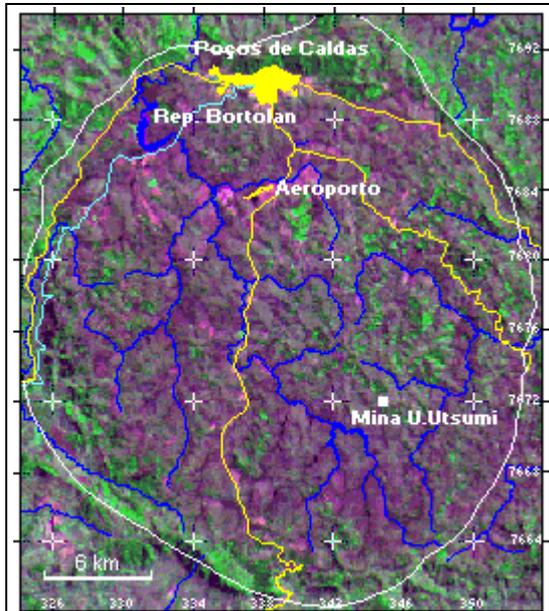


Figura 9.12- Composição colorida de imagens do satélite Landsat-1, mostrando o planalto de Poços de Caldas.

como fácies efusivas, hipabissais e plutônicas, além de material de natureza vulcânica. Datações geocronológicas pelo método K-Ar (Bushee, 1970) indicam que os fenômenos geológicos que formaram a cratera teriam ocorrido entre 87 e 53 milhões de anos atrás. As águas termais da região são as últimas manifestações desse episódio.

Quarenta e oito locais de mineralizações radioativas (incluindo depósitos e simples ocorrências) são conhecidos no planalto de Poços de Caldas, as quais podem ser agrupadas em três associações distintas, de acordo com a paragênese mineral: urânio-zircônio (U-Zr), tório-terras raras (Th-TR) e urânio-molibdênio (U-Mo). A associação urânio-zircônio constitui os depósitos mais comuns e freqüentes, mas não encerra importância econômica. A associação tório-terras raras constitui o segundo tipo de mineralização radioativa encontrada na área, representada principalmente pela jazida de Morro do Ferro, na

parte central do planalto. A associação urânio-molibdênio constitui os depósitos uraníferos mais importantes, representados principalmente pela jazida de Campo do Agostinho e pela mina Usamu Tsumi, na parte centro-sudeste do planalto. Para sua exploração foi criado, em meados da década de setenta, o Complexo Mineiro-Industrial de Poços de Caldas que produziria concentrado de urânio (*yellow cake*), destinado ao abastecimento das usinas nucleares brasileiras então planejadas.

Com base em análises de trabalhos geológicos realizados por pesquisadores que estudaram a região em diferentes épocas e com diferentes enfoques (Ellert, 1959; Tolbert, 1966; Wedow Jr., 1967; Oliveira, 1974; Almeida Filho & Paradella, 1976; Fraenkel et al., 1985), foram identificadas três características comuns às mineralizações radioativas no planalto, a saber:

- (a) A mineralização mostra afinidade genética com três tipos de litologias: tinguítos hidrotermalizados (rocha potássica), corpos intrusivos de foiaítos e rochas vulcânicas;
- (b) Essas litologias são cortadas por falhamentos/fraturamentos e estruturas circulares que criaram condutos para o alojamento de veios e lentes mineralizados;

(c) Dados de radiometria gama mostram valores anômalos de radioatividade total, indicativos da presença de minerais radioativos.

As três características acima (litologias favoráveis, feições estruturais e dados gama-radiométricos) foram adotadas como critérios diagnósticos para a pesquisa de minerais radiativos no planalto de Poços de Caldas. Poderia ser argumentado que apenas o último critério já seria suficiente para identificar áreas potenciais, por ser indicação direta da presença de minerais radioativos. Entretanto, variações locais na espessura de solos e cobertura vegetal, fazem com que áreas sem interesse prospectivo mostrem valores anômalos, enquanto depósitos importantes podem ser indicados apenas por valores intermediários de intensidade radioativa. Desse modo, dados radiométricos devem ser considerados apenas se ocorrem em áreas de características geológicas favoráveis, tornando-se indispensável agregar a eles informações derivadas de outras fontes.

Uma vez definidos os critérios diagnósticos, o passo seguinte constou da criação de um banco de dados digitais geocodificados, composto por:

Imagens Landsat - Imagens do *Multispectral Scanner* (MSS) do satélite Landsat-1, obtidas em setembro de 1972, sob ângulo de elevação solar de 44° e azimute de 58°. Deu-se preferência às imagens mais antigas, para reduzir a influência da atividade antrópica, que dificulta a interpretação fotogeológica.

Dados planimétricos - Cidade, estradas, ferrovia, drenagens etc, digitalizadas a partir das cartas acima mencionadas, usadas como parâmetros de referência e localização.

Dados litológicos - Litologias potenciais para a pesquisa de minerais radioativos, representadas por rocha potássica, corpos intrusivos de foiditos e rochas vulcânicas (Figura 6.5), digitalizadas do Mapa Geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas (Nuclebrás, 1975a).

Dados estruturais - Extraídos das imagens Landsat-MSS, as quais foram realçadas por técnicas de ampliação linear de contraste e interpretadas (como bandas individuais ou composições coloridas falsa cor) diretamente no monitor de vídeo, usando-se o *mouse* para traçar as feições interpretadas. Dois grupos de feições foram identificados: (a) lineamentos, representando traços de falhas/fraturas; e (b) estruturas circulares, indicativas de edifícios vulcânicos secundários, no interior da cratera principal (Figura 6.6). Esses dois tipos de feições constituem controles estruturais regionais de primeira ordem para as mineralizações radioativas, responsáveis pela criação de condutos que permitiram a percolação de soluções hidrotermais e deposição do minério. Elas foram representadas em duas dimensões, através da criação de "corredores" com 250 e 350 metros de largura ao longo de falhas/fraturas e estruturas circulares,

respectivamente. Esses corredores representariam a área de influência das feições estruturais, assumindo-se que qualquer ponto dentro deles estaria posicionado sobre a feição estrutural considerada.

Dados gama-radiométricos - Obtidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN, a partir de levantamentos com helicóptero e a pé. No primeiro caso os dados foram coletados em malha de 250 x 250 metros, a uma altura média de 7,5 metros do terreno, enquanto nos levantamentos a pé a malha foi de 75 x 200 metros. Esses dados, na forma de radioatividade total, foram digitalizados a partir do Mapa Radiométrico do Planalto de Poços de Caldas (Nuclebrás 1975b), organizados em quatro intervalos de intensidade radioativa, em relação a um *background* regional de 40 unidades, a saber: 1,3-1,8; 1,8-2,5; 2,5-3,5; e maior do que 3,5 vezes o *background* regional (Figura 6.7).

Ocorrências minerais radioativas - Mineralizações radioativas conhecidas na área foram incorporadas como símbolos ao banco de dados, não se fazendo distinção se se tratava de depósitos importantes ou de simples ocorrências minerais. Por representarem dados de "verdade terrestre", elas constituem parâmetros de aferição dos resultados. Se áreas indicadas como potenciais mostrarem-se coerentes em relação a mineralizações conhecidas, o modelo prospectivo pode ser considerado confiável.

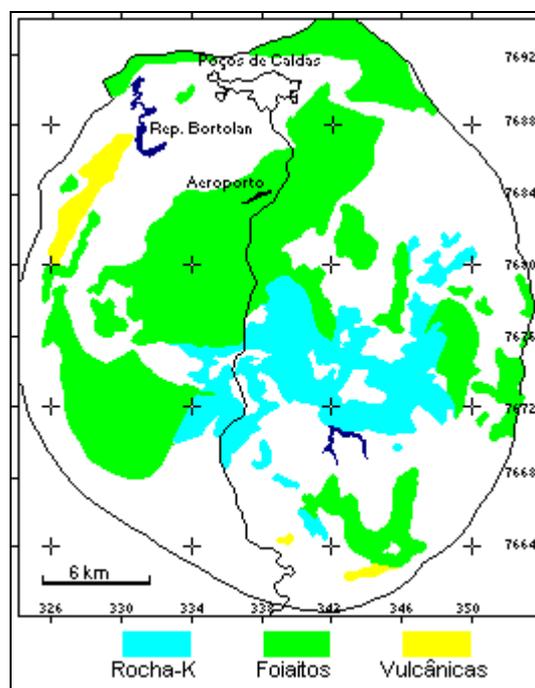


Figura 9.13 - Mapa de litologias potenciais para a ocorrência de mineralizações radioativas.

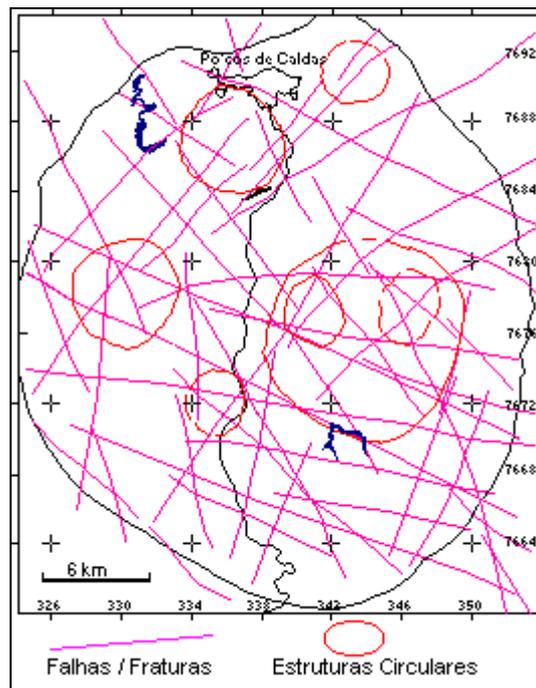


Figura 9.14 - Mapa de lineamentos, indicando falhas/fraturas e estruturas circulares.

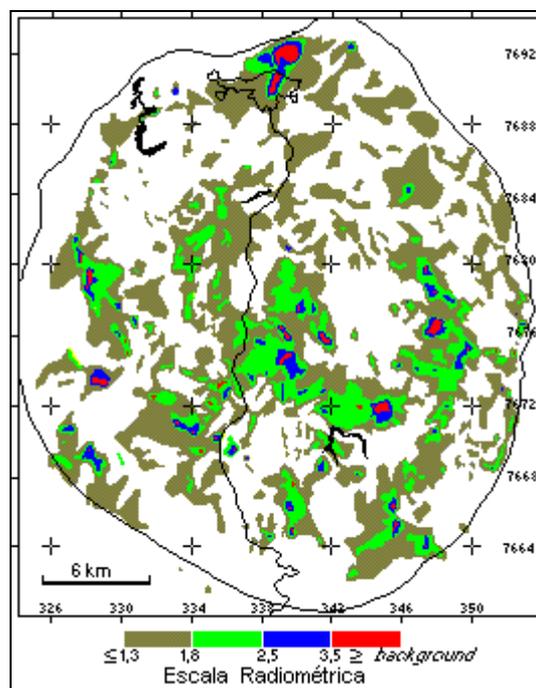


Figura 9.15- Mapa de anomalias gama-radiométricas no planalto de Poços de Caldas.

9.7.2 MODELO PROSPECTIVO USANDO OPERAÇÕES BOOLEANAS

Com base nos critérios diagnósticos já definidos, uma área poderia ser considerada potencial quando nela ocorrerem concomitantemente:

- (a) Litologias potenciais, representadas por rochas potássicas (A), corpos intrusivos de foiaítos (B), ou rochas vulcânicas (C);
- (b) Feições estruturais, indicativas de falhas/fraturas (D), ou estruturas circulares (E), que cortam litologias potenciais; e
- (c) Valores gama-radiométricos (F), a partir de 1,8 vez o *background* regional (limiar arbitrado com base no valor médio encontrado em depósitos de urânio da área).

Para mapear as áreas de ocorrências dos critérios diagnósticos acima indicados, empregou-se a seguinte equação de álgebra booleana:

$$\{(A \text{ or } B \text{ or } C) \text{ and } (D \text{ or } E)\} \text{ and } F \rightarrow \text{ÁREAS POTENCIAIS}$$

A Figura 9.16 é o mapa das áreas potenciais para pesquisa de minerais radioativos no planalto de Poços de Caldas, com base na equação acima. Essas áreas cobrem uma superfície de 88,5 km², correspondentes a apenas 12% da região total investigada. Observando-se a distribuição das mineralizações, verifica-se que 77% delas ocorrem em áreas indicadas como potenciais. Nas restantes 23% encontra-se ausente pelo menos um dos três critérios diagnósticos. Constata-se ainda que dos três tipos de mineralizações radioativas conhecidas, aquelas do tipo U-Zr predominam nas regiões leste e oeste/sudoeste, enquanto as dos tipos U-Mo e Th-TR, concentram-se na região central do planalto. A boa correlação entre áreas apontadas como potenciais e as mineralizações conhecidas na região, confere confiabilidade ao modelo prospectivo adotado.

A principal desvantagem do modelo baseado em operações binárias é o fato das áreas indicadas terem prioridades idênticas para pesquisa. Visando um refinamento desses resultados, o mesmo conjunto de dados foi analisado utilizando um modelo baseado em médias ponderadas, o qual permite priorizar as áreas, de acordo com o potencial prospectivo das mesmas.

9.7.3 MODELO PROSPECTIVO USANDO MÉDIAS PONDERADAS

Neste tipo de modelo, pesos são atribuídos aos critérios diagnósticos e às suas respectivas classes (*e.g.* critério diagnóstico litologia, classe rocha potássica), calculando-se uma imagem de médias ponderadas, a qual representa uma combinação particular e única dos dados para cada área unitária do terreno. A definição dos pesos é a ação mais crítica a ser tomada para a aplicação do modelo.

O procedimento de atribuir pesos a parâmetros pertencentes a uma cadeia de eventos e utilizar equações aritméticas visando à tomada de decisões, é conhecido na área de inteligência artificial como *equação neuronal de Rosenblat*. A definição desses pesos pode ser feita de duas maneiras: através de procedimentos heurísticos, nos quais a experiência pessoal é o fator determinante; ou utilizando-se técnicas *fuzzy logic* (Zadeh, 1965), as quais procuram estabelecer critérios de enquadramento do conjunto de dados, definindo limites ou graus de confiança. Apesar do desenvolvimento dessas técnicas, a definição heurística de pesos continua sendo amplamente aceita como base para sistemas especialistas, de modo particular em situações onde a teoria e os modelos empíricos de comportamento dos dados não estão bem estabelecidos (Veiga & Meech, 1994). Este procedimento é particularmente válido em pesquisa mineral, que muitas vezes segue uma abordagem técnica-intuitiva, onde os conceitos são aplicados por analogia, na expectativa de repetições de relações já conhecidas.

Adotou o procedimento heurístico para a definição dos pesos, atribuindo-se os seguintes valores:

- (a) dados gama-radiométricos: $\omega_{\text{crit}} = 80$ e $\omega_{\text{classe}} = 0, 10, 60, 70$ e 80 para as seguintes classes de intensidades radioativas: *background*; 1,3-1,8; 1,8-2,5; 2,5-3,5; e $>3,5$; respectivamente;
- (b) dados litológicos: $\omega_{\text{crit}} = 60$ e $\omega_{\text{classe}} = 60, 30$ e 20 para as classes rochas potássicas, foiaítos e material vulcânico, respectivamente; e
- (c) dados estruturais: $\omega_{\text{crit}} = 20$ e $\omega_{\text{classe}} = 20$ para falhas/fraturas e estruturas circulares.

As médias ponderadas foram calculadas usando-se a seguinte equação:

$$E = \frac{\sum [(\omega_{\text{crit}}) * (\omega_{\text{classe}})]}{\sum (\omega_{\text{crit}})} \rightarrow \text{ÁREAS POTENCIAIS}$$

onde,

E = valor da média ponderada

ω_{crit} = pesos atribuídos aos critérios diagnósticos;

ω_{classe} = pesos atribuídos às classes dos critérios diagnósticos.

É fácil deduzir dos dados acima que as médias ponderadas para a área de estudo ficaram compreendidas entre $[0, 65]$, extremos que indicam, respectivamente, prioridades nula e máxima para a pesquisa de minerais radioativos. A título de exemplo, áreas com média ponderada 60 corresponderam

a locais de ocorrências de rochas potássicas, cortadas por falhamentos e com valores de intensidade radioativa entre 2,5 e 3,5 vezes o *background* regional.

O mapa da Figura 9.17 mostra áreas com diferentes prioridades para a prospecção de minerais radioativos no planalto de Poços de Caldas. Este mapa foi gerado a partir do fatiamento da imagem de médias ponderadas, representando os seguintes intervalos de pesos: 0-20; 20-35; 35-45; 45-55; e 55-65. Às áreas definidas por esses intervalos foram atribuídas prioridades para pesquisa ditas nula, baixa, média, alta e muito alta, respectivamente.

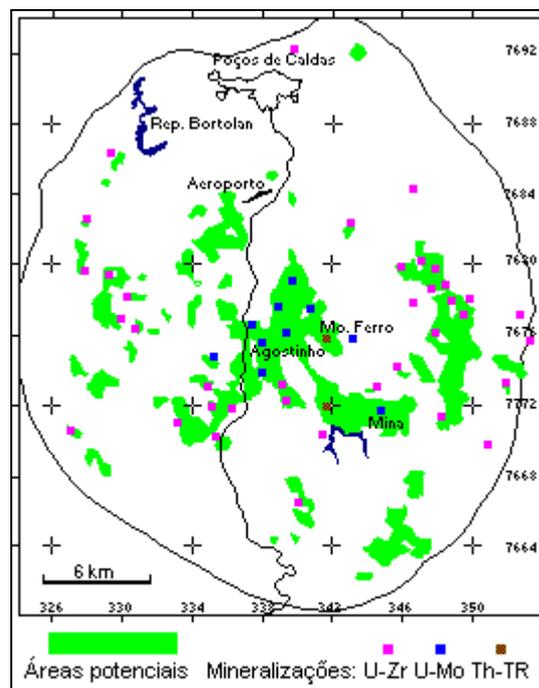


Figura 9.16- Mapa de áreas potenciais para a pesquisa de minerais radioativos no planalto de Poços de Caldas, segundo método baseado em álgebra booleana.

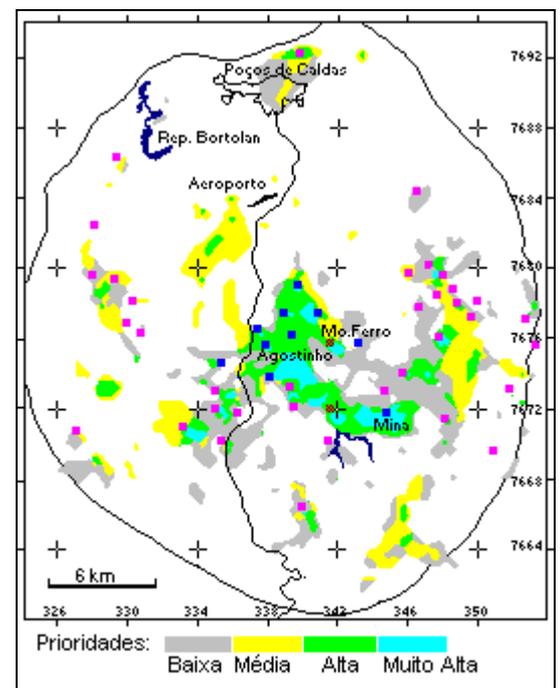


Figura 9.17 - Mapa de áreas com diferentes prioridades para a pesquisa de minerais radioativos no planalto de Poços de Caldas, segundo modelo de médias ponderadas.

A Tabela 9.1 resume algumas características das áreas potenciais mostradas na Figura 9.17. Apenas 14% das mineralizações, todas sem importância econômica (U-Zr), localizam-se fora das áreas potenciais, contra 23% obtidos no método baseado em operações binárias. De acordo com os dados da tabela, 76% do planalto são descartados, *a priori*, para pesquisa. Os restantes 24% indicados com potenciais para a ocorrência de algum tipo de mineralização radioativa, são distribuídos da seguinte maneira:

- Áreas de prioridade baixa perfazem cerca de 11% da superfície total do planalto, encerrando mineralizações radioativas do tipo U-Zr, sem interesse econômico.
- Áreas de prioridades média perfazem cerca de 7% da superfície total do planalto, encerrando também mineralizações radioativas do tipo U-Zr.
- Áreas de prioridade alta correspondem a 4,5% da superfície do planalto e encerram 30 das mineralizações tipo U-Mo.
- Áreas de prioridade muito alta perfazem apenas 1,5% da superfície total do planalto. Apesar de suas dimensões reduzidas, essas áreas encerram 60% das mineralizações U-Mo (incluindo o depósito de Campo do Agostinho e a mina Usamu Utsumi) e 100% dos depósitos tipo Th-TR.

Prioridades de Pesquisa	Dimensões das Áreas Potenciais		Porcentagens por tipo de Mineralização		
	Km ²	%	U-Zr	U-Mo	Th-TR
*					
Muito Alta	10,6	1,5	6%	60%	100%
Alta	34,2	4,7	25%	30%	-
Média	49,2	6,8	19%	-	-
Baixa	78,5	10,9	36%	10%	-
Nula	546,0	76,0	14%	-	-

Tabela 9.1 - Dados estatísticos do modelo prospectivo baseado em médias ponderadas.

9.7.4 MODELO PROSPECTIVO UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Para a aplicação da metodologia *Fuzzy* foi necessário que toda as evidências (planos de informação) estivessem no formato MNT. Sendo assim, os mapas temáticos que serviriam de evidências tiveram que ser ponderados para valores que variam entre 0 e 1. Os mapas de litologia e gama-radiometria foram ponderados por pesos entre “0” e “1” (membros *Fuzzy*). As tabelas 2 e 3 apresentam os valores *Fuzzy* obtidos a partir das equações lineares.

Classe	Fuzzy
background	0
1,3-1,8	0,125
1,8-2,5	0,750
2,5-3,5	0,875
>3,5	1

Tabela 9.2 – Valores dos membros *Fuzzy* do plano de informação gama-radiometria.

Para a ponderação dos mapas de estruturas circulares, lineamentos e contatos geológicos foi necessário primeiramente a criação de uma grade de distância, tendo como ponto inicial os arcos que definem as estruturas e os contatos. Uma função quadrática foi aplicada sobre cada grade de distância para se definir os valores dos membros *Fuzzy* dos mapas citados acima. A função quadrática tenta modelar a importância das estruturas e dos contatos geológicos a medida que se distância dos mesmos.

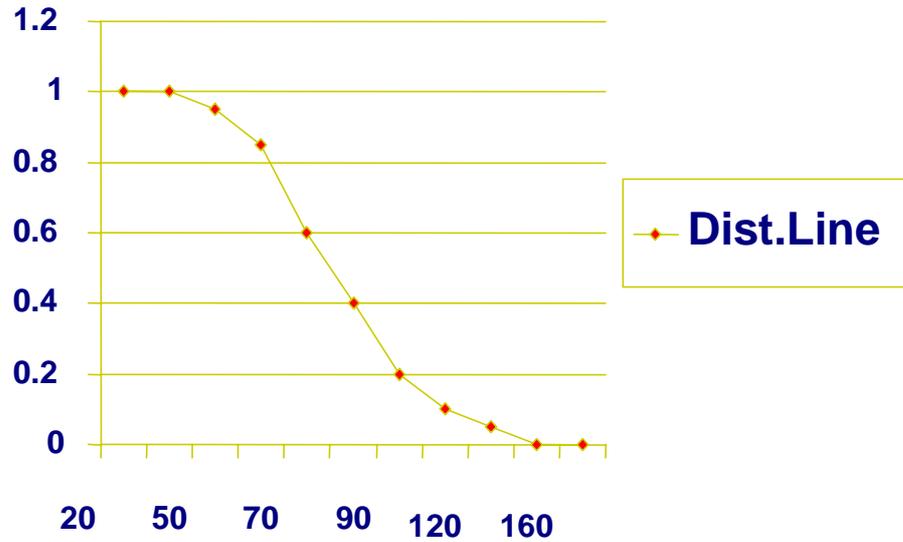


Figura 9.18 – Função de conversão de numérico para “fuzzy”.

A função adotada (ilustrada na figura 9.18 acima) é expressa por:

$r = \frac{I}{(I + a(z - c))^2}$, onde o valor de "a" indica o "ponto de cruzamento", no qual a evidência tem 50% de importância. A faixa abrangida pelo ponto inicial até o "ponto de cruzamento" indica a faixa onde a estrutura ou o contato geológico apresentam alta influência, e nos pontos fora desta faixa a importância decai abruptamente segundo a curva quadrática.

Classe	Fuzzy
Rochas	1
Lujaritos	1
Foiaítos	0.5
Mat. vulcânico	0,333
Tinguaíto	0,25
Fonólitos	0,1667
Embasamento	0
Arenito	0

Tabela 3 - Valores dos membros Fuzzy do plano de informação litologia.

Os pontos definidos como os "pontos de cruzamento" coincidem com os pontos definidos por Almeida Filho (1995) na construção dos "buffers" ao longo das estruturas:

- contato geológico $a = 0,0001$ $z = 100\text{m}$;
- estruturas lineares $a = 0,000016$ $z = 250\text{m}$;
- estruturas circulares $a = 0,00000816$ $z = 350\text{m}$.

Com os planos de informação (campos contínuos com distribuição espacial *Fuzzy*) criados, estes foram combinados segundo uma análise multi-critério definida através de operadores *Fuzzy* (Mínimo-Máximo, Média, Ponderado (Técnica AHP) e Gama). Os procedimentos e explicações sobre cada operador estão relatados a seguir.

Fuzzy Mínimo-Máximo

Nessa análise multi-critério foi utilizado dois operadores, Mínimo e Máximo, combinados numa seqüência esquemática semelhante à adotada no método *Booleano*. Os operadores estão explicados individualmente a seguir.

Fuzzy Mínimo

Esse operador assemelha-se a operação *Booleana* "E" (interseção), e é expresso por: $\mu = \text{Min} = (\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots)$, onde μ_a equivale ao valor do membro *Fuzzy* para um particular ponto ("pixel") do plano de informação A, os valores μ_b e μ_c correspondem respectivamente aos membros dos planos B e C no mesmo ponto.

O que este operador define como resultado, é que um ponto do plano de informação resultante terá como valor de saída o menor valor dos membros *Fuzzy* de entrada. Se tomarmos como exemplo os valores $\mu_a = 0,30$; $\mu_b = 0,17$; $\mu_c = 0,98$, o valor adotado para o "pixel" do plano de informação final será $\mu_{\text{final}} = 0,17$. Fica claro entender que o resultado obtido é o mais conservativo possível para com os valores dos membros *Fuzzy*, sendo o operador indicado para situações altamente restritivas ("pessimista"), onde duas ou mais evidências são estritamente necessárias para satisfazer uma hipótese.

Fuzzy Máximo

O operador Máximo assemelha-se a operação *Booleana* "OU" (união), sendo as evidências combinadas segundo a função $\mu = \text{Max} (\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots)$, onde os valores de μ_a , μ_b e μ_c correspondem aos valores dos membros *Fuzzy* das evidências. Nesta operação o valor de saída para um dado ponto, diferentemente do *Fuzzy* mínimo, será o maior valor de entrada dos planos de informação. No exemplo acima o valor resultante seria $\mu_{\text{final}} = 0,98$. O operador *Fuzzy* Máximo é o mais otimista dentre operadores *Fuzzy* sendo indicado para situações onde a

existência de apenas uma evidência, é o suficiente para indicar regiões potenciais a exploração mineral.

A formulação da combinação dos operadores Mínimo e Máximo está apresentada abaixo e o mapa de favorabilidade na figura 9.19.

$$r = \text{Min}(\text{Max}(\text{litologia}, \text{contato}), \text{Max}(\text{estrut. circular}, \text{lineament.}), \text{gama}).$$

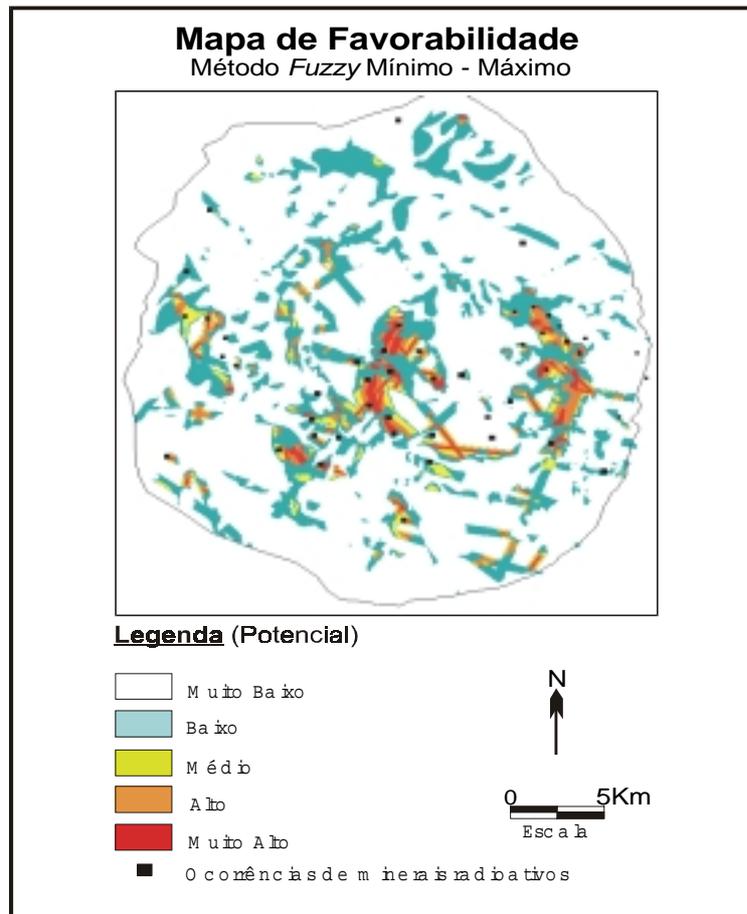


Figura 9.19 - – Mapa de favorabilidade à ocorrência de minerais radioativos obtido segundo o método *Fuzzy* Mínimo-Máximo.

***Fuzzy* Ponderado**

No *Fuzzy* Ponderado os pesos de cada membro *Fuzzy* de entrada (evidência) foram definidos segundo a técnica de tomada de decisão AHP (Saaty, 1992). A primeira etapa para a definição dos pesos foi a elaboração de uma relação de importância relativa entre as evidências. Essa relação foi utilizada como dado de entrada em uma matriz de comparação pareada, onde foram calculados os autovalores e autovetores da matriz. Os pesos de cada membro *Fuzzy*, equivalem então aos autovetores a matriz de comparação pareada.

Os pesos definidos pela técnica AHP foram:

- gama-radiometria - 0,514;
- litologia - 0,258;
- estruturas circulares - 0,1223;
- estruturas lineares - 0,0529;
- contatos litológicos - 0,0529;

O mapa de favorabilidade encontra-se na figura 9.20

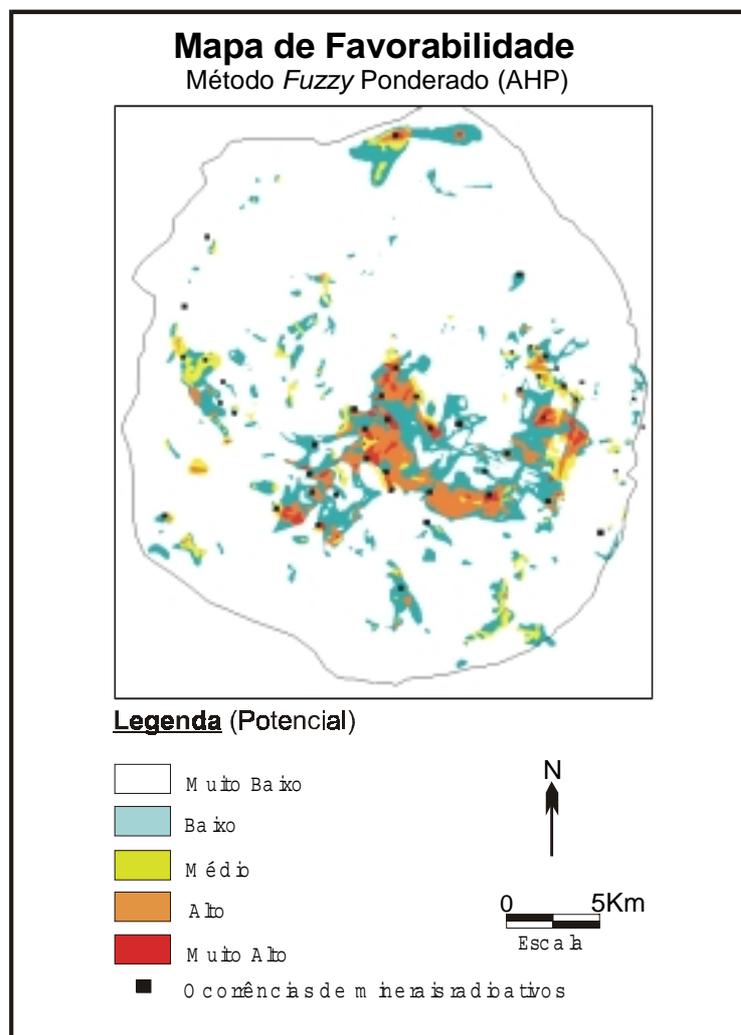


Figura 9.20– Mapa de favorabilidade à ocorrência de minerais radioativos obtido segundo o método *Fuzzy* Ponderado (AHP).

Método de Bayes

Aplicando-se os métodos de inferência bayesiana, foram calculadas as razões de suficiência e necessidade para cada evidência, apresentadas na Tabela 9.4. Os resultados estão mostrados na Figura 9.21.

PI's	RAZÃO SUFICIÊNCIA	RAZÃO NECESSIDADE
Gama-radiometria	6.869	0.550
Litologias	1.955	0.582
Contatos	3.039	0.797
Estruturas Circulares	3.507	0.780
Lineamentos	1.363	0.837

Tabela 9.4 – Pesos de Evidência para Inferência Bayesiana

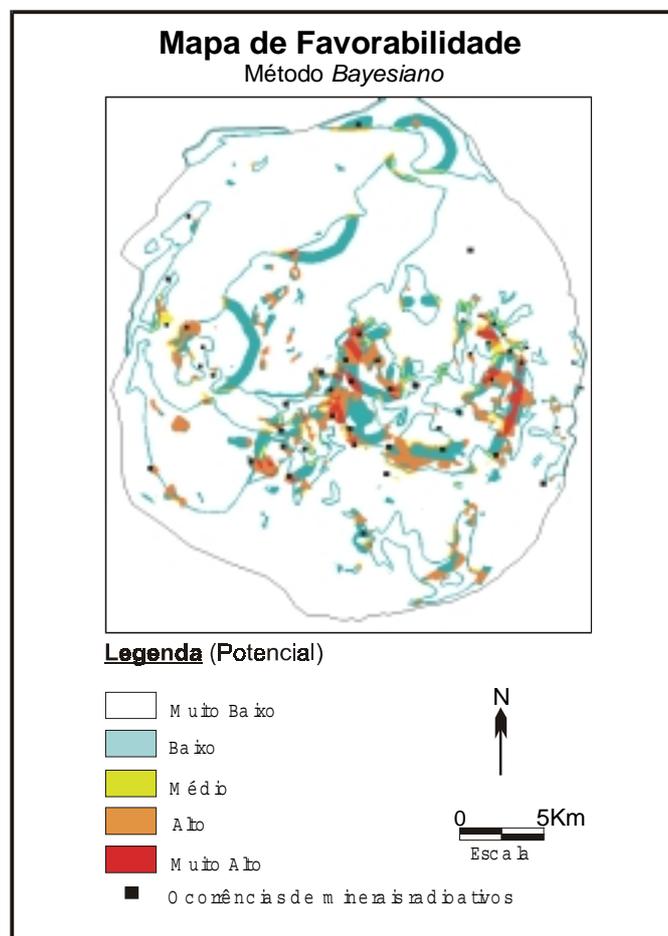


Figura 9.21 – Mapa de Favorabilidade para inferência booleana.

9.7.5 RESULTADOS COMPARATIVOS

Para a avaliação dos mapas de potencialidade gerados através das análises multi-critérios, quando se dispõe de evidências, sugere-se utilizar a metodologia *bayesiana*. O objetivo é avaliar o caráter explicativo dos mapas para com as verdades de campo utilizando a idéia da probabilidade à *posteriori*. O que se espera nessa análise é uma alta correlação das ocorrências com as faixas dos mapas de potencialidade definidos como de alto potencial.

Para um melhor entendimento imagine-se um mapa de potencialidade com diferentes faixas de potencialidade. Na prática o que se espera é uma alta correlação das faixas definidas como de alto potencial com as verdades de campo e uma baixa correlação com as de baixo potencial. O cruzamento desses mapas com as verdades de campo fornecerá parâmetros que substituídos na formulação do grau de confiança permitirão avaliar o caráter explicativo de cada faixa para com as verdades de campo.

Na prática o que se obtém são valores espacializados que expressam numericamente o quanto se aumenta em número de vezes (grau de confiança) o encontro de novos depósitos a partir do momento que se esta pesquisando em regiões definidas como de alto potencial. O grau de confiança é expresso pela razão da probabilidade à *posteriori* pela probabilidade à *priori*.

$$\text{Grau de confiança} = \frac{p(d | e)}{p(d)}$$

Os cálculos foram executados para todas as classes (fatias) dos mapas de favorabilidade gerados e os resultados estão apresentados resumidamente na tabela 9.5 e 9.6. A análise dessas tabelas permitiu, à obtenção de algumas conclusões com relação a qualidade dos mapas de favorabilidade gerados.

O mapa de favorabilidade gerado pelo método *Booleano* foi o que apresentou o pior resultado dentre os mapas gerados (Tabelas 9.5 e 9.6). O grau de confiança (6,89) obtido através da teoria *Bayesiana* para a faixa definida como favorável foi o menor valor obtido. Esse valor passa uma idéia de aumento de probabilidade de encontro do bem mineral. Ou seja, neste caso o fato de se procurar minerais nas áreas definidas como favoráveis aumentariam as chances de descoberta em 6,89 em relação a probabilidade à *priori* que considera a área toda do platô de Poços de Caldas.

Método	Área (Km ²)	Grau de confiança (faixa “muito alto”)
Booleano*	32,37	6,89
Média Ponderada*	6,47	13,19
Fuzzy Mínimo-Máximo	11,19	9,11
Fuzzy Média	7,00	10,06
Fuzzy Ponderado (AHP)	6,38	16,10
Fuzzy Gama	6,78	7,83
Bayes	7,55	9,34

Tabela 9.5 – Resultados de Grau de confiança da faixa “muito alto”.

O método de Média Ponderada obteve um bom resultado, onde as fatias definidas por Almeida Filho (1995) apresentaram uma divisão coerente da área de estudo. A faixa definida como de “muito alto” potencial apresentou um grau de confiança de 13,19 (Tabelas 4 e 6). A faixa de “muito baixo” potencial como o esperado diminui a chance de descoberta em aproximadamente 2,5 vezes (grau de confiança = 0,403). O problema com esse mapa de favorabilidade é que a faixa de “médio” potencial (3,53) apresenta um valor menor do que o da faixa de “baixo” potencial (3,86) quando o esperado era que as faixas apresentassem um aumento crescente dos valores de grau de confiança.

Os mapas obtidos pelos operadores *Fuzzy* foram os que apresentaram os melhores resultados. O *Fuzzy* Ponderado foi o que apresentou o melhor resultado dentre todos os métodos de análise multi-critério, o grau de confiança distribui-se de modo crescente com a faixa definida como de “muito alto” o maior valor de grau de confiança, 16,10 (Tabelas 4 e 9). Os outros operadores *Fuzzy*, também apresentaram bons resultados, com variações muito pequenas entre os resultados.

Os resultados apresentados pelo método *Bayesiano* não foram muito satisfatórios. O problema provavelmente decorre do corte rígido que é efetuado no início da manipulação dos dados. Esse corte em fatias “favoráveis” e “não favoráveis” elimina a distribuição contínua das evidências, o que como já visto no método *Booleano*, gera erros durante a integração dos dados. Embora o mapa de favorabilidade, fatiado segundo áreas proporcionais, apresentar valores coerentes de grau de confiança, os valores de amplitude das faixas variam muito, apresentado faixas muito estreitas em amplitude.

Com relação as técnicas empregadas na análise multi-critério dos dados, as metodologias de inferência por classificação contínua, métodos *Fuzzy*, mostraram ser as mais indicadas para o estudo de fenômenos naturais, pois essas permitem um escalonamento das evidências segundo um grau relativo de importância entre elas, possibilitando assim a criação de classes intermediárias (condição “talvez”) às verdades absolutas, diferentemente dos métodos rígidos (*Booleanos*).

O método *Bayesiano* apresentou uma abordagem interessante ao problema, todavia os resultados apresentados pelos mapas de probabilidade de ocorrência mineral, não foram satisfatórios. Este baixo resultado pode estar ligado ao fato do “corte” rígido sobre a evidência na etapa inicial do processo, para geração dos mapas de evidência binários (favorável, não favorável).

O método de *Bayes*, por outro lado, demonstrou ser uma forte ferramenta de avaliação quantitativa dos mapas gerados, sendo a avaliação baseada na probabilidade *à posteriori*, ou seja no poder explicativo dos mapas de favorabilidade para com as ocorrências minerais (verdades de campo).

GEOPROCESSAMENTO PARA PROJETOS AMBIENTAIS

José Simeão de Medeiros

Gilberto Câmara

10.1 INTRODUÇÃO

Na perspectiva moderna de gestão do território, toda ação de planejamento, ordenação ou monitoramento do espaço deve incluir a análise dos diferentes componentes do ambiente, incluindo o meio físico-biótico, a ocupação humana, e seu inter-relacionamento. O conceito de *desenvolvimento sustentado*, consagrado na Rio-92, estabelece que as ações de ocupação do território devem ser precedidas de uma análise abrangente de seus impactos no ambiente, a curto, médio e longo prazo.

Tal postura foi sancionada pelo legislador, ao estabelecer dispositivos de obrigatoriedade de Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA), como condição prévia para novos projetos de ocupação do espaço, como rodovias, indústrias e hidroelétricas. Forma ainda a justificativa política para iniciativas como o Programa de Zoneamento Ecológico-Econômico, estabelecido pelo Governo Federal para disciplinar o desenvolvimento da região Amazônica.

Deste modo, pode-se apontar pelo menos quatro grandes dimensões dos problemas ligados aos Estudos Ambientais, onde é grande o impacto do uso da tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica: *Mapeamento Temático, Diagnóstico Ambiental, Avaliação de Impacto Ambiental, Ordenamento Territorial e os Prognósticos Ambientais*.

Nesta visão, os estudos de Mapeamento Temático visam a caracterizar e entender a organização do espaço, como base para o estabelecimento das bases para ações e estudos futuros. Exemplos seriam levantamentos temáticos (como geologia, geomorfologia, solos, cobertura vegetal), dos quais o Brasil ainda é bastante deficiente, especialmente em escalas maiores. Tome-se, por exemplo, o caso da Amazônia, onde o mais abrangente conjunto de dados temáticos existente é o realizado pelo projeto RADAM, no qual os dados foram levantados na escala 1: 250.000 e compilados na escala 1:1.000.000.

A área de *diagnóstico ambiental* objetiva estabelecer estudos específicos sobre regiões de interesse, com vistas a projetos de ocupação ou preservação. Exemplos são os relatórios de impacto ambiental (RIMAs) e os estudos visando o estabelecimento de áreas de proteção ambiental (APAs).

Os projetos de *avaliação de impacto ambiental* envolvem o monitoramento dos resultados da intervenção humana sobre o ambiente, incluindo levantamentos como o feito pela organização SOS Mata Atlântica, que vem realizando estudos sobre os remanescentes da Mata Atlântica em toda a costa leste brasileira.

Os trabalhos de *ordenamento territorial* objetivam normatizar a ocupação do espaço, buscando racionalizar a gestão do território, com vistas a um processo de desenvolvimento sustentado. Neste cenário, estão em andamento hoje no Brasil uma grande quantidade de iniciativas de zoneamento, que incluem estudos abrangentes como o zoneamento ecológico-econômico da Amazônia Legal (Becker e Egler 5) e de aspectos específicos, como o zoneamento pedo-climático por cultura, coordenado pela EMBRAPA.

Todos estes estudos tem uma característica básica: a *interdisciplinaridade* (Moraes 48). Decorrente da convicção de que não é possível compreender perfeitamente os fenômenos ambientais sem analisar todos os seus componentes e as relações entre eles, estes projetos buscam sempre uma visão integrada da questão ambiental em conjunto com a questão social.

10.2 REPRESENTANDO A NATUREZA NO COMPUTADOR

O problema essencial é capturar no GIS, com o menor grau de reducionismo possível, a natureza dos padrões e processos do espaço. A solução tradicional foi transpor os mapas da Cartografia Temática para o ambiente computacional. Ao tratar criticamente esta questão, pode-se concluir que um mapa temático tradicional nada mas é que uma representação simplificada do conhecimento de um especialista sobre a região estudada.

Tal dificuldade leva a maior parte das aplicações de Geoprocessamento a representar alguns aspectos da natureza apenas a partir da delimitação de uma área de estudo (na prática, um retângulo definido por coordenadas geográficas), sem capturar suas características particulares que possam distingui-la de seu entorno. Neste contexto, a maior parte das análises é baseada numa abordagem *ponto-a-ponto*: a área de estudo é dividida em pequenas células, e cada célula é examinada e processada separadamente das demais.

A abordagem pontual, apesar de sua simplicidade de implementação e uso, apresenta algumas limitações. Como cada ponto é considerado independente dos demais, não há garantia de uma coerência espacial no resultado. Quer dizer, a topologia resultante é fornecida implicitamente pelos diferentes recortes espaciais de cada mapa. Não é feita qualquer hipótese explícita sobre a organização do espaço, e espera-se que a correlação implícita entre as variáveis (no limite, resultante dos processos de geração do espaço) assegure uma representação coerente no mapa final. Por exemplo, ao combinarmos um mapa de solos com a geomorfologia numa abordagem pontual, supomos implicitamente que existe uma coerência entre os limites das associações de solos e das formas de relevo.

A alternativa refere-se ao uso de metodologias oriundas da Geografia Sistemática, também utilizadas em estudos de Ecologia da Paisagem (Zonneveld 69; Zonneveld 70) e de Ecodinâmica (Tricart 64; Tricart 65), em conjunto com a abordagem mencionada acima. Esta hipótese de trabalho requer a identificação prévia de áreas homogêneas (baseadas em critérios estabelecidos pelos especialistas), sobre as quais são então realizadas as pesquisas.

Esta hipótese é também coerente com a visão de Hartstorne 36, que propõe o conceito de área-unidade (*unit-area*), como uma partição ideal do espaço geográfico, definida pelo pesquisador em função do objeto de estudo e da escala de trabalho, apresentando características individuais próprias. Estas áreas-unidades seriam a base de um sistema de classificação e organização do espaço e a partir da sua decomposição, o pesquisador relacionaria, para cada uma das partições, as correspondentes características físicas-bióticas que a individualizaria em relação as demais componentes do espaço.

Deste modo, agrupa-se de forma genérica, as diferentes metodologias para estudos ambientais em duas grandes classes:

- Métodos baseados em localizações pontuais - utilizam a combinação dos atributos descritivos das variáveis geográficas, onde cada localização é considerada independente das demais;
- Métodos baseados na definição de áreas homogêneas - utilizam conceitos derivados da idéia de área-unidade.

10.3 MÉTODOS BASEADOS EM LOCALIZAÇÕES PONTUAIS

Nos métodos baseados em localizações pontuais inclui-se o processo de selecionar e combinar, através de procedimentos de síntese disponíveis num SIG, as variáveis geográficas considerando os limites por elas estabelecidos; estes limites podem ser as formas de relevo, os solos, a cobertura vegetal, dentre outros. Cada uma destas variáveis geográficas contém uma certa diferencialidade espacial e a combinação entre elas (por sobreposição ou “cruzamento”) promove a subdivisão do espaço geográfico em regiões equiprobemáticas, supostamente concretas, com fronteiras bem definidas, como pode ser observado na Figura 10.1.

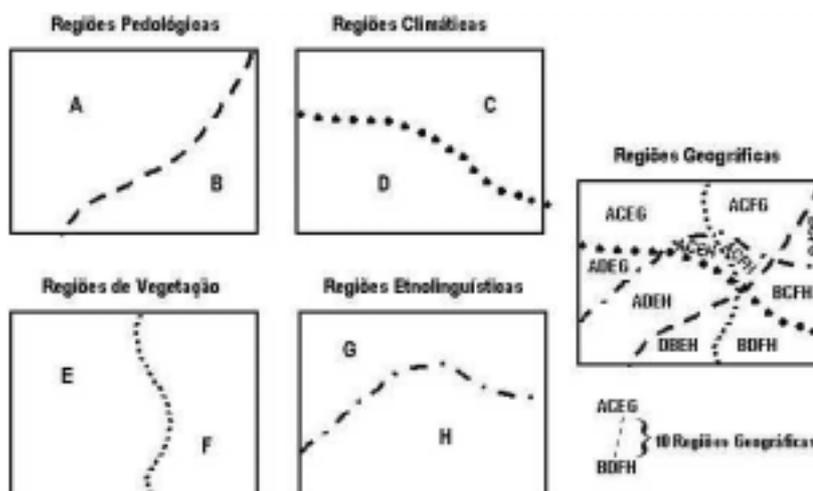


Figura 10.1. A - Regiões Equiproblemáticas. Modificado de: Corrêa 16.

Um exemplo de aplicação do método baseado em localizações pontuais é o trabalho desenvolvido por Bezerra *et alii* 7. Estes autores produziram um diagnóstico geoambiental preliminar (não foram considerados os aspectos sócio-econômicos) do estado do Amapá, na escala 1:1.000.000, utilizando técnicas de inferência booleana que permitiram a combinação de mapas temáticos (clima, geologia, formas de relevo, pedologia, cobertura vegetal e uso da terra) para identificação de geossistemas (Bertrand 6); Silva61). Foram identificadas a distribuição de seis grandes Regiões Geoambientais, sendo três determinadas pela interdependência rocha-relevo e três por fatores climáticos atuais ou passados, que funcionaram ou funcionam como elementos controladores da distribuição dos solos e da vegetação. Em cada uma das Regiões Geoambientais foram obtidos os geossistemas e geofácies que definiram as regiões equiproblemáticas. A Figura 10.2 exemplifica as sobreposições entre os mapas temáticos, realizadas com operadores booleanos (AND, OR, XOR, NOT), para geração das regiões equiproblemáticas do diagnóstico geoambiental preliminar do Amapá em 1989.

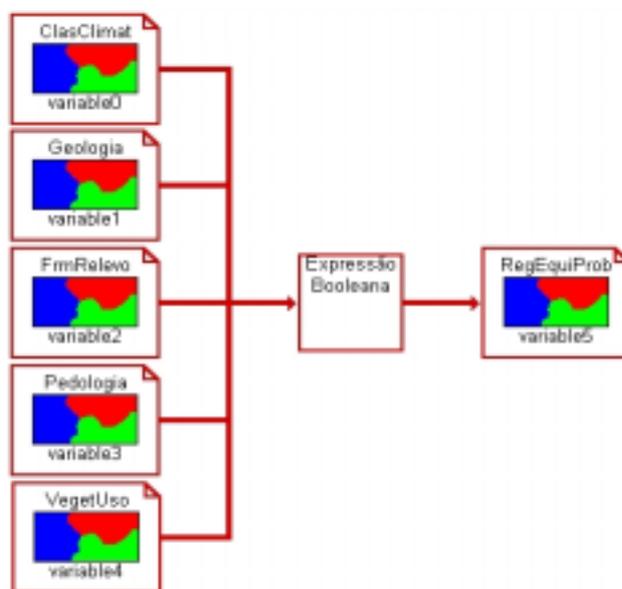


Figura 10.2. Esquema da combinação entre mapas temáticos.

Além da utilização na elaboração de diagnósticos ambientais, os métodos baseados em localizações pontuais são largamente utilizados na implementação de modelos empíricos.

10.3.1 Aplicação da Equação Universal de Perdas de Solos

Um exemplo de aplicação em modelos empíricos foi o trabalho realizado por Kuntschik 40, que implementou um modelo para a estimativa da perda de solos por erosão hídrica na microbacia do Ribeirão das Araras, em Araras, no Estado de São Paulo. Todo o projeto foi desenvolvido na escala 1: 50.000.

Para tanto, foram utilizadas técnicas de geoprocessamento, visando identificar dentro da bacia, as regiões com maior susceptibilidade à perda de solos por erosão hídrica. O modelo escolhido é a Equação Universal de Perda de Solo (USLE). Este modelo leva em conta seis fatores: erosividade, dada pela capacidade da chuva de provocar desprendimento e arrasto de solo, erodibilidade, que quantifica a susceptibilidade de um solo a ser erodido pela chuva, fator topográfico que considera comprimento de encosta e declividade, e o fator antrópico, que inclui cobertura e uso do solo e práticas conservacionistas.

A partir do mapa de solos, cartas topográficas e dos valores numéricos correspondentes a cada fator considerado, foram criados arquivos matriciais em formato ASCII. Nestes arquivos, cada número representa o valor da grandeza para uma área quadrada de 250 m de lado no terreno. Estes arquivos foram tratados através de planilhas de cálculo e das funções disponíveis no SIG, sendo gerados os mapas de potencial natural de erosão (PNE) e de perdas solos calculadas (A), conforme mostram as Figura 10.3 e Figura 10.4.

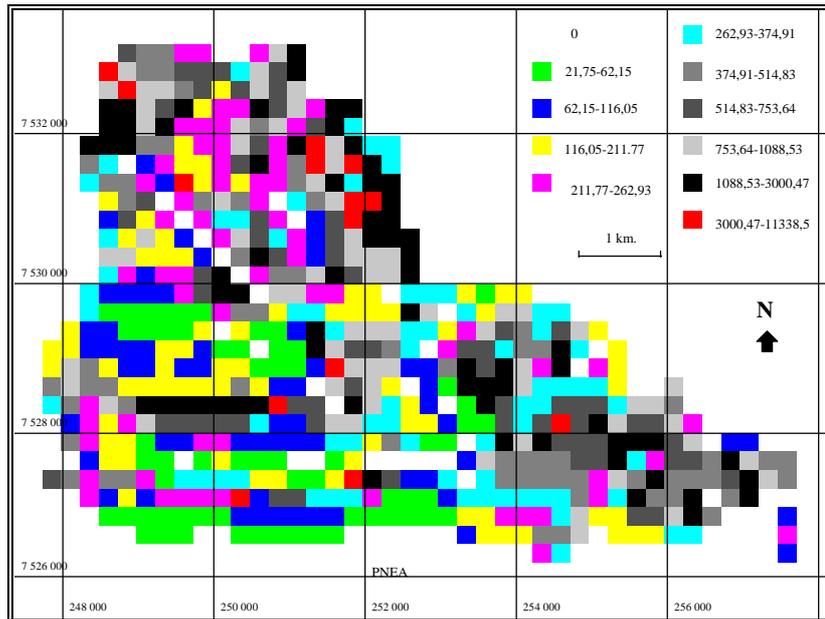


Figura 10.3. Potencial Natural de Erosão Anual (em ton./ha.ano⁻¹). Fonte: Kuntschik 40.

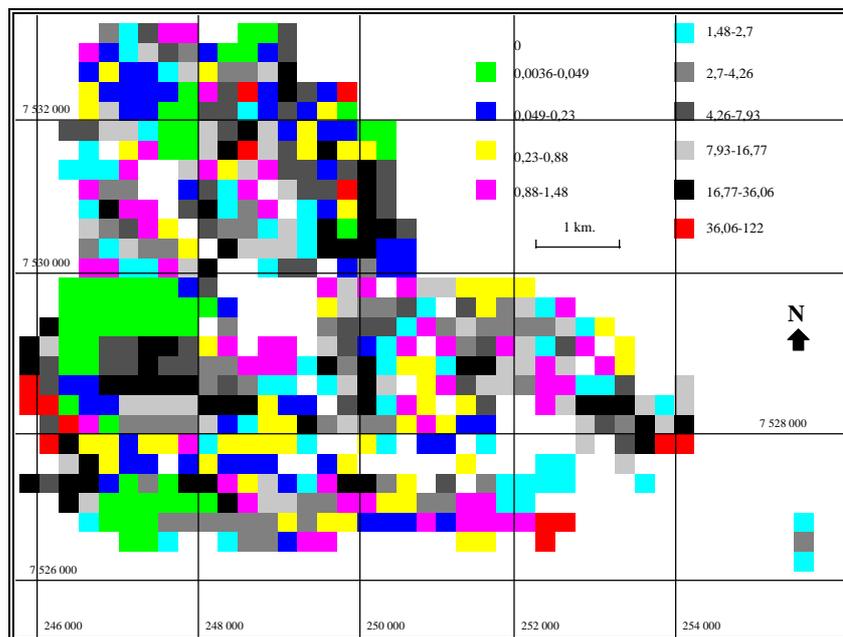


Figura 10.4. Perda de Solo Calculada (em ton./ha.ano⁻¹) Fonte: Kuntschik 40.

O potencial natural de erosão é dado pela seguinte equação: $PNE = R * K * LS$, onde:

R é erosividade da chuva anual, K é a erodibilidade do solo e LS é uma variável calculada a partir do comprimento da encosta L .

A declividade média S , através da fórmula: $LS = 0,00984 * L^{0,63} * S^{1,18}$.

A erosividade da chuva (R) é dada por: $R = 67.335 (p^2/P)^{0.85}$, onde p é a precipitação média mensal e P é a precipitação média anual.

Neste exemplo para a bacia do Ribeirão das Araras na região de Araras o valor de R corresponde a 6675. A erodibilidade do solo (K), ou seja a resistência deste à ação da chuva, depende diretamente do tipo de solo em questão. Para cada tipo de solo há um valor associado de acordo com a tabela proposta por Lombardi Neto 42.

A partir do mapa de altimetria, gerou-se um modelo numérico de terreno utilizando-se o interpolador TIN (grade triangular). Desta grade, gerou-se outra grade de declividade e um mapa temático com classes de declividade. O valor do comprimento da encosta (L), ou percurso da água, foi obtido a partir de um mapa de distância entre o limite da bacia e os níveis mais baixos de altimetria, resultando em um modelo numérico do terreno.

A partir desta formulação metodológica, apresentamos a seguir um programa em LEGAL que realiza este procedimento. O LEGAL foi utilizado para:

- converter o mapa de solos em uma grade de valores de erodibilidade, utilizando-se a função PONDERE;
- converter o mapa de classes de declividade em uma grade de valores médios de declividade, utilizando o valor central de cada intervalo, também através da função PONDERE;
- aplicar a equação universal de perda de solo considerando todos os parâmetros acima, gerando uma grade onde cada ponto da superfície está associado ao valor de potencial natural de erosão.

Apresenta-se a seguir a sintaxe utilizada:

```
{
//Declaração das variáveis
Tematico solo ("solo"), decl ("declive");
Numerico S ("decliv-media"), K ("erodibilidade"),
          L ("encosta"), LS ("LS"), pne ("PNE");
Float      R = 6675.;
Tabela tabk (Ponderacao), tabs (Ponderacao);
// Transforma Declividade em (S) declividade media
decl= Recupere(Nome = "Declividade");
S = Novo ( Nome = "DeclivMedia", Representacao = Matriz,
          ResX = 250, ResY = 250, Escala = 100000, Min = 0, Max =
50);
tabs = Novo(CategoriaIni="declive",
```

```

    "0-3" : 1.5,           "3-6" : 4.5,
    "6-12" : 9.0,        "12-20" : 123.0,
    "20-40" : 30.0,     ">40" : 40.0 );
S = Pondere (decl,tabs);
//Transf. solo em erodibilidade (K)
solo= Recupere(Nome = "TiposdeSolo");
K = Novo (Nome = "Erodibilidade(K)", Representacao = Grade,

    ResX = 250, ResY = 250, Escala = 100000, Min = 0, Max = 1);
tabk = Novo (CategoriaIni = "solo",
"pv2alva" : 0.0462,      "pv3Olaria" : 0.0280,
"pv3+pv4" : 0.028,      "lrd+le1" : 0.0143,
"lrdbaraogeraldo" : 0.0128, "lreribpreto" : 0.0098,
"le1+lrd" : 0.01514,    "LV4+LV3" : 0.0132
"lvsmatodentro" : 0.0246, "te" : 0.0181,
"serrinha" : 0.0462 ,   "pv2usina" : 0.0462,
"li3" : 0.0442,         "pv5" : 0.0462,
"li2" : 0.0362 ,       "urbano" : 0,
"li2+pv4" : 0.03292,   "lrd+lre" : 0.0116 ,
"le1" : 0.0167,        "agua" : 0,
"lv4speculas" : 0.0132, "LV3LaranjAzeda" : 0.0132);
K = Pondere (solo, tabk);
// Calculo de LS
L= Recupere(Nome = "L-CompEncosta");
LS = Novo (Nome = "LS",      Representacao = Grade,
    ResX = 250, ResY = 250, Escala = 100000, Min = 0, Max = 100
);
LS= 0.00984 * (L^0.63)* (S^1.18);
// Calculo de PNE
PNE = Novo (Nome = "PotNatErosao", Representacao = Grade,
    ResX = 250, ResY = 250, Escala = 100000, Min = 0, Max =
100);
PNE = R*K*LS;
}

```

Esta equação pode ser aplicada a outras áreas desde que os parâmetros de solo, altimetria e precipitação estejam disponíveis para a mesma.

10.3.2 Avaliação de riscos de inundação e movimentos de massa

Outro exemplo de estudo ambiental que combina as variáveis geográficas baseando-se em localizações pontuais, foi o trabalho desenvolvido por Montoya *et alii* 47 para identificação de áreas de risco a inundações e a movimentos de massa e na bacia do Rio Buquira, afluente do Rio Paraíba, em São José dos Campos - SP.

As inundações são fenômenos naturais que ocorrem devido a uma excessiva precipitação num determinado período de tempo (Siebert 60). O desmatamento, que reduz a

retenção de água no solo e promove um aumento no escoamento superficial incluindo o incremento da remoção e transporte de sedimentos, em conjunto com o processo de urbanização, que por sua vez favorece a impermeabilização da superfície do solo, são fatores que aumentam os riscos de inundação.

Em geral, as inundações ocorrem quando os cursos d'água recebem quantidades de água bem maior que suas capacidades de armazenamento e vazão. Como consequência, a água sobrepõe as margens, estendendo-se sobre toda a planície de inundação do vale, atingindo maior ou menor extensão em função de suas características físicas tais como: capacidade de infiltração dos solos, solos com camada impermeável, ou com lençol freático próximo da superfície, etc.

Dunne & Leopold 22 sugerem que para a previsão de inundações e de seus efeitos devem ser estudados um ou vários dos seguintes fatores: volume de escoamento superficial; descargas máximas; altura da inundação; hidrograma com a distribuição no tempo da vazão máxima e do volume escoado; área inundada; e velocidade da água.

Esta forma de avaliação das inundações só podem ser efetuadas quando se dispõe dos dados quantitativos referentes aos fatores supracitados. Entretanto, quando tais dados não estão disponíveis, a identificação e delimitação de áreas inundáveis podem ser realizadas através do estudo de características físicas da bacia.

Todas as áreas potencialmente sujeitas a inundações foram formadas por processos similares e portanto possuem certos atributos ou indicadores ambientais que podem caracterizá-las: morfologia suave, normalmente limitadas pelas encostas dos vales; nível freático elevado e por conseguinte, com drenagem interna deficiente; vegetação com espécies adaptadas a condições de umidade excessiva; e inundações ocasionais de cursos d'água.

Existem diferentes métodos para delimitação destas áreas e são baseados: nas características fisiográficas do vale, incluindo a identificação e cartografia das áreas planas e baixas situadas ao redor dos cursos d'água; nos solos, onde são identificados materiais depositados por transporte (aluvião); na cobertura vegetal, onde são identificadas espécies de plantas associadas com alto grau de umidade e condições de alagamento; e nos dados históricos de inundações, determinados por medidas, ou até mesmo por pessoas ou técnicos que conhecem a área (Wolman, 1978 *apud* CEOTMA 14).

O reconhecimento de áreas potencialmente instáveis, sujeitas a movimentos de massa e a deslizamentos é uma tarefa fundamental que deve ser incluída nas primeiras fases do planejamento para uso do solo. As técnicas usadas para avaliar a instabilidade do terreno incluem pelo menos um dos seguintes procedimentos (Marsh 44): o estudo histórico e a localização de movimentos de massa em encostas ocorridos no passado; a identificação e estudo das condições que motivam os movimentos de massa em uma determinada área; o reconhecimento e o estudo do efeito desestabilizador que determinadas condições climáticas e geotécnicas poderiam ter .

Os estudos históricos devem realizar-se combinando o trabalho de campo com o uso das fotografias aéreas. Em regiões áridas sua identificação é relativamente simples, porém em áreas com vegetação torna-se necessário identificar as descontinuidades na mesma cobertura vegetal, onde plantas mais jovens podem indicar os deslizamentos. Também é importante reconhecer a presença de depósitos detritícos de encostas, talus, colúvios e cones de dejeção, e compará-los com as formações geológicas adjacentes, onde indicações de movimento ou deformação dos materiais originais poderiam ser detectadas. É conveniente rever as inclinações de torres e postes de energia ou de telecomunicações e possíveis alterações no alinhamento de cercas ou canais. Em resumo, devem ser considerados três fatores (CEOTMA 14): as condições geológicas, a declividade das encostas e as ações humanas.

São várias as possibilidades metodológicas para a utilização dos fatores ambientais e antrópicos para determinação das áreas de risco de movimento de massa ou deslizamento.

Uma delas poderia ser a sobreposição entre o mapa de declividade e um mapa geológico, ou outro qualquer que tenha relação com os materiais constituintes das encostas. O mapa resultante pode ser classificado por meio de uma legenda que descreva as características cada classe (uma espécie de mapa geotécnico). Outra abordagem mais ambiciosa, apresenta 7 classes de susceptibilidade aos deslizamentos a partir da combinação de graus de declividade e a litologia (tipo e estrutura da rocha, grau de cimentação, grau de coesão, etc.), São elas: instabilidade mínima, instabilidade baixa, instabilidade moderada, instabilidade moderadamente alta, instabilidade alta, instabilidade muito alta, instabilidade máxima (CEOTMA 14).

No caso da área de estudo foram produzidos dois mapas complementares, um com as áreas de risco potencial de inundação e o outro para as áreas sujeitas aos movimentos de massa (Figura 10.5A e Figura 10.5B), sendo que os procedimentos adotados derivaram das orientações metodológicas apresentadas acima. Foram utilizados os seguintes dados: mosaico de fotografias aéreas coloridas, mapa geotécnico, mapa topográfico e rede drenagem.

Os mapas foram inseridos no SIG através de digitalização manual, criando-se uma base de dados, contendo o plano de informação (PI) “mosaico de fotografias aéreas”, o PI geotécnico (geo-campo temático) e o PI de altimetria (geo-campo numérico). As primeiras operações foram realizadas sobre o geo-campo numérico de altimetria com objetivo de serem obtidos os seguintes produtos:

- um geo-campo temático de hipsometria (classes de altitude), no qual a altimetria da área de estudo foi classificada, através de uma operação de fatiamento, em 9 classes (intervalo de classe de 15m), da cota mínima de 550m até a cota máxima de 665m;
- um geo-campo numérico de declividade, gerado a partir da operação de geração de declividade sobre o geo-campo numérico de altimetria;

- um geo-campo temático com 05 classes de declividade, produzido por uma operação de fatiamento sobre o geo-campo numérico de declividade;
- um geo-campo temático de áreas potenciais de risco de inundação (Figura 10.5 A), com 05 classes (**muito baixo** – altitude >570m, **baixo** – altitudes entre 565 e 570m, **médio** – entre 560 e 565m, **alto** – entre 555 e 560m e **muito baixo** – altitudes menores que 555m), gerado através de uma operação de fatiamento sobre o geo-campo numérico de altimetria.

Para geração do geo-campo temático contendo as áreas de risco potencial aos movimentos de massa (Figura 10.5B) foram sobrepostos os geo-campos temáticos de classes de declividade e geotécnico, utilizando-se o operador booleano AND (interseção).

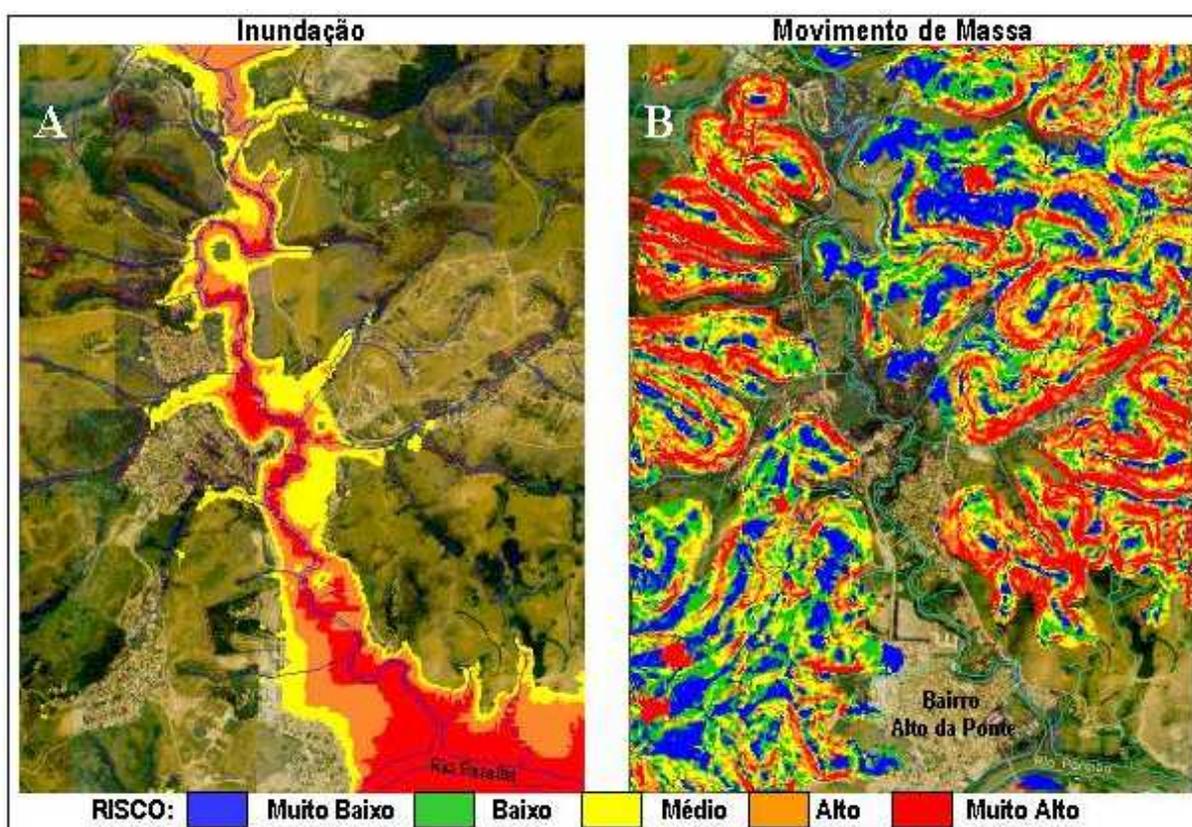


Figura 10.5. Áreas sujeitas a inundação e a movimentos de massa na Bacia do Rio Buquira, próximas ao Bairro Alto da Ponte e adjacências.

Para efetuar esta sobreposição foi utilizado um programa escrito em álgebra de mapas, cuja sintaxe é apresentada a seguir:

```
// Início do Programa
{
// Declaracao de Variaveis
Tematico  entral ("Decliv_TEM");
```

```
Tematico  saida  ("Area de Riesgos");
Tematico  entra2 ("Geotecnico");

//  Instanciacao de Variaveis
entral = Recupere (Nome="Decliv_TEM");
saida  = Novo(Nome="MoviMassa", ResX=10,ResY=10,Escala=10000);
entra2 = Recupere (Nome="Geotecnico");

// Execucao da operacao de sobreposicao

saida = Atribua (CategoriaFim = "Area de Riesgos")
{
  "MuitoAlto":(entral.Classe == "muy alta" .AND. entra2.Classe ==
  "IV_Col_Mor_Sed_Aren"),
  "MuitoAlto":(entral.Classe == "muy alta" .AND. entra2.Classe ==
  "V_Col_Mor_Sed_Argil"),
  "MuitoAlto": (entral.Classe == "muy alta" .AND. entra2.Classe
  == "VI_Col_Mor_Emb_Crist"),
  "MuitoAlto": (entral.Classe == "muy alta" .AND. entra2.Classe
  == "VII_Mor_Migmat_Gna_Xis_Filitos"),
  "MuitoAlto": (entral.Classe == "muy alta" .AND. entra2.Classe
  == "VIII_Mor_RGraniticas"),
  "MuitoAlto": (entral.Classe == "muy alta" .AND. entra2.Classe
  == "IX_Mont_Escarpas"),
  "Alto"      : (entral.Classe == "alta" .AND. entra2.Classe ==
  "IV_Col_Mor_Sed_Aren"),
  "Alto"      : (entral.Classe == "alta" .AND. entra2.Classe ==
  "V_Col_Mor_Sed_Argil"),
  "Alto"      : (entral.Classe == "alta" .AND. entra2.Classe ==
  "VI_Col_Mor_Emb_Crist"),
  "Alto"      : (entral.Classe == "alta" .AND. entra2.Classe ==
  "VII_Mor_Migmat_Gna_Xis_Filitos"),
  "Alto"      : (entral.Classe == "alta" .AND. entra2.Classe ==
  "VIII_Mor_RGraniticas"),
  "Alto"      : (entral.Classe == "alta" .AND. entra2.Classe ==
  "IX_Mont_Escarpas"),
  "Medio"     : (entral.Classe == "media" .AND. entra2.Classe ==
  "IV_Col_Mor_Sed_Aren"),
  "Medio"     : (entral.Classe == "media" .AND. entra2.Classe ==
  "V_Col_Mor_Sed_Argil"),
  "Medio"     : (entral.Classe == "media" .AND. entra2.Classe ==
  "VI_Col_Mor_Emb_Crist"),
  "Medio"     : (entral.Classe == "media" .AND. entra2.Classe ==
  "VII_Mor_Migmat_Gna_Xis_Filitos"),
  "Medio"     : (entral.Classe == "media" .AND. entra2.Classe ==
  "VIII_Mor_RGraniticas"),
  "Medio"     : (entral.Classe == "media" .AND. entra2.Classe ==
  "IX_Mont_Escarpas"),
  "Baixo"     : (entral.Classe == "baja" .AND. entra2.Classe ==
  "IV_Col_Mor_Sed_Aren"),
```

```

"Baixo"      : (entra1.Classe == "baja" .AND. entra2.Classe ==
"V_Col_Mor_Sed_Argil"),
"Baixo"      : (entra1.Classe == "baja" .AND. entra2.Classe ==
"VI_Col_Mor_Emb_Crist"),
"Baixo"      : (entra1.Classe == "baja" .AND. entra2.Classe ==
"VII_Mor_Migmat_Gna_Xis_Filitos"),
"Baixo"      : (entra1.Classe == "baja" .AND. entra2.Classe ==
"VIII_Mor_RGraniticas"),
"Baixo"      : (entra1.Classe == "baja" .AND. entra2.Classe ==
"IX_Mont_Escarpas"),
"MuitoBaixo" : (entra1.Classe == "muy_baja" .AND.
entra2.Classe == "IV_Col_Mor_Sed_Aren"),
"MuitoBaixo" : (entra1.Classe == "muy_baja" .AND.
entra2.Classe == "V_Col_Mor_Sed_Argil"),
"MuitoBaixo" : (entra1.Classe == "muy_baja" .AND.
entra2.Classe == "VI_Col_Mor_Emb_Crist"),
"MuitoBaixo" : (entra1.Classe == "muy_baja" .AND.
entra2.Classe == "VII_Mor_Migmat_Gna_Xis_Filitos"),
"MuitoBaixo" : (entra1.Classe == "muy_baja" .AND.
entra2.Classe == "VIII_Mor_RGraniticas"),
"MuitoBaixo" : (entra1.Classe == "muy_baja" .AND.
entra2.Classe == "IX_Mont_Escarpas")
};
}
// Fim

```

10.4 MÉTODOS BASEADOS NA DEFINIÇÃO DE ÁREAS HOMOGÊNEAS

Em Geoprocessamento, estes métodos objetivam identificar e descrever unidades homogêneas por meio dos procedimentos analíticos disponíveis num SIG. Quando o objetivo é o agrupamento destas unidades homogêneas, segundo algum método classificatório ou organizacional do espaço geográfico através de procedimentos de síntese disponíveis num SIG, tem-se um processo denotado de *regionalização por agregação ou agrupamento*.

10.4.1 O Processo de zoneamento em SIG

Ao pensar o espaço geográfico como um conjunto de objetos e um conjunto de ações (Santos 58) pode-se imaginar que uma proposta de *zoneamento* busca a partição do espaço por meio da identificação de uma ou várias dessas ações. Quer dizer que uma proposta de *zoneamento* pode ser entendida como um processo de *regionalização* a partir de um conjunto de intenções. Por exemplo, em um zoneamento agro-climático ou pedo-climático são definidas porções do território de acordo com critérios que objetivam melhorar a produtividade agropecuária; no caso do zoneamento ecológico-econômico (ZEE) a *regionalização* parte de uma escala de trabalho e por conseguinte, de uma proposição teórica

para a definição de paisagem e de uma proposta classificatória para as várias unidades de paisagem identificadas pelos procedimentos analíticos.

Os critérios para realizar a *regionalização* dependem fundamentalmente das características do produto desejado. Para cada um, deve-se identificar variáveis explicativas, cujo interrelacionamento permite caracterizar adequadamente as diferentes unidades territoriais e realizar o particionamento do espaço geográfico de forma satisfatória. Por exemplo, ao transpor estas idéias para um SIG, em termos operacionais, no caso do ZEE, deve ser gerado um único mapa cadastral composto por várias unidades territoriais básicas, onde cada uma delas possui características particulares sob o ponto de vista biofísico e sócio-econômico (Medeiros 45).

Em síntese, este processo parte de um banco de dados geográficos no qual estão armazenados mapas cadastrais constituídos por geo-objetos (dos quais são conhecidos os atributos descritivos e a representação espacial). Escolhem-se os atributos descritivos para serem obtidos os mapas temáticos desejados e/ou atributos quantitativos que alimentarão modelos geradores de diagnósticos ou prognósticos.

10.4.2 Zoneamento Ecológico-Econômico

Na metodologia para Zoneamento Ecológico-Econômico descrita em Crepani et al. 19 e Becker e Egler 5, o uso de imagens de satélite serve como base para definição de unidades de paisagem (chamadas *unidades territoriais básicas*). Uma *unidade territorial básica* (UTB) exprime o conceito geográfico de zonalidade através de atributos ambientais que permitem diferenciá-la de outras unidades vizinhas, ao mesmo tempo em que possui vínculos dinâmicos que a articulam a uma complexa rede integrada por outras unidades territoriais, como por exemplo as unidades de levantamento censitário que consideram aspectos sociais, econômicos e políticos. O fluxograma mostrado pela Figura 10.6 resume as etapas da metodologia.

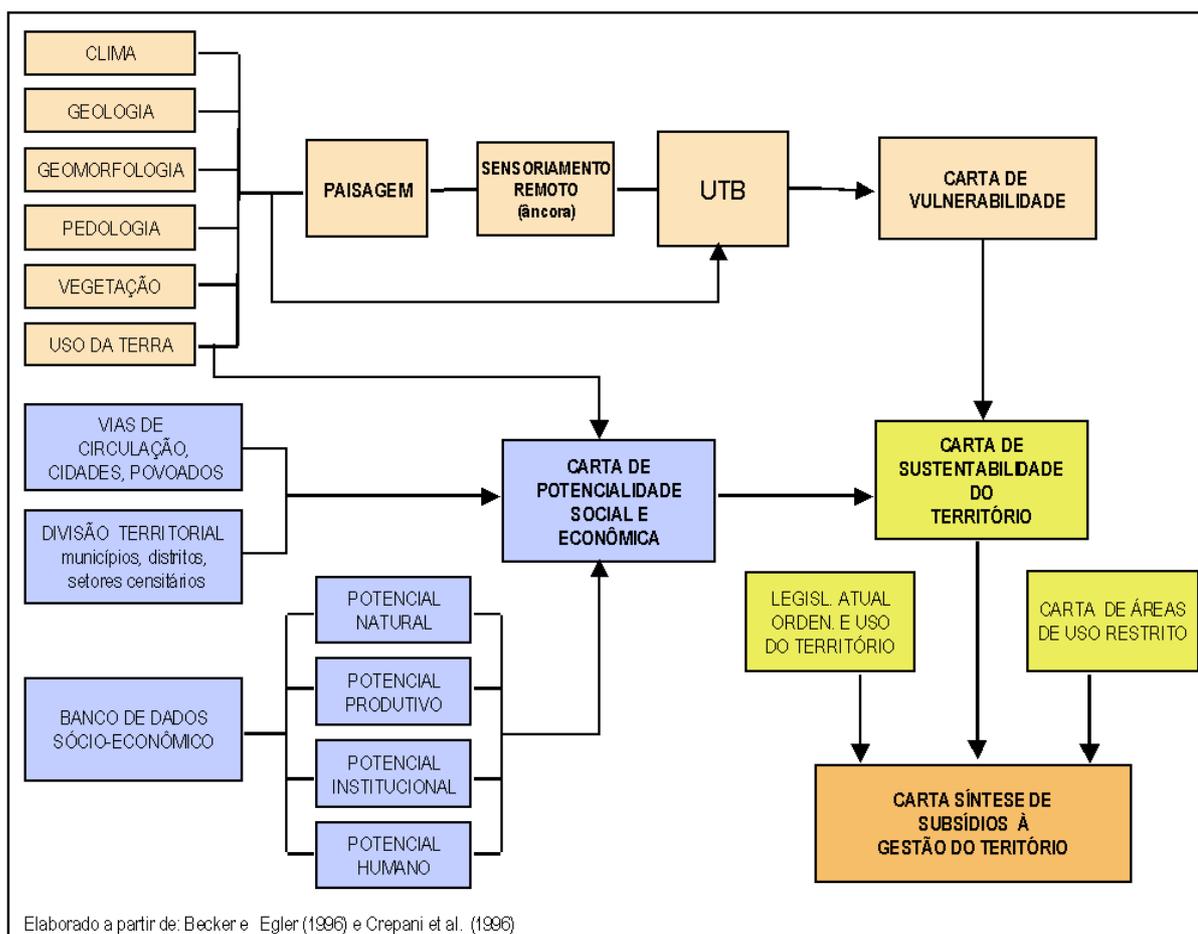


Figura 10.6. Fluxograma da metodologia do ZEE. (Fonte: Medeiros 45).

Estas UTBs são definidas por interpretação visual em imagens de sensores remotos, também utilizadas para a definição dos mapas derivados do meio físico-biótico, conforme ilustra a Figura 10.7.



Figura 10.7. UTBs identificadas sobre imagem de satélite (Fonte: Crepani et al. 19).

As UTBs da Figura 10.7 foram definidas por uma equipe multidisciplinar, sob uma visão integrada do clima, da geologia, da geomorfologia, dos solos e da cobertura vegetal e uso da terra e considerando os padrões fotográficos identificados pela variação dos matizes de cores, e pelos elementos de textura de relevo e drenagem. Nesta etapa de identificação e delimitação das UTB's a equipe multidisciplinar se orienta pelos mapas temáticos de Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Cobertura Vegetal e Uso da Terra e pelas informações climatológicas. Estes mapas, antes de serem utilizados, são revisados e atualizados usando-se as mesmas imagens de sensores remotos e em alguns casos, com apoio de campo.

Em termos operacionais, tanto a delimitação das UTB's como a revisão dos mapas temáticos são procedimentos de interpretação visual efetuadas diretamente na tela do computador, apoiados por funções de processamento de imagens (ampliação de contraste, filtros, componentes principais), que por sua vez, ampliam as possibilidades de extração de informação das imagens de sensores remotos.

Os produtos obtidos após esta etapa vão formar, em conjunto com as imagens, um banco de dados geográficos (BDG), com a seguinte constituição básica: imagens de sensores remotos; geo-campos temáticos (Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Cobertura Vegetal e Uso da Terra) com uma maior coerência entre eles, pois seus limites foram revistos sobre um mesmo produto (imagem de sensor remoto) e por uma equipe multidisciplinar; e um mapa cadastral que contém os geo-objetos UTB's, cujos atributos estão contidos numa tabela, conforme mostra a Figura 10.8.

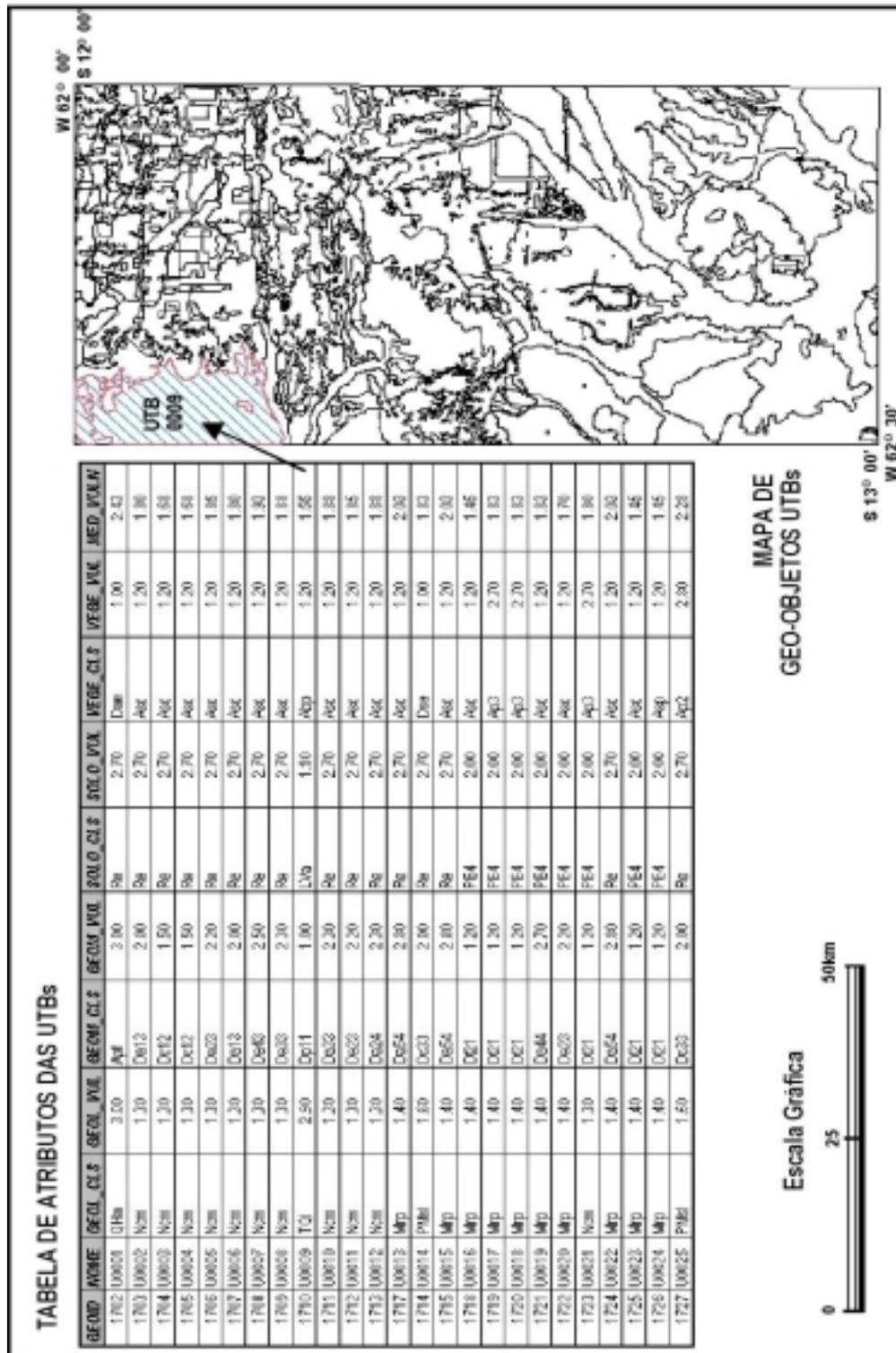


Figura 10.8. Mapa cadastral de UTB's e tabela de atributos.

Além destas informações, inclui-se também no BDG as informações sócio-econômicas. Estas informações costumam ser geradas a partir de unidades básicas político-administrativas – micro regiões, municípios, distritos e setores censitários – selecionadas em função do detalhamento da pesquisa a ser desenvolvida e em geral, são disponibilizadas na forma de tabelas. Para sua inclusão no BDG, a forma mais adequada é a utilização de um modelo cadastral, logo cada unidade básica de levantamento sócio-econômico é considerada como um geo-objeto. Todos os geo-objetos são representados num mapa cadastral e seus atributos estão nas tabelas com as informações sócio-econômicas.

Esta forma de estruturação do BGD disponibiliza através do modelo cadastral todo o conjunto de dados (meio físico-biótico e sócio-econômico) a ser utilizado na elaboração de diagnósticos, prognósticos e na construção de cenários no contexto do ZEE.

A partir deste ponto, todos procedimentos metodológicos podem ser facilmente automatizados. Utiliza-se basicamente quatro operações¹ da álgebra de mapas (vide Capítulo 3):

- **ponderação** - permite associar pesos que indicam a contribuição relativa de cada das classes de um tema (no caso do ZEE – Crepani *et alii* 19, indicam a contribuição do clima, geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura vegetal e uso da terra nos processos de morfogênese e pedogênese de acordo com a ecodinâmica de Tricart 64) e produz como resultado um geo-campo numérico que indicam a contribuição relativa de cada tema;
- **atualização** - transfere o conteúdo dos geo-campos temáticos e numéricos para a tabela de atributos das UTB's;
- **especialização** - transfere o conteúdo dos atributos dos geo-objetos UTB's para geo-campos temáticos ou numéricos, baseando-se no mapa cadastral das UTB's (utilizando-se os atributos descritivos de cada um dos temas obtém-se os respectivos mapas temáticos);
- **fatiamiento** - classifica os geo-campos numéricos especializados segundo intervalos de classes definidos pela metodologia gerando novos geo-campos temáticos.

Para exemplificar, selecionou-se os procedimentos necessários para gerar um geo-campo temático de sustentabilidade do território, conforme propôs Medeiros 45 para o

¹ Na prática, estas quatro operações podem ser entendidas como conversores entre diferentes representações de dados: operador **Pondere**, converte geo-campos temáticos em geo-campos numéricos ao associar valores às classes temáticas; operador **Atualize**, transfere o conteúdo dos geo-campos temáticos e numéricos para os atributos de uma tabela de geo-objetos (conversor mapa – tabela: geo-campo temático preenche atributos do tipo texto; geo-campo numérico preenche atributos do tipo inteiro ou real); operador **Especialize**, transfere os atributos de uma tabela de geo-objetos para geo-campos temáticos ou numéricos (conversor tabela – mapa: atributo do tipo texto produz geo-campo temático; atributo do tipo inteiro ou real produz geo-campo numérico); operador **Fatie**, converte geo-campo numérico em geo-campo temático a partir da associação de um intervalo de valores a uma classe temática.

detalhamento metodológico do ZEE (Becker & Egler 5), cuja operacionalização através da álgebra de mapas está resumida no fluxograma mostrado pela Figura 10.9.

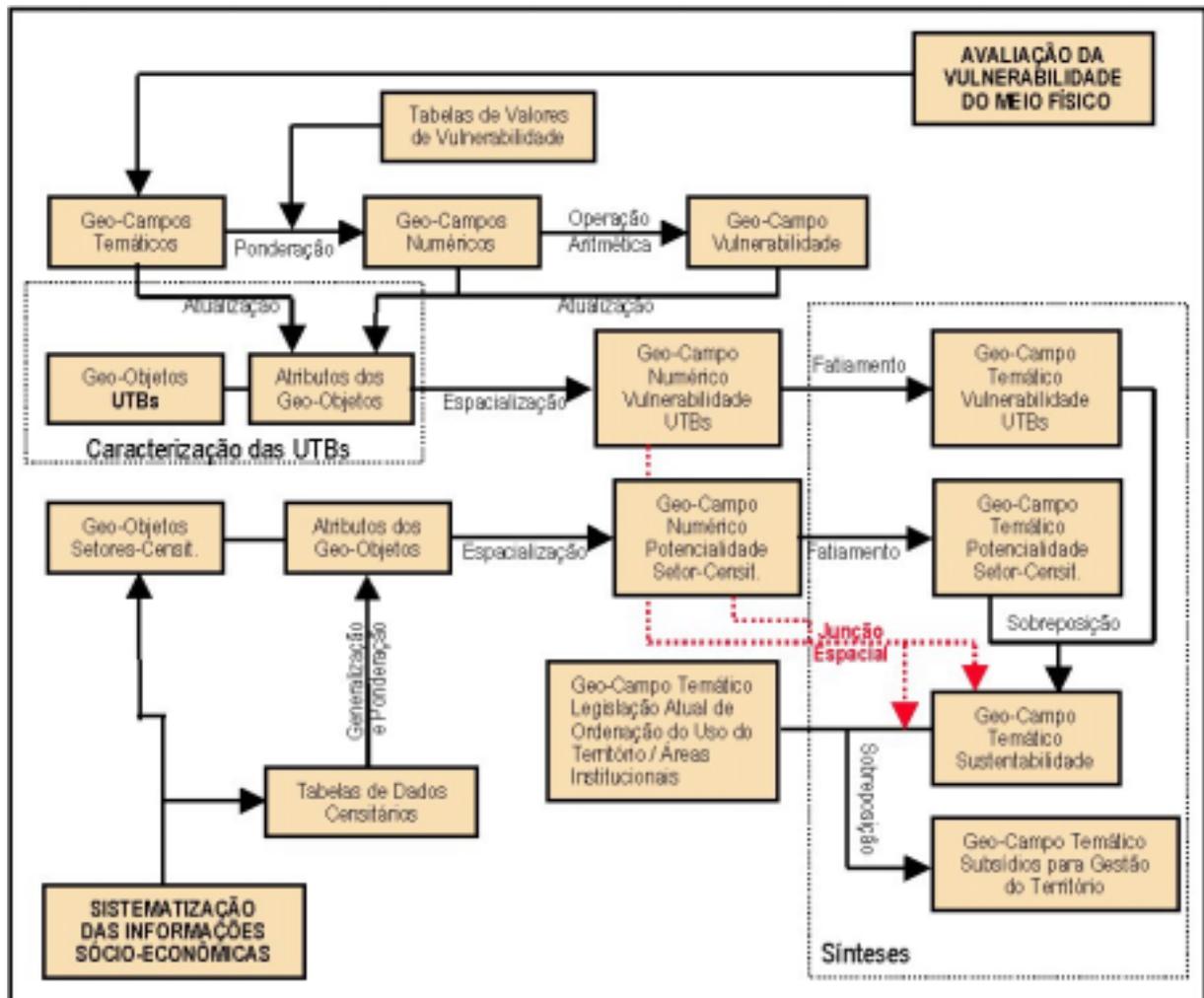


Figura 10.9. Operações em álgebra de mapas para operacionalização da metodologia do ZEE (Modificado de Medeiros 45).

Para ilustrar sobre a operação de ponderação, tomou-se como exemplo um mapa temático de solos, apresentado na Figura 10.10.

No processo morfodinâmico os solos participam como produto direto do balanço entre a morfogênese/pedogênese indicando claramente se prevaleceu o processo erosivo da morfogênese ou, se por outro lado, prevaleceu o processo de pedogênese, gerando solos bem desenvolvidos e, portanto, menos vulneráveis, sob o ponto de vista da ecodinâmica (Tricart 64). A maior ou menor resistência dos solos aos processos erosivos da morfogênese depende de diversos fatores intrínsecos tais como: estrutura do solo, tipo e quantidade das argilas, permeabilidade e profundidade do solo, e presença de camadas impermeáveis. Em função do grau de evolução e desenvolvimento dos solos foram atribuídos valores de vulnerabilidade

para as classes de solos e associações, baseando-se nos valores sugeridos por (Crepani *et alii* 19).

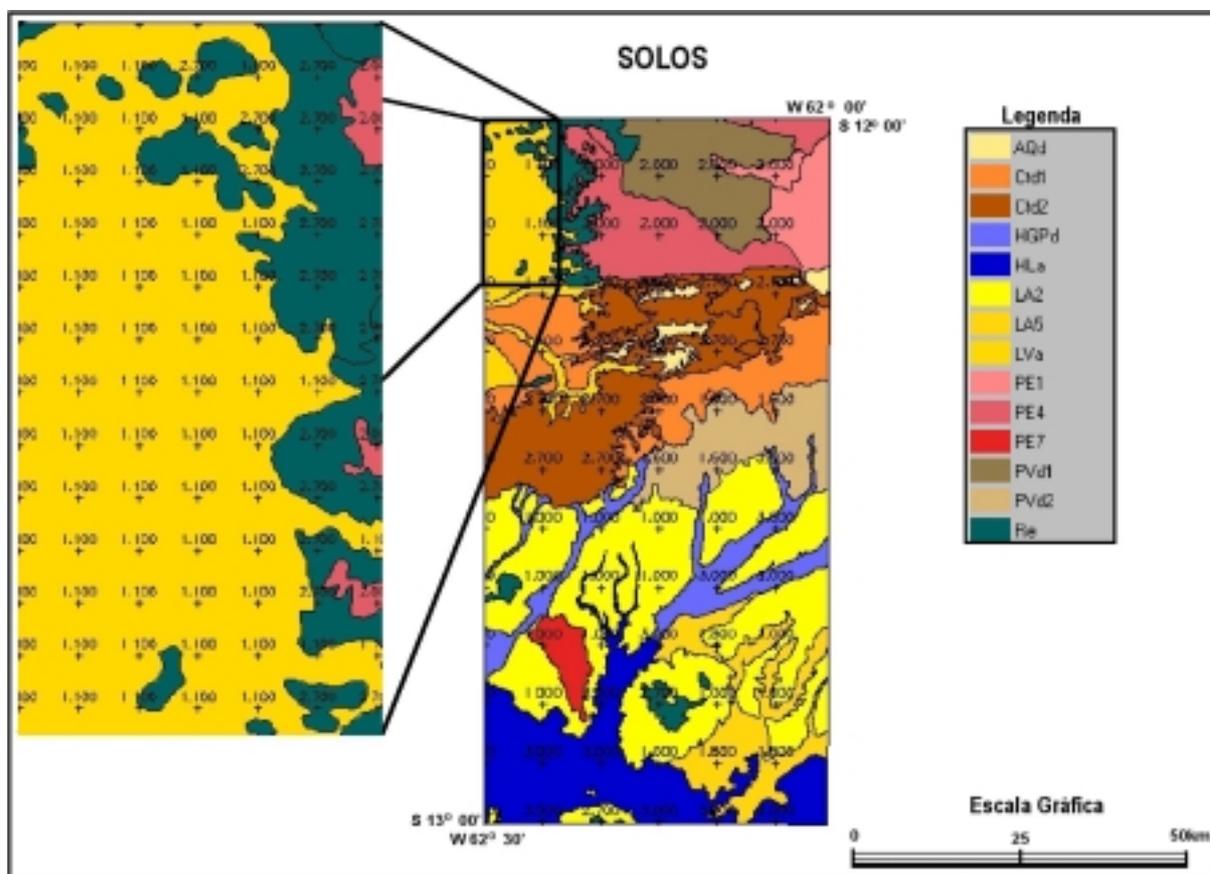


Figura 10.10. Ponderação sobre o geo-campo temático de solos. Fonte: Medeiros 45.

Como pode ser observado na Figura 10.10 através da operação de ponderação os geo-campo temáticos de solos foi convertido em um geo-campo numérico, onde o valores atribuído a cada classe indica a sua contribuição no balanço morfogênese – pedogênese. Esta operação foi efetuada pelo programa em álgebra de mapas apresentado a seguir.

```
//Inicio do programa
{
//Declaracao de variaveis
Tematico   EntraPIsolos      ("Pedologia_TM");
Numerico   SaiPIsoloponder  ("Vuln_GRD");
Tabela     TabVulnsolos     (Ponderacao);

//Instanciacao ou associacao de variaveis
EntraPIsolos   = Recupere (Nome= "solos_corr");

SaiPIsoloponder = Novo (Nome="vuln_solo", ResX=90, ResY=90,
Escala=250000, Min=0, Max=3);
```

```

TabVulnsolos      = Novo ( CategoriaIni="Pedologia_TM" ,
    "LA2" : 1.0,
    "LA5" : 1.8,
    "LVa" : 1.1,
    "PE1" : 2.0,
    "PE4" : 2.0,
    "PE7" : 2.1,
    "HLa" : 3.0,
    "Ctd1": 2.7,
    "Ctd2": 2.7,
    "HGPd": 3.0,
    "AQd" : 3.0,
    "Re"  : 2.7,
    "PVd1": 2.0,
    "PVd2": 1.6 );

// Executa a operacao
SaiPIsoloponder = Pondere (EntraPIsolos, TabVulnsolos);
}
//Fim

```

Como exemplo da operação de atualização, o leitor deve voltar a tabela de geo-objetos contida na Figura 10.8 e observar o atributos SOLO_CLS (classe de solos) e SOLO_VUL (valor de vulnerabilidade dos solos). O programa em álgebra de mapas apresentado a seguir faz o preenchimento da tabela com o conteúdo dos geo-campos temático e numérico.

```

// Inicio do programa
{
// ATUALIZA TABELA DE GEO-OBJETOS A PARTIR DE
// CONSULTAS EM PI DO MEIO FISICO: 1)PI TEMATICO, 2)PI MNT

// DECLARACOES PARA PEDOLOGIA (solo)

Objeto      objutb      ( "Un_Ter_Basica_Obj" );
Cadastral  utbs        ( "Un_Ter_Basica_Cad" );
Tematico   classolo    ( "Pedologia_TM" );
//Digital  vulnsolo    ( "Vuln_GRD" );

// RECUPERACAO DAS INFORMACOES

utbs = Recupere      ( Nome = "Utb_Cad" );
classolo = Recupere  ( Nome = "solos_corr" );
//vulnsolo = Recupere ( Nome = "vuln_solo" );

// EXECUCAO DA OPERACAO

```

```
// 1)PREENCHE ATRIBUTO DO TIPO TEXTO COM MAPA TEMATICO
objutb."SOLO_CLS"= Atualize (classosolo,objutb OnMap utbs,MaiZ);

// 2)PREENCHE ATRIBUTO DO TIPO NUMERICO COM VALORES DO MNT
objutb."SOLO_VUL"= Atualize (vulnsolo,objutb OnMap utbs,MedZ);
}
//Fim
```

Para o transferir o conteúdo dos geo-campos foram realizados os seguintes procedimentos:

- Para o atributo “SOLO_CLS”, cada geo-objeto UTB sobrepõe o geo-campo temático de solos, verifica (com o operador Maioria Zonal – MaiZ) qual a classe de solo dominante em relação a área do geo-objeto e transfere o nome da tal classe para o registro referente ao geo-objeto na tabela;
- O mesmo acontece para o atributo “SOLO_VUL”, porém utilizando o operador Média Zonal e neste caso o valor transferido para a tabela é a média aritmética dos valores encontrados na região do geo-campo numérico que foi sobreposta pelo geo-objeto.

Para ilustrar sobre a espacialização tomou-se o atributo “VULN_MED” da tabela contida na Figura 10.8, que foi espacializado através do programa em álgebra de mapas apresentado a seguir.

```
//INICIO DO PROGRAMA
{
//CONVERSAO DE GEO-OBJETOS (CADASTRAL) EM GEO-CAMPOS
//GERACAO DE GEO-CAMPO A PARTIR DE ATRIBUTO NUMERICO
//DA TABELA DE GEO-OBJETOS (Atributo: MED_VULN)

//DECLARACOES DE VARIAVEIS
Objeto    objutb      ( "Un_Ter_Basica_Obj" );
Cadastral utbs       ( "Un_Ter_Basica_Cad" );
Numerico SaiMNT     ( "Vuln_GRD" );

//RECUPERA O MAPA CADASTRAL
utbs      = Recupere (Nome = "Utb_Cad");

//CRIA GEO-CAMPO NUMERICO
SaiMNT = Novo (Nome = "vuln_medutb", ResX =90, ResY =90, Escala
= 250000, Min= 0.0000, Max= 3.0000);

// EXECUTA A OPERACAO
SaiMNT = Espacialize ( objutb."MED_VULN" OnMap utbs );
}
//FIM DO PROGRAMA.
```

A Figura 10.11-Espacialização mostra o geo-campo numérico obtido a partir da execução da operação de espacialização.

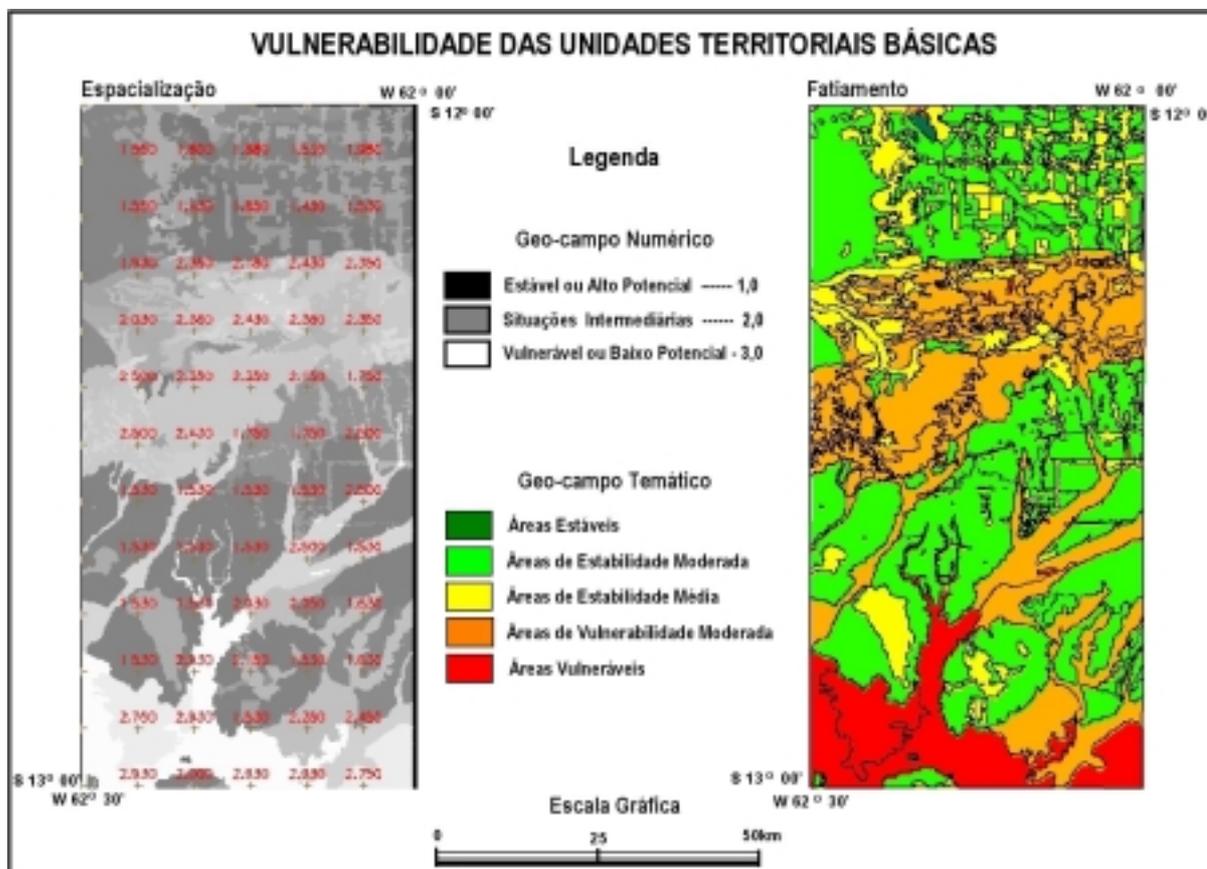


Figura 10.11. Geo-campos numérico e temático de vulnerabilidade das UTBs (Fonte: Medeiros 45).

Para ilustrar sobre a operação de fatiamento, os valores de vulnerabilidade do geo-campo numérico obtido da operação de espacialização (Figura 10.11-Espacialização), foram agrupados em classes de vulnerabilidade (Figura 10.11-Fatiamento) utilizando-se o operador **Fatie**, através do seguinte programa em álgebra de mapas:

```
//INICIO DO PROGRAMA
{
//GERACAO DE GEO-CAMPO TEMATICO A PARTIR DE FATIAMENTO
// DE GEO-CAMPO NUMERICO (MNT) MNT: vuln_medutb
//DECLARACOES
Numerico  entramnt  ("Vuln_GRD");
Tematico  fatiamnt  ("Vuln_Amb_SE_TM");
Tabela    TBvuln    (Fatiamento);

//RECUPERA GEO-CAMPO NUMERICO
entramnt = Recupere (Nome = "vuln_medutb");
```

```

//CRIA PI TEMATICO
fatiamnt = Novo (Nome = "med_vuln_TM", ResX=90, ResY=90, Escala
= 250000);

//TABELA COM INTERVALOS DE CLASSE PARA FATIAMENTO
TBvuln = Novo ( CategoriaFim= "Vuln_Amb_SE_TM",
               [1.00,1.40] : "est-alto_pot",
               [1.40,1.80] : "mod_est-pot_mod_alto",
               [1.80,2.20] : "intermediaria",
               [2.20,2.60] : "mod_vul-pot_mod_baixo",
               [2.60,3.00] : "vuln-baixo_pot" );

//EXECUTA A OPERACAO
fatiamnt= Fatie (entramnt,TBvuln);
} //FIM DO PROGRAMA

```

Para as operações de fatiamento efetuadas para obtenção dos geo-campos temáticos de vulnerabilidade à perda de solo e de potencialidade social e econômica foram utilizados os intervalos de classe da Tabela 10.1.

Tabela 10.1: CLASSES TEMÁTICAS DE VULNERABILIDADE E POTENCIALIDADE

Classes dos Geo-campos temáticos		Intervalo de Classe p/ Geo-campo Numérico	Cor da Classe
Vulnerabilidade do Meio Físico	Potencialidade Social e Econômica		
Estáveis	Potencial Alto	1,0 - 1,4	verde
Moderada Estabilidade	Pot. Moderad. Alto	1,4 - 1,8	verde-amarelado
Média Estabilid./Vulnerab.	Médio Potencial	1,8 - 2,2	Amarelo
Moderada Vulnerabilidade	Pot. Moderad. Baixo	2,2 - 2,6	vermelho-amarelado
Vulneráveis	Potencial Baixo	2,6 - 3,0	Vermelho

Adaptado de Crepani *et alii* 19 e Becker e Egler 5.

Para a geração dos geo-campos numérico e temático de potencialidade social e econômica foram utilizados os operadores **Espacialize** e **Fatie** da mesma forma que na obtenção dos respectivos geo-campos de vulnerabilidade, descritos acima. A espacialização do atributo potencial social e econômico médio – MED_SOEC) que descreve os geo-objetos setores censitários foi efetuada utilizando-se o operador ESPACIALIZE, através do seguinte programa em LEGAL:

```

// INICIO DO PROGRAMA
{
//CONVERSAO DE OBJETOS (CADASTRAL) EM GEO-CAMPO NUMERICO
//GERACAO DE GEO-CAMPO A PARTIR DE ATRIBUTO NUMERICO
//DA TABELA DE OBJETOS (INDICADOR:MED_SOEC)
//Obtido a partir da media entre os indicadores
//educacao, saneamento, renda e moradia.

//DECLARACOES DE VARIAVEIS
Objeto    PegaAtribSetor    ("Div_Pol_Adm_Obj");
Cadastral EntraMapCad      ("Div_Pol_Adm_Cad");
Numerico SaiMNT            ("Vuln_GRD");

//RECUPERA O MAPA DE GEO-OBJETOS
EntraMapCad      = Recupere (Nome = "set_cens_91" );

//CRIAR GEO-CAMPO NUMERICO
SaiMNT = Novo (Nome = "ptse_soec", ResX =90, ResY =90, Escala =
250000, Min= 0, Max= 3);

// EXECUTA A OPERACAO
SaiMNT = Espacialize ( PegaAtribSetor."MED_SOEC" OnMap
EntraMapCad);
} //FIM DO PROGRAMA

```

Em seguida, os valores de potencialidade do geo-campo numérico, resultante da operação de espacialização, foram agrupados em classes de potencialidade social e econômica, conforme a Tabela 10.1, utilizando-se o operador FATIE e através do seguinte programa em LEGAL:

```

//INICIO DO PROGRAMA
{
//GERACAO DE GEO-CAMPO TEMATICO A PARTIR DE FATIAMENTO
// DE NUMERICO (MNT)
//MNT: ptse_soec
//DECLARACOES DE VARIAVEIS
Numerico entramnt    ("Vuln_GRD");
Tematico fatiamnt    ("Vuln_Amb_SE_TM");
Tabela    TBvuln     (Fatiamento);

//RECUPERA GEO-CAMPO NUMERICO
entramnt = Recupere (Nome = "ptse_soec");

//CRIAR PI TEMATICO
fatiamnt = Novo (Nome = "med_soec_TM", ResX=90, ResY=90, Escala
= 250000);

```

```
//TABELA COM INTERVALOS DE CLASSE PARA FATIAMENTO
TBvuln = Novo ( CategoriaFim= "Vuln_Amb_SE_TM",
                [1.00,1.40] : "est-alto_pot",
                [1.40,1.80] : "mod_est-pot_mod_alto",
                [1.80,2.20] : "intermediaria",
                [2.20,2.60] : "mod_vul-pot_mod_baixo",
                [2.60,3.00] : "vuln-baixo_pot" );

//EXECUTA A OPERACAO
fatiamnt= Fatie (entramnt,TBvuln);
} //FIM DO PROGRAMA
```

A Figura 10.12 mostra os resultados das operações de espacialização e fatiamento do atributo MED_SOEC.

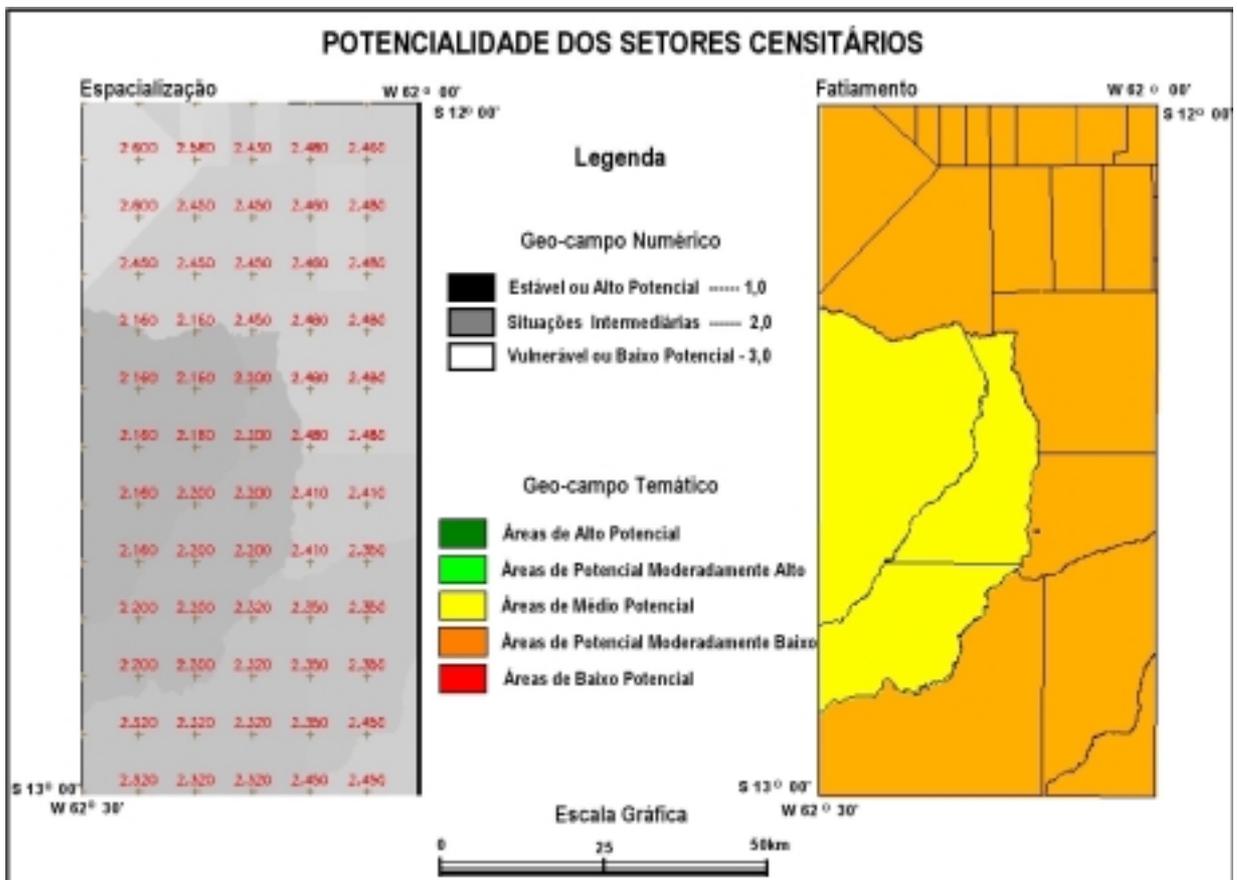


Figura 10.12. Geo-campos numérico e temático de potencialidade dos setores censitários.

10.4.2.1 Geo-campo temático de sustentabilidade do território

Conforme sugeriram Becker e Egler 5, o geo-campo de sustentabilidade das unidades territoriais foi obtido através da sobreposição das cartas temáticas de vulnerabilidade natural à erosão (Figura 10.11) e de potencialidade social econômica (Figura 10.12), utilizando-se o operador booleano **AND**. Esta sobreposição foi efetuada através do seguinte programa em LEGAL:

```
//INICIO DO PROGRAMA
//SOBREPOSICAO VULNERABILIDADE x POTENCIAL SOCIAL E ECONOMICO
//ATRAVES DE OPERACAO BOLEANA COM OPERADOR .AND.
{
// DECLARACAO DE VARIAVEIS
Tematico vuln    ("Vuln_Amb_SE_TM");
Tematico ptse    ("Vuln_Amb_SE_TM");
Tematico mfse    ("Vuln_Amb_SE-Boleana");

RECUPERACAO DOS GEO-CAMPOS TEMATICOS
vuln = Recupere (Nome= "med_vuln_TM");
ptse = Recupere (Nome= "med_soec_TM");

// CRIACAO DO GEO-CAMPO TEMATICO DE SUSTENTABILIDADE
mfse = Novo(Nome= "Vuln-PtSE", ResX=90, ResY=90,
Escala=250000);

// EXECUCAO DA OPERACAO DE SOBREPOSICAO2
mfse = Atribua (CategoriaFim = "Vuln_Amb_SE-Boleana")
{
"Vn_E-Pt_E"      : (vuln.Classe == "est-alto_pot" .AND.
ptse.Classe == "est-alto_pot"),
"Vn_E-Pt_ME"     : (vuln.Classe == "est-alto_pot" .AND.
ptse.Classe == "mod_est-pot_mod_alto"),
"Vn_E-Pt_EV"     : (vuln.Classe == "est-alto_pot" .AND.
ptse.Classe == "intermediaria"),
"Vn_E-Pt_MV"     : (vuln.Classe == "est-alto_pot" .AND.
ptse.Classe == "mod_vul-pot_mod_baixo"),
"Vn_E-Pt_V"      : (vuln.Classe == "est-alto_pot" .AND.
ptse.Classe == "vuln-baixo_pot"),
"Vn_ME-Pt_E"     : (vuln.Classe == "mod_est-pot_mod_alto" .AND.
ptse.Classe == "est-alto_pot"),
"Vn_ME-Pt_ME"    : (vuln.Classe == "mod_est-pot_mod_alto" .AND.
ptse.Classe == "mod_est-pot_mod_alto"),
```

² Ilustra-se uma das possíveis sobreposições: a classe vulnerável-alto potencial ("Vn_E-Pt_E") vai existir no geo-campo de sustentabilidade se ocorrer a interseção entre polígonos da classe estável ("est-alto_pot"), no geo-campo de vulnerabilidade e (**.AND**.) da classe alto potencial ("est-alto_pot"), no geo-campo de potencialidade social e econômica.

```

"Vn_ME-Pt_EV" : (vuln.Classe == "mod_est-pot_mod_alto" .AND.
ptse.Classe == "intermediaria"),
"Vn_ME-Pt_MV" : (vuln.Classe == "mod_est-pot_mod_alto" .AND.
ptse.Classe == "mod_vul-pot_mod_baixo"),
"Vn_ME-Pt_V" : (vuln.Classe == "mod_est-pot_mod_alto" .AND.
ptse.Classe == "vuln-baixo_pot"),
"Vn_EV-Pt_E" : (vuln.Classe == "intermediaria" .AND.
ptse.Classe == "est-alto_pot"),
"Vn_EV-Pt_ME" : (vuln.Classe == "intermediaria" .AND.
ptse.Classe == "mod_est-pot_mod_alto"),
"Vn_EV-Pt_EV" : (vuln.Classe == "intermediaria" .AND.
ptse.Classe == "intermediaria"),
"Vn_EV-Pt_MV" : (vuln.Classe == "intermediaria" .AND.
ptse.Classe == "mod_vul-pot_mod_baixo"),
"Vn_EV-Pt_V" : (vuln.Classe == "intermediaria" .AND.
ptse.Classe == "vuln-baixo_pot"),
"Vn_MV-Pt_E" : (vuln.Classe == "mod_vul-pot_mod_baixo" .AND.
ptse.Classe == "est-alto_pot"),
"Vn_MV-Pt_ME" : (vuln.Classe == "mod_vul-pot_mod_baixo" .AND.
ptse.Classe == "mod_est-pot_mod_alto"),
"Vn_MV-Pt_EV" : (vuln.Classe == "mod_vul-pot_mod_baixo" .AND.
ptse.Classe == "intermediaria"),
"Vn_MV-Pt_MV" : (vuln.Classe == "mod_vul-pot_mod_baixo" .AND.
ptse.Classe == "mod_vul-pot_mod_baixo"),
"Vn_MV-Pt_V" : (vuln.Classe == "mod_vul-pot_mod_baixo" .AND.
ptse.Classe == "vuln-baixo_pot"),
"Vn_V-Pt_E" : (vuln.Classe == "vuln-baixo_pot" .AND.
ptse.Classe == "est-alto_pot"),
"Vn_V-Pt_ME" : (vuln.Classe == "vuln-baixo_pot" .AND.
ptse.Classe == "mod_est-pot_mod_alto"),
"Vn_V-Pt_EV" : (vuln.Classe == "vuln-baixo_pot" .AND.
ptse.Classe == "intermediaria"),
"Vn_V-Pt_MV" : (vuln.Classe == "vuln-baixo_pot" .AND.
ptse.Classe == "mod_vul-pot_mod_baixo"),
"Vn_V-Pt_V": (vuln.Classe == "vuln-baixo_pot" .AND. ptse.Classe
== "vuln-baixo_pot")
};
} //FIM DO PROGRAMA.

```

A título de demonstração, este programa em LEGAL incluiu todas as 25 classes que poderiam existir como resultado da sobreposição entre o geo-campo de vulnerabilidade, com 5 classes (Figura 10.11) e o geo-campo de potencialidade, previsto para conter também 5 classes. Como o geo-campo de potencialidade continha somente duas classes (Figura 10.12), o geo-campo de sustentabilidade a ser obtido deveria conter no máximo 10 classes, caso ocorressem todas as (5 x 2) possíveis interseções entre os polígonos nos dois geo-campos. Entretanto, como resultado da execução deste programa obteve-se um geo-campo temático com 9 classes de sustentabilidade, conforme pode ser observado na Figura 10.14-A..

É importante comentar que sendo gerado a partir de interseções espaciais entre polígonos dos dois geo-campos, o *geo-campo temático* de sustentabilidade do território pode

ser um produto de difícil entendimento e por vezes não satisfatório. Isto porque, dependendo do número de classes em cada um dos geo-campos temáticos utilizados na sobreposição, o geo-campo temático resultante poderá possuir um número excessivo de classes temáticas. Caso aconteça, tornar-se-á necessário um novo e trabalhoso processo de síntese ou agrupamento dos polígonos contidos no referido geo-campo temático, para que efetivamente obtenha-se uma síntese com os níveis de sustentabilidade de uso do território e não um conjunto de classes resultantes da interseção entre os polígonos de dois geo-campos temáticos.

Alternativamente, uma das maneiras mais fáceis para avaliar o comportamento entre dois conjuntos de dados é plotá-los num gráfico, um contra o outro, através de um sistema de coordenadas ortogonais que define um espaço euclidiano bidimensional. Em processamento de imagens digitais, o espaço euclidiano ou espaço de atributos (*feature space*) é um conceito básico, podendo ser N -dimensional em função do número de conjuntos de dados a serem comparados, sendo utilizado para analisar certas propriedades das imagens digitais, principalmente em procedimentos de classificação de imagens (Schowengerdt 59; Crósta 20).

Com base neste conceito, utilizou-se um gráfico bidimensional (Figura 10.13) para visualizar os dados de vulnerabilidade e de pontencialidade social e econômica, através de seus respectivos geo-campos numéricos. A posição de cada ponto neste espaço de atributos está diretamente relacionada com a magnitude dos valores contidos nos dois geo-campos numéricos e ao analisá-los, podem ser identificadas regiões de maior e menor adensamento de pontos, que intuitivamente representam diferentes classes de sustentabilidade.

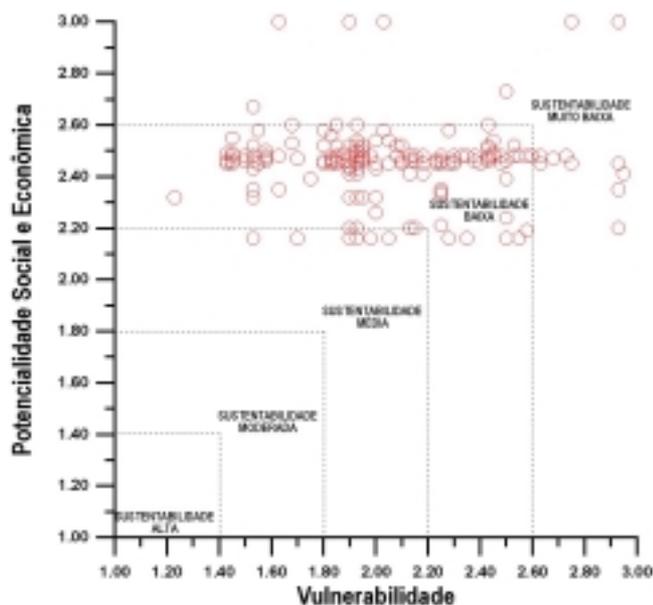


Figura 10.13. Subdivisão do espaço de atributos em níveis de sustentabilidade.

Desta maneira, procurando manter uma padronização com relação aos intervalos de classe utilizados nas operações de fatiamento, dividiu-se o gráfico da Figura 10.13 em regiões

correspondentes a 5 classes de sustentabilidade, considerando-se os intervalos de classe da Tabela 10.1. Assim, p. ex., incluiriam-se na classe “sustentabilidade baixa” todas as unidades territoriais cujos valores do geo-campo numérico de vulnerabilidade ou os valores do geo-campo de potencialidade estivessem contidos entre 2,20 e 2,60.

A idéia é que deste modo, as classes de sustentabilidade das unidades territoriais possam refletir as mútuas relações entre o sistema natural e a formação social e econômica numa porção do espaço. Quer dizer, mesmo uma área ambientalmente estável (valores de vulnerabilidade próximos a 1,0) pode ser considerada de média ou baixa sustentabilidade se o modelo de ocupação – derivado da dinâmica econômica, social e política – lá vigente, não permitir o desenvolvimento humano com um nível de qualidade de vida (valores de potencialidade próximos a 3,0) e de controle ambiental adequados.

Para materializar o conteúdo do gráfico da Figura 10.13 em um geo-campo temático de sustentabilidade foram realizadas operações de junção espacial (Güting 34), através do seguinte programa em LEGAL:

```
//INICIO DO PROGRAMA
{
//INTEGRACAO ENTRE VULNERAB. E POTENCIAL SOCIAL E ECONOMICO
//SUSTENTABILIDADE ATRAVES DE JUNCAO ESPACIAL

//DECLARACAO DE VARIAVEIS
Numerico vuln    ("Vuln_GRD");
Numerico ptse    ("Vuln_GRD");
Tematico sustent ("Sustentabilidade_TM");

//RECUPERACAO DE GEO-CAMPOS NUMERICOS
vuln = Recupere (Nome= "vuln_medutb");
ptse = Recupere (Nome= "ptse_soec");

// CRIACAO DO GEO-CAMPO TEMATICO DE VULNERABILIDADE
sustent= Novo (Nome= "sustentab_5cls", ResX=90, ResY=90,
Escala=250000);

// EXECUCAO DAS OPERACOES E CRITERIOS PARA JUNCAO ESPACIAL
sustent = Atribua
{
"Sustentab_Alta" : (vuln <=1.40).OR. (ptse <=1.40),
"Sustentab_Mode" : (vuln > 1.40 .AND. vuln <=1.80) .OR. (ptse
> 1.40 .AND. ptse <=1.80),
"Sustentab_Media" : (vuln > 1.80 .AND. vuln <=2.20) .OR.
(ptse > 1.80 .AND. ptse <=2.20),
"Sustentab_Baixa" : (vuln > 2.20 .AND. vuln <=2.60) .OR.
(ptse > 2.20 .AND. ptse <=2.60),
"Sustentab_MBaixa" : (vuln > 2.60 .AND. vuln <=3.00) .OR. (ptse
> 2.60 .AND. ptse <=3.00)
```

```
};
} // FIM DO PROGRAMA.
```

O resultado da execução deste programa pode ser observado na Figura 10.14-B.

Comparando-se os dois geo-campos temáticos (Figura 10.14- A e B), verifica-se que para ser obtido os níveis de sustentabilidade de uso do território, sugeridos por Becker e Egler 5, a partir do geo-campo temático A, seria necessário, além da sobreposição (interseção espacial entre os geo-campos temáticos de vulnerabilidade e potencialidade) já realizada, uma nova operação de reagrupamento ou reclassificação de classes temáticas, para alcançar os mesmos resultados de uma única operação de junção espacial, cujo resultado é apresentado na Figura 10.14-B.

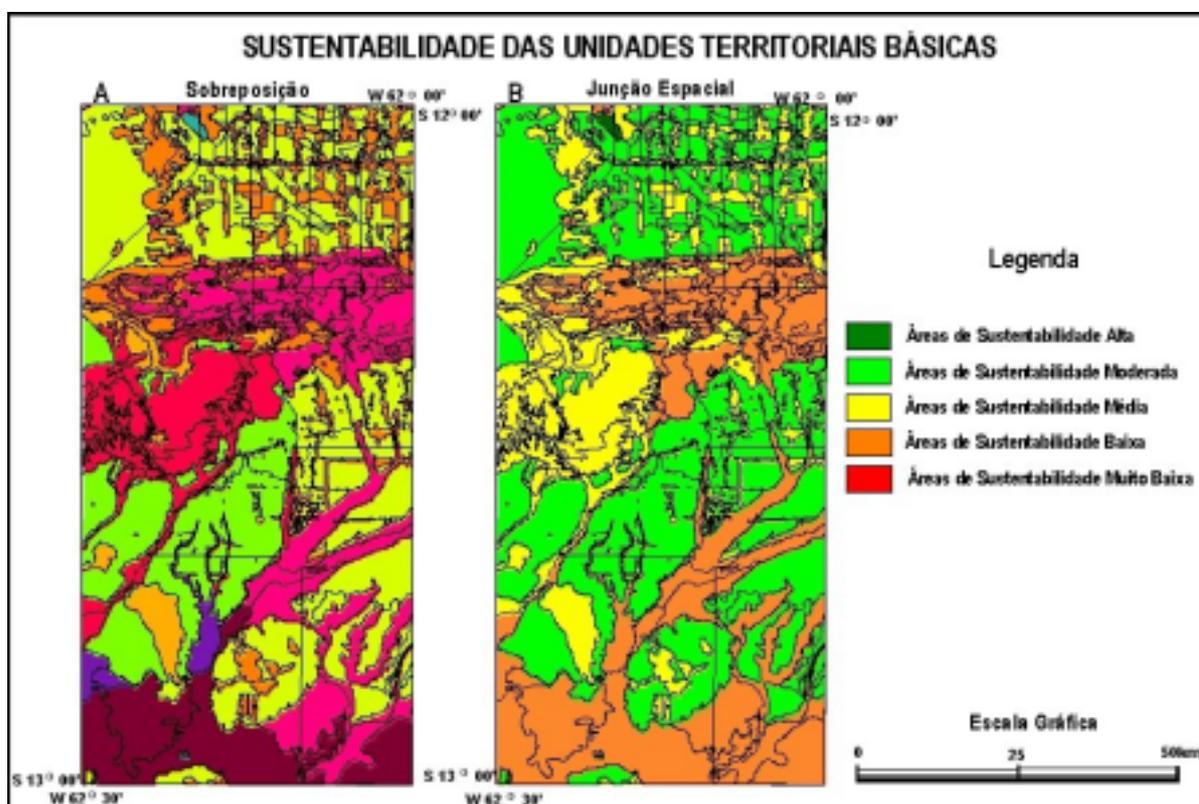


Figura 10.14. Geo-campos temáticos de sustentabilidade das UTBs.

Ademais, observando-se o fluxograma representado pela Figura 6.4 constata-se que para ser obtido o mesmo resultado de uma única operação de junção espacial (Figura 10.14-B), aplicada sobre os geo-campos numéricos de vulnerabilidade e potencialidade, deveriam ser realizadas quatro operações, dois fatiamentos (converte-se numérico para temático), a sobreposição (temático x temático, gerando novo temático; no caso a Figura 10.14-A) e por fim uma reclassificação (gera novo temático pelo agrupamento de classes).

Sem querer iniciar uma discussão sobre propagação de erros, estas considerações acima servem para alertar que, nem sempre as sobreposições entre geo-campo temáticos, muito conhecidas como cruzamento de mapas e amplamente utilizadas pelos usuários de SIG, representam o melhor caminho para alcançar os resultados desejados.

BIBLIOGRAFIA

1. **Aronoff, S.** *Geographical Information Systems: A Management Perspective*. Ottawa., WDI Publications, 1989.
2. **Assad, E. D.; Sano, E. E.** *Sistemas de Informações Geográficas - Aplicações na Agricultura*. Brasília, EMBRAPA, 1993.
3. **Barbosa, C. C. F.** *Álgebra de Mapas e suas Aplicações em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento*. Tese de Mestrado. São José dos Campos. INPE. 1997.
4. **Beale, R.; Jackson, T.** *Neural Computing*. Bristol - UK. Institute of Physics Publishing. 1992. 240p.
5. **Becker, B. K.; Egler, C. A. G.** *Detalhamento da Metodologia para Execução do Zoneamento Ecológico-Econômico pelos Estados da Amazônia Legal*. Brasília. SAE-Secretaria de Assuntos Estratégicos/ MMA-Ministério do Meio Ambiente. 1996.
6. **Bertrand, G.** *Paisagem e Geografia Física Global: Esboço Metodológico*. Caderno de Ciências da Terra, 13. Inst. de Geografia-USP. São Paulo. 1981.
7. **Bezerra, P. E. L.; Lima, M. I. C. de.; Silva, R. C.; Fonseca, W. N. D.; Medeiros J. S.** *Utilização de sistemas de informação geográfica (SIG) em análise geoambiental: o exemplo do Estado do Amapá*. Trabalho apresentado no I Simpósio Intern. de Estudos Ambientais em Florestas Tropicais Úmidas. Manaus, 7-13 de outubro. 1990.
8. **Bonham-Carter, G. F.** *Geographic Information Systems for Geoscientists*. Terrytown. Pergamon/Elsevier Science Pub. 1994.
9. **Burrough, P. A.** *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford, Oxford University Press, 1986.
10. **Burrough, P. A. McDonnell R. A.** *Principles of Geographic Information Systems*. Oxford, Oxford University Press, 1998.
11. **Câmara, G.; Casanova, M. A.; Hemerly, A. S.; Magalhães, G. A.; Medeiros, C. M. B.** *Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica*. 10ª. Escola de Computação. Campinas. Instituto de Computação - UNICAMP. 1996. 197p.
12. **Carvalho, A. C. P. L. F. de.** *Redes Neurais Artificiais, Tutorial introdutório*. Documento on-line disponível em www.icmsc.sc.usp.br/~andre/neural1.html. 1999.

13. **Caudill, M.** *Expert Network*. Byte. October. 1991. pp 108-116.
14. **Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente (CEOTMA).** *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología*. Serie Manuales. Madrid. Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo. 1984. Segunda edición.
15. **Clark University.** *Idrisi for Windows, User's Guide*. Worcester, MA. Clark University. 1997.
16. **Corrêa, R. L.** *Região e Organização Espacial*. 4ª Ed. São Paulo. Editora Ática.. 1991.
17. **Cox Jr., F.** *Análise de Métodos de Acesso a Dados Espaciais Aplicados a Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados*. Dissertação de Mestrado em Computação. Campinas. IMECC-UNICAMP. 1991.
18. **Cowen, D. J.** *GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54:1551-4, 1988.
19. **Crepani, E.; Medeiros, J. S. de.; Azevedo, L. G.; Hernandez, P.; Florenzano, T. G.; Duarte, V.** *Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico*. São José dos Campos. INPE. 1996.
20. **Crósta, A. P.** *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Campinas. UNICAMP. 1992. 170p.
21. **Dolfus, O.** *O Espaço Geográfico*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1991.
22. **Dunne, T., Leopold, L.** *Water in Environmental Planning*. W.H. Freeman and Co. San Francisco. 1978.
23. **Eastman et al.** 1995 Eastman, J.R.; Jin, W.; Kyem, P.A.K.; Toledano, J. Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.61, n.5, may, 1995. 539-547p.
24. **Egenhofer, M.** *Spatial SQL: A Query and Presentation Language*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 6:86-95, 1994.
25. **Egenhofer, M.; Herring, J.** *A Mathematical Framework for the Definition of Topological Relationships*. IN: IV International Symposium on Spatial Data Handling. Proceedings, Zurich, 1990, pp. 803-813.
26. **Emaruchi, B.; Jin, Y. Sauchyn, D.; Kite, G.** *Land Cover Mapping Using an Artificial Neural Network*. IN: ISPRS Mapping and Geographic Information Systems. Georgia. 1994. V.30. pp 84-89.
27. **Engespaço.** *Sistema Geográfico de Informações – SGI, Manual de Referência do Usuário – Versão 2.4*. São José dos Campos. Engespaço. 1995
28. **ESRI.** *ARC/INFO 6.0 Command Reference: GRID*. Redlands, California, USA, 1991.

29. **Freeman, J.** *The Modelling of Spatial Relations*. Computer Graphics and Image Processing, 4: 156-171, 1975.
30. **Freeman, J. A.; Skapura, D. M.** *Neural Network - Algorithms and Programming Techniques*. Reading. Addison Wesley Pub. Comp. 1991.
31. **Gomes, J.M.; Velho, L.** *Computação Visual: Imagens*. Rio de Janeiro, SBM, 1995.
32. **Goodchild, M.** *A Spatial Analytical Perspective on Geographical Information Systems*. International Journal of Geographical Information Systems, 1 (4): 327-334, 1987.
33. **Goodchild, M.** *Geographical Information Science*. International Journal of Geographical Information Systems, 6 (2): 35-45, 1992.
34. **Güting, R.H.** *An Introduction to Spatial Database Systems*. VLDB Journal, 3(4), October 1994.
35. **Harris, J.** (1989) **Data integration for gold exploration in eastern Nova Scotia using a GIS**. Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Canada, october 2-6, 1989. 233-248p.
36. **Hartstorne** 1978
37. **Hecht-Nielsen, R.** *Neurocomputing*. San Diego. Addison-Wesley. 1989. 433p.
38. **Hewitson, B. C.; Crane, R. G. (eds).** *Neural Nets: Applications in Geography*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. 1994.
39. **Intergraph.** *MGE- The Modular GIS Environment*, 1990.
40. **Kuntschik** (1996) Kuntschik, G., Formaggio, A.R., Gleriani, J.M. “Cuantificación de pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del Ribeirão das Araras (SP-Brasil) en ambiente SIG, usando imágenes TM. Resultados preliminares”. *Simpósio Latinoamericano de Percepción Remota, VII* (Memorias- SELPER), Puerto Vallarta - México, 796-803, (1995).
41. **Lacoste, Y. A.** *Geografia - Isso serve, em primeiro lugar, para fazer a guerra*. Campinas. Papirus Editora. 1989.
42. **Lombardi Neto** (1995).
43. **Maguire, D.; Dangermond, J.** *The Functionality of GIS*. IN: **Maguire, D.; Goodchild, M.; Rhind, D. (Eds).** *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. New York, John Wiley and Sons, 1991, pp. 319-35.
44. **Marsh, W York..M.** *Environmental Analysis for Land Use and Site Planning*. New McGraw – Hill. 1978.

45. **Medeiros, J. S. de.** *Banco de Dados Geográficos e Redes Neurais Artificiais: Tecnologias de Apoio à Gestão do Território.* São Paulo. Dpto. de Geografia – FFLCH – USP. Julho, 1999. Tese de Doutorado.
46. **Meirelles, M S P.** *Análise Integrada do Ambiente através de Geoprocessamento – Uma Proposta Metodológica para Elaboração de Zoneamentos.* Rio de Janeiro. IGEO-UFRJ. 1997. Tese de Doutorado.
47. **Montoya, M. A. P.; Claros, M. E. A. C.; Medeiros, J. S. de.** *Identificación de las áreas con riesgo de inundación y deslizamiento en la cuenca del Rio Buquira en el Municipio de São José dos Campos – SP utilizando las técnicas de sensoriamento remoto y geoprociamiento.* São José dos Campos. INPE. Diciembre. 1999. Trabalho do Curso Internacional em Sensoriamento Remoto do INPE.
48. **Moraes, A. C. R.** 1997. Meio-Ambiente e Ciências Humanas.
49. **Nelson, M. M.; Illingworth, W. T.** *Practical Guide to Neural Nets.* Reading, Massachusetts. Addison-Wesley Publishing Co. 4th Ed. 1992.
50. **???????** *SPRING: Manual do Usuário - Versão 2.0.* São José dos Campos. NetGis. 1997. 4 volumes.
51. **Openshaw, S.; Openshaw, C.** *Artificial Intelligence in Geography.* Chichester. John Wiley & Sons Ltd. 1997.
52. **Pendock e Nedeljkovic,** 1996. Integrating geophysical data sets using probabilistics methods. Thematic Conference and Workshop on Applied Geologic Remote Sensing, 11^o, Las Vegas, 1996. **Proceedings.** Nevada, v.2, p.621-628.
53. **Rezende, M.A.M.** *Métodos de Acesso para Bancos de Dados Espaciais.* Relatório Técnico CCR-142. Centro Científico IBM Brasil. Rio de Janeiro. 1992.
54. **Rich, E.; Knight. K.** *Inteligência Artificial.* São Paulo. Makron Books. 1993.
55. **Ross, J. L. S.** *Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados.* Revista do Departamento de Geografia - FFLCH-USP, N.9. 1994. pp. 63-74.
56. **Saaty, T. L.** (1992) *Multicriteria Decision Making – The Analytical Hierarchical Process,* Pittsburg, RWS Publications.
57. **Santos, M.** *Espaço e Método.* São Paulo. Nobel. 1985.
58. **Santos, M.** *A Natureza do Espaço: técnica e tempo, razão e emoção.* São Paulo. Editora Hucitec. 1996.
59. **Schowengerdt, R. A.** *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing.* Orlando. Academic Press. 1983. 249p.

60. **Siebert, C.F.** *Estruturação e desenvolvimento da rede urbana do Vale do Itajaí*. Ed. FURB. 1997.
61. **Silva, T. C.** *Metodologia dos Estudos Integrados para o Zoneamento Ecológico-Econômico*. Salvador. Divisão de Recursos Naturais - DRN. IBGE-BA. 1987. Documento datilografado de circulação interna.
62. **Smith, T.; Peuquet, D.; Menon, S.; Agarwal, P.** *KBGIS-II, a Knowledge-Based Geographical Information System*. International Journal of Geographical Information Systems. Vol 1. N. 2. 1987. pp. 149-172.
63. **Tomlin, D.** *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. New York. Prentice Hall. 1990.
64. **Tricart, J.** *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro. IBGE-SUPREN.1977
65. **Tricart, J.; KiewietdeJonge, C.** *Ecogeography and Rural Management: A Contribution to the*
66. **Worboys, M.** *GIS: A Computing Perspective*. London. Taylor and Francis, 1995.
67. **Zadeh L. A.** *Fuzzy sets*. Information and Control, **8**:338-353. 1965.
68. **Zell, A.; Mamier, G.; Vogt, M.; Mache, N.; Hübner, R.; Döring, S. e outros.** *Stuttgart Neural Net Simulator - User Manual, Version 4.1*. Stuttgart. IPVR - University of Stuttgart. 1991.
69. **Zonneveld, I. S.** *Land Evaluation and Land(scape) Science*. IN: Textbook of Photo-Interpretation,– Use of aerial photographs in Geography and Geomorphology. Vol 7. Cap. 7. Enschede. ITC. 1972.
70. **Zonneveld, I. S.** *The land unit – A fundamental concept in landscape ecology and its applications*. Landscape Ecology. Vol 3. N^o. 2. pp. 67-86. 1989.

A

Manual de Referência - LEGAL

Cláudio Clemente Faria Barbosa

João Pedro Cerveira Cordeiro

Este apêndice apresenta a você a sintaxe dos comandos e as palavras reservadas da linguagem LEGAL.

OBS: As palavras reservadas da linguagem aparecem em negrito.

Declaração

Imagem

Declara uma variável do tipo **Imagem** que será posteriormente associada a um novo PI criado no programa ou um PI já existente no projeto corrente. Esta variável poderá ser utilizada em alguma operação do programa.

Sintaxe:

```
Imagem variável ("categoria");
```

Considerações:

O primeiro termo indica que geo-campos do tipo **Imagem** poderão ser associado à variável durante a execução do programa. A categoria entre aspas e parênteses, indica a categoria definida no banco de dados ativo. Mais de um nome de variável pode ser simultaneamente declarados para uma mesma categoria.

Exemplos:

```
Imagem banda3, banda4, ivdn ("LANDSAT");
```

```
Imagem banda3 ("LANDSAT"), xp2 ("SPOT");
```

```
Imagem B3 ("ImagensTM");
```

Numerico

Declara uma variável do tipo **Numerico** (ou digital) que será posteriormente associada a um novo PI criado no programa ou um PI já existente no projeto corrente. Esta variável poderá ser utilizada em alguma operação do programa.

Sintaxe:

```
Numerico variável ("categoria");
```

Considerações:

O primeiro termo indica que geo-campos do tipo **Numerico** poderão ser associado à variável durante a execução do programa. A categoria entre aspas e parênteses, indica a categoria definida no banco de dados ativo. Mais de um nome de variável pode ser simultaneamente declarados para uma mesma categoria.

Exemplos:

```
Numerico GR1, GR2, GR3 ("Grade_Altimetria");  
Numerico ALTI ("ALTIMETRIA"), exp("EXPOSICAO");  
Numerico grade2 ("Grades_declividade");
```

Tematico

Declara uma variável do tipo **Tematico** que será posteriormente associada a um novo PI criado no programa ou um PI já existente no projeto corrente. Esta variável poderá ser utilizada em alguma operação do programa.

Sintaxe:

```
Tematico variável ("categoria");
```

Considerações:

O primeiro termo indica que geo-campos do tipo **Tematico** poderão ser associado à variável durante a execução do programa. A categoria entre aspas e parênteses, indica a categoria definida no banco de dados ativo. Mais de um nome de variável pode ser simultaneamente declarados para uma mesma categoria.

Exemplos:

```
Tematico USO1, USO2, USO3 ("USO_TERRA");  
Tematico Solo1 ("SOLOS"), GEO("Geologia");  
Tematico dec2 ("Declividade");
```

Objeto

Declara uma variável do tipo **objeto** que será posteriormente usada em uma operação do tipo reclassificação por atributos.

Sintaxe:

```
Objeto variável ("categoria");
```

Considerações:

O primeiro termo indica que entidades do tipo **objeto** poderão ser associado à variável durante a execução do programa. A categoria entre aspas e parênteses, indica a categoria definida no banco de dados ativo. Mais de um nome de variável pode ser simultaneamente declarados para uma mesma categoria.

Exemplos:

```
Objeto lot1, lot2, lot3 ("Lotes_urbanos");  
Objeto CID ("Cidades"), FAZ ("Fazendas");  
Objeto Post ("Postes_eletricos");
```

Cadastral

Declara uma variável do tipo **cadastral** que será posteriormente associada a um novo PI criado no programa ou um PI já existente no projeto corrente. Esta variável poderá ser utilizada em alguma operação do programa.

Sintaxe:

```
Cadastral variável ("categoria");
```

Considerações:

O primeiro termo indica que entidades do tipo **Cadastral** poderão ser associado à variável durante a execução do programa. A categoria entre aspas e parênteses, indica a categoria definida no banco de dados ativo. Mais de um nome de variável pode ser simultaneamente declarados para uma mesma categoria.

Exemplos:

```
Cadastral cad1 ("Cadastro_urbano");  
Cadastral map_AS ("Mapa_Paises");
```

Tabela

Declara uma variável do tipo tabela que será usadas para definir transformações entre campos e objetos de diferentes tipos.

Sintaxe:

```
Tabela variável (tipo_de_transformação);
```

Considerações:

Numa declaração de tabela, o primeiro termo deverá conter a palavra reservada **Tabela**, seguida do nome da variável e de uma palavra chave indicando o tipo de transformação - **Reclassificacao**, **Fatiamento** ou **Ponderacao**. Mais de um nome de variável pode ser simultaneamente declarados para um mesmo tipo de transformação.

Uma tabela de **Reclassificação** define o mapeamento entre classes temáticas de duas diferentes categorias, no **Fatiamento** um campo de uma categoria numérica é transformado em um campo temático, enquanto numa **Ponderação** a transformação é de um campo temático para um campo numérico.

Exemplos:

```
Tabela USO1, USO2, USO3 (Reclassificacao);
```

```
Tabela Solo1(Ponderacao), GEO(Ponderacao);
```

```
Tabela dec2 (Fatiamento);
```

Atributo

Declara uma variável do tipo **atributo** que será posteriormente usada em uma operação do tipo reclassificação por atributos.

Sintaxe:

```
Atributo variável ("categoria_objeto", "atributo");
```

Considerações:

A declaração uma variável especial do tipo **atributo** é necessária quando se deseja efetuar uma reclassificação por atributos, na qual uma operação de transformação gera dados do modelo temático ou numérico, a partir de um mapa cadastral e do valor de atributos de uma categoria de objetos dada.

Numa declaração de **variáveis de atributos** deve ser indicado o nome da categoria de objetos a que o atributo pertence, bem como o nome que o identifica para o ambiente Spring.

Exemplos:

```
Atributo valores ("LOTES", "IPTU");
```

Instanciação

Recupere

Associa um *plano de informação* existente no projeto corrente com uma variável previamente declarada.

Sintaxe:

```
variável = Recupere (Nome = "nome_do_pi")
```

Considerações:

Os tipos tratados pelo operador **Recupere** são: **Imagem**, **numerico**, **Tematico**, **Objetos e Cadastral**. A variável e o plano de informação recuperado devem ser do mesmo tipo. Por exemplo, um plano de informação do tipo temático só pode ser associado a uma variável declarada anteriormente como temática.

Exemplos:

```
// Exemplos de declarações
Tematico Solos ("TIPOS_SOLOS");
Numerico topo ("ALTIMETRIA"),
Imagem banda3 ("LANDSAT"),
// Exemplos de instanciações das declarações acima
Solos = Recupere(Nome = "solos_vale_paraiba");
topo = Recupere(Nome = "altimetria_sjc");
banda3 = Recupere(Nome = "TM3_SJC");
```

Novo

Quando usado com variáveis do tipo **Tematico**, **Imagem** ou **Numerico**, cria um *plano de informação* do mesmo tipo no projeto corrente e associa este plano a variável do lado esquerdo do sinal de atribuição "=". Quando usado com variáveis do tipo **Tabela**, o operador **Novo** cria uma tabela no contexto do programa em execução. Esta tabela pode ser usada nos processamentos baseados em tabelas.

Sintaxe:

Para tipo imagem:

```
variável = Novo (Nome = "nome_do_pi", ResX =
valor,
ResY = valor, Nbits = 8);
```

Para tipo temático:

```
variável = Novo (Nome = "nome_do_pi",
ResX = valor , ResY = valor,
Escala = valor,
```

Repres = Vetor ou **Raster**);

Para tipo Numérico:

```
variável = Novo (Nome = "nome_do_pi",
                 ResX = valor , ResY = valor,
                 Escala = valor,
                 Min = valor, Max = valor,
                 Repres = Grade ou Amostra);
```

Para tipo Cadastral:

```
variável = Novo (Nome = "nome_do_pi",
                 ResX = valor , ResY = valor,
                 Escala = valor);
```

Para tipo Tabela de ponderação:

```
variável = Novo (CategoriaIni = "nome_da_categoria",
                 "geoclasse" : valor,
                 "geoclasse" : valor,
                 ...
                 Outros      : valor );
```

Para tipo Tabela de fatiamento:

```
variável = Novo (CategoriaFim = "nome_da_categoria",
                 [valorI, valorF] : "geoclasse",
                 [valorI, valorF] : "geoclasse",
                 ...
                 Outros      : valor );
```

Para tipo Tabela de reclassificação:

```
variável = Novo (CategoriaIni = "nome_da_categoria",
                 CategoriaFim = "nome_da_categoria",
                 "geoclasse" : "geoclasse",
                 "geoclasse" : "geoclasse",
                 ...
                 "geoclasse" : Outros );
```

Considerações:

Para variáveis do tipo Imagem, Numérico, Temático e Cadastral um plano com o nome fornecido é criado no projeto ativo. Este novo plano é usado para armazenar o resultado de uma operação.

Na instanciação de tabelas a palavra reservada “**Outros**” é opcional e define um valor a ser atribuído nos casos não cobertos pelas alternativas anteriores.

Para a instanciação de uma tabela de fatiamento o termo [valorI, valorF] significa a faixa de valores do campo numérico a ser atribuído a uma geoclasse. A faixa vai de valorI inclusive até valorF exclusive.

Parâmetros:

Nome - nome do plano de informação criado.

ResX - resolução horizontal.

ResY - resolução vertical.

Nbits – número de bits da imagem (8, 10, 16, ...).

Escala - escala do plano criado.

Min - valor mínimo permitido na grade criada.

Max - valor máximo permitido na grade criada.

Repres - representação do plano criado.

Vetor ou **Matriz** para Temático.

Grade ou **Amostra** para Numérico.

CategoriaIni - categoria de entrada.

CategoriaFim - categoria de saída.

Exemplos:

```
// Criar um PI Imagem:
ima = Novo (Nome = "ImagemResultante", ResX=30, ResY=30,
           Nbits = 8);

// Criar um PI Temático:
solo = Novo (Nome = "Solos", ResX=50, ResY=50,
           Escala = 100000);

// Criar um PI Numérico:
alti = Novo (Nome = "Altimetria", ResX=50, ResY=50,
           Escala = 1000, Min=0, Max=100);

// Criar um PI Cadastral:
cadast = Novo (Nome = "Plano_Urbano", ResX=50, ResY=50,
           Escala = 1000);

// Criar uma Tabela de Ponderação:
pond = Novo (CategoriaIni = "Tipos_de_solos",
           Le : 0.60,
           Li ; 0.20,
           Ls : 0.35,
           Aq : 0.10);

// Criar uma Tabela de fatiamento:
fatia = Novo (CategoriaFim = "Faixas_de_Declividade",
           [0.0, 5.0] : "baixa",
           [5.0, 15.0] : "media",
           [15.0, 45.0] : "alta");

Criar uma Tabela de reclassificação:
reclass = Novo (CategoriaIni = "Floresta",
           CategoriaFim = "Desmatamento",
           "Floresta_Densa" : "Floresta",
           "Floresta_Varzea" : "Floresta",
           "Rebrota" : "Desmatamento",
           "Area_Desmatada" : "Desmatamento");
```

Operação

Atribua

Gera um plano de informação temático efetuando o mapeamento de geoclasses com base em resultados de expressões lógicas (booleanas). Este mapeamento é executado por operadores lógicos pontuais (e, ou, não), que fazem a sobreposição (overlay) entre as classes dos PIs.

Expressões booleanas são combinadas a partir dos operadores '&&' (e lógico, intercessão), '||' (ou lógico, união) e '!' ou '~' (negação, complemento), ou ainda pela comparação entre pixels de imagens ou valores de grade através dos operadores '<', '>', '<=', '>=', '==' e '!='; ou da comparação entre classes de PIs temáticos através dos operadores '==' e '!='. Pode-se envolver até 40 PIs simultaneamente.

Sintaxe:

```
variável = Atribua(CategoriaFim = "nome_da_categoria")
{
    "nome_da_geoclasse" : expressao_booleana),
    "nome_da_geoclasse" : expressao_booleana),

    "nome_da_geoclasse" : expressao_booleana),
    ...
    "nome_da_geoclasse" : Outros
};
```

Alternativamente pode-se usar a sintaxe abaixo:

```
variável = Atribua
{
    ...
};
```

Considerações:

As geoclasses temáticas usadas no lado esquerdo do ":" devem ser geoclasses da categoria temática associada à variável temática previamente declarada. A palavra reservada "**Outros**" é opcional e define um valor a ser atribuído nos casos não cobertos pelas alternativas anteriores.

As expressões booleanas operam sobre representações matriciais dos dados envolvidos e são operações pontuais.

Exemplo:

```
temas = Atribua (CategoriaFim = "AptidaoAgricola")
{
    "Bom" : (solos.tema == "Le" && decl >= 0.05),
    "Medio" : (solos.tema == "Aq" || decl >= 0.10),
    "Ruim" : (solos.tema == "Aq" &! decl >= 0.10),
    "fundo" : Outros ;
}
```

Fatie

Gera um plano de informação do tipo **Temático** a partir de um dado numérico. As regras de processamento são baseadas em uma tabela de fatiamento criada através de um operador **Novo**.

Sintaxe:

```
pist = Fatie (pien, tabfat)
```

Considerações:

A variável `pist` deve ser um plano de informação do tipo **Temático**. O parâmetro `pien` deve ser um plano de informação do tipo numérico. O parâmetro `tabfat` deve ser uma tabela do tipo fatiamento.

Exemplo:

```
// Início de programa
// Declarações
Temático classes_decl ("Faixas_de_Declividade");
Numerico decli ("Declividade");
Tabela fatia(Fatiamento);
// Instanciações
fatia = Novo (CategoriaFim = "Faixas_de_Declividade",
             [0.0, 5.0] : "baixa",
             [5.0, 15.0] : "media",
             [15.0,45.0] : "alta");

decli = Recupere(Nome = "grade_declividade");
classes_decl = Novo(Nome="decli_fat", ResX = 40,
                   ResY = 40, Escala = 100000);

// Operação
classes_decl = Fatie(decli, fatia);
// Final de programa
```

Pondere

Gera um plano de informação do tipo **Numerico** a partir de um dado temático. As regras de processamento são baseadas em uma tabela de ponderação criada através de um comando usando o operador **Novo**.

Sintaxe:

```
pisn = Pondere (piet, tabpond)
```

Considerações:

A variável **pisn** deve ser um plano de informação do tipo **Numerico**. O parâmetro **piet** deve ser um plano de informação do tipo **Temático**. O parâmetro **tabpond** deve ser uma tabela do tipo **Ponderacao**.

Exemplo:

```
// Inicio de programa
// Declarações
Temático geom ("Geomorfologia");
Numerico fragil ("fragilidade");
Tabela tab_geo (ponderacao);

// Instanciações
fragil = Novo (Nome = "fragilidade_solo", ResX = 50,
               ResY = 50, Escala = 100000);

tab_geo = Novo (CategoriaIni = "Geomorfologia",
               "SEpt" : 1.2,
               "Espb" : 1.1,
               "Estb" : 1.3,
               "dk" : 2.4);

geom = recupere(Nome = "Geomorf_RADAM");

// Operação
fragil = 0.5 * Pondere(geom, tab_geo);

// Final de programa
```

Reclassifique

Remapea os temas de um plano de informação temático para um novo plano também temático. Este remapeamento é feito segundo regras descritas por uma tabela de reclassificação. Esta é uma operação de generalização, onde temas diferentes de entrada são mapeados para um de saída.

Sintaxe:

```
pisn = Reclassifique (piet ,tabela_reclass)
```

Considerações:

A variável `pisn` deve ser um plano de informação do tipo **Temático**. O parâmetro `piet` deve ser um plano de informação do tipo **Temático**. O parâmetro `tabela_reclass` deve ser uma tabela do tipo **Reclassificacao**, instanciada previamente pelo operador **Novo**.

Exemplos:

```
{
// inicio do programa
// Declarações
Tematico cobertura ("Floresta");
Tematico desmat ("Desmatamento");
Tabela tab_reclass(Reclassificacao);
// Instanciações
tab_reclass = Novo (CategoriaIni = "Floresta",
                    CategoriaFim = "Desmatamento",
                    "Floresta_Densa" : "Floresta",
                    "Floresta_Varzea" : "Floresta",
                    "Rebrota" : "Desmatamento",
                    "Area_Desmatada" : "Desmatamento");

cobertura = Recupere(Nome = "tipos_cobertura");
desmat = Novo (Nome = "desmatamento",
              ResX = 30, ResY = 30, Escala = 100000);
// Operação
desmat = Reclassifique (cobertura,tab_reclass);
// Final de programa
}
```

? :

Implementa uma expressão condicional a partir do resultado de uma expressão booleana avaliada antes do sinal ?. Se o resultado da expressão booleana for verdadeira atribui-se para a variável de saída o resultado da expressão antes do “:”, caso contrario atribui-se o resultado da expressão que vem depois do “:”.

Sintaxe:

```
variável = expressao_booleana ? expressao1 : expressao2
```

Considerações:

O tipo da variável de saída e o da expressão1 e expressao2 devem ser compatível.

Exemplos: Recorte de imagem por temas

```
{
// início do programa
// Declarações
Imagem tm345, tm5M ("Imagens");
Tematico uso ("UsoSolo");
// Instanciações
  uso = Recupere (Nome = "UsodoSolo");
  tm345 = Recupere (Nome = "TM345");
  tm5M = Novo (Nome = "teste", ResX=30, ResY=30);
// Operação condicional
tm5M = uso.Class=="cidade" ? tm345 : 240;
// Final de programa
}
```

ReclAtrib

Cria um PI temático em função dos atributos definidos para objetos representados em um PI cadastral. O operador executa a transformação sobre a representação vetorial.

Sintaxe:

```
variável = ReclAtrib (objeto, atributo, tab_fat)
SobreMapa pi_cadastral;
```

Exemplos:

```
{
Atributo pop ("Comunidades_O", "populacao");
Objeto com ("Comunidades_O");
Cadastral cad ("Mapa_de_Comunidades");
Tematico tem ("Faixas_tematicas");
Tabela fat (Fatiamento);

cad = Recupere (Nome = "mapa_de_comunidades");
tem = Novo (Nome ="populacao", ResX =100, ResY =100,
Escala =100000, Repres =Raster);

fat = Novo ( CategoriaFim= "Populacao",
             [1000, 2000] : "Baixa",
             [2000, 5000] : "Media",
             [5000, 10000] : "Alta" );
tem = ReclAtrib (com, pop, fat) OnMap cad;
}
```

MediaZonal(*pie*,*lista_de_zonas*)

Calcula o valor médio dentro de cada zona (região) de um plano de informação referenciado pelo argumento *pie*. As zonas são definidas, uma a uma pela *lista_de_zonas*.

Sintaxe:

Resultado em grade Numérica
`pis = MediaZonal(pie, lista_de_zonas)`
 Resultado em um único valor numérico
`vr = MediaZonal(pie, zona)`
 Resultado numérico em Tabela de Atributos de Objetos
`Objeto."atr" = MediaZonal(pie, objeto OnMap pic)`

Considerações:

pie - Plano de informação de entrada que define os valores dentro de cada região geográfica avaliada. O plano de informação *pie* deve ser do tipo **Imagem** ou do tipo **Numerico**.

lista_de_zonas - Identifica as zonas sobre as quais serão calculados os valores médios. Todas as zonas presentes na *lista_de_zonas* devem estar localizadas sobre a região geográfica do *pie*. Uma zona ou região pode ser definida por uma expressão booleana ou por um objeto. Uma *lista_de_zonas* pode ser definida por uma lista de expressões booleanas, ou por todas as classe temáticas presente em um plano de informação temático.

pis plano de informação de saída que deve ser do tipo **Numerico**.

vr - variável do tipo float que recebe o valor médio resultante de uma única região.

Objeto."atr" - Atributo de um objeto representado no plano de informação *pic*.

pic - Plano de informação do tipo cadastral representando um conjunto de regiões.

No caso do resultado em grade numérica, todas as posições na grade numérica dentro de uma zona receberão o valor médio calculado sobre aquela zona.

Exemplos:

```
{
// Início de programa
// Declarações
Tematico zonas      ("Solos_vale_paraiba");
Numerico ph        ("ph_solos_vale_paraiba");
Numerico ph_medio  ("grade_media_zonais_10x10");
Float    ph_terra_roxa;
```

```

// Instanciações
// Dados de entrada
ph = Recupere(Nome = "ph_solos_sjc");
zonas = Recupere(Nome = "solos_sjc");
ph_medio = Novo(Nome = "ph_medio_solos_sjc", ResX= 10,
                ResY= 10, Escala = 100000, Min = 0, Max =
20);

// Operação
// Resultado em campo Numérico para algumas regiões
especificas.
ph_medio = MediaZonal(ph,zonas.Classe == "terra_roxa",
                    zonas.Classe == "latosolo_vermelho",
                    zonas.Classe == "solos_hidromorficos");

// Resultado em campo Numérico para as classe temáticas
// presentes no plano de informação temático "solos_sjc".
// Neste caso cada tipo de solo define uma região.

ph_medio = MediaZonal(ph,zonas.Classe * );

// Resultado em um único valor numérico
ph_terra_roxa = MediaZonal(ph,zonas.Classe ==
"terra_roxa");

}

// Programa de media zonal que atualiza tabela de atributos
{
// Inicio de programa
// Declarações
Objeto          regioes ("municipios");
Cadastral       mapamunicipios ("mapacad");
Digital         altimetria("altime");

mapamunicipios = Recupere (Nome = "municipios");
altimetria     = Recupere (Nome = "alt");

// Resultado numérico em Tabela de Atributos de Objetos
regioes."altitudeM" = MediaZonal (altimetria,regioes OnMap
mapamunicipios);
}

```

MaxZonal(*pie*, *lista_de_zonas*)

Identifica o valor máximo dentro de cada zona (região) de um plano de informação referenciado pelo argumento *pie*. As zonas são definidas, uma a uma pela *lista_de_zonas*.

Sintaxe:

Resultado em grade Numérica.

```
pis = MaxZonal(pie, lista_de_zonas)
```

Resultado em um único valor numérico

```
vr = MaxZonal(pie, zona)
```

Resultado numérico em Tabela de Atributos de Objetos

```
Objeto."atr" = MaxZonal(pie, objeto OnMap pic)
```

Considerações:

pie - Plano de informação de entrada que define os valores dentro de cada região geográfica avaliada. O plano de informação *pie* deve ser do tipo **Imagem** ou do tipo **Numerico**.

lista_de_zonas - Identifica as zonas sobre as quais serão calculados os valores máximos. Todas as zonas presentes na *lista_de_zonas* devem estar localizadas sobre a região geográfica do *pie*. Uma zona ou região pode ser definida por uma expressão booleana ou por um objeto. Uma *lista_de_zonas* pode ser definida por uma lista de expressões booleanas, ou por todas as classe temáticas presente em um plano de informação temático.

Pis - Plano de informação de saída que deve ser do tipo **Numerico**.

vr - Variável do tipo float que recebe o valor máximo dentro de uma única região.

Objeto."atr" - Atributo de um objeto representado no plano de informação *pic*.

pic - Plano de informação do tipo cadastral representando um conjunto de regiões.

No caso do resultado em grade numérica, todas as posições na grade numérica dentro de uma zona receberão o valor máximo calculado sobre aquela zona.

Exemplos:

```
{
// Início do Programa
// Variáveis usadas como restrição
```

```

Tematico    zon("tipos_do_Solo");
Imagem     tm5("imagensTM");
Numerico    ph("ph_dos_solos");
Numerico    maximo_ph_zonal("grade10x10");
Float      reflec_max_terra_roxa;

ph           = Recupere(Nome = "ph_solo_sjc");
zon          = Recupere(Nome = "solos_sjc");

maximo_ph_zonal = Novo(Nome = "ph_maximo_zonal_sjc",
ResX = 10, ResY = 10, Escala = 100000, Min = 0 Max =
200);

// Resultado em campo Numérico
maximo_ph_zonal = MaxZonal(hp,zon.Classe ==
"terra_roxa",                               zon.Classe ==
"latosolo_vermelho",
                               zon.Classe == "solos_hidromorficos
);

// Resultado em campo Numérico para as classe temáticas
// presentes no plano de informação temático
"solos_sjc". // Neste caso cada tipo de solo
define uma região.

ph_medio = MaxZonal (ph,zon.Classe * );

// Resultado em um único valor numérico
reflec_max_terra_roxa = MaxZonal(tm5,zon.Classe ==
"terra_roxa");

// Final de Programa
}

// Programa de maximo zonal que atualiza tabela de atributos
{
// Inicio de programa
// Declarações
Objeto           regioes ("municipios");
Cadastral        mapamunicipios ("mapacad");
Digital          altimetria("altime");

mapamunicipios = Recupere (Nome = "municipios");
altimetria     = Recupere (Nome = "alt");

// Resultado numérico em Tabela de Atributos de Objetos
regioes."altitudeMax" = MaxZonal (altimetria,regioes OnMap
mapamunicipios);
}

```

Espacialize (objeto."<atributo>" **OnMap** <cadastral>)

Permite que os valores referentes a um certo atributo de objeto sejam mapeados em um geocampo do modelo Temático ou Digital. No primeiro caso atributos textuais são associados a classes temáticas, no segundo, os valores numéricos do atributo são representados em uma grade. Em ambos os casos regiões de isovalores são definidas à partir das entidades previamente associadas aos objeto em um mapa cadastral.

Sintaxe:

Resultado tipo **Temático** ou **Digital** (geo-campo).

```
tem = Espacialize(obj."atrtxt" OnMap cad)
```

```
dig = Espacialize(obj."atrnum" OnMap cad)
```

Considerações:

tem é o nome de uma variável associada ao plano de informação de saída, declarada previamente no programa. A variável *tem*, deve estar associada a uma certa categoria temática, cujas classes, definidas, também previamente, no esquema conceitual devem ter nomes idênticos aos valores textuais possíveis do atributo considerado para espacialização.

dig é o nome de uma variável associada ao plano de informação de saída, declarado previamente no programa sob uma certa categoria digital.

obj é o nome de uma variável associada a geo-objetos de uma categoria do modelo objetos. Estes geo-objetos, associados previamente a entidades de um mapa cadastral, devem ter seus campos de atributos preenchidos com valores numéricos ou nomes de classes temáticas..

atrtxt é o nome de um atributo do tipo texto que se deseja espacializar; cada valor possível desse atributo deve ser idêntico ao nome de uma classe da categoria temática associada ao plano representado pela variável *tem*.

atrnum é o nome de um atributo do tipo inteiro ou real que se deseja espacializar

cad é uma variável declarada no programa como sendo de uma certa categoria do modelo Cadastral, associada a um plano de informação cujas entidades representam os objetos envolvidos na espacialização.

Exemplo:

```

{
    // Inicio de programa
    // Declarando os nomes das variáveis usadas
    Objeto      limites ("talhoes");
    Cadastral   fazendas ("mapadefazendas");
    Tematico    tem ("solos");
    Numerico    ph_solos("grade_ph")

    // Instanciações
    //Dados de entrada
    fazendas = Recupere (Nome = "mt");
    tem = Novo (Nome="mapa_de_solos", ResX =30, ResY =30,
    Escala =10000, Repres =Vetor);

    Resultado em geo-campo Temático
    tem = Atualize (limites."SOLO" OnMap fazendas);

    Resultado em campo Numérico
    ph_solos = Atualize (limites."ph" OnMap fazendas);
}

```

Atualize (<PI referencia>, objeto **OnMap**
<cadastral>, <operador zonal>)

Realiza operações zonais entre GEO-CAMPOS e GEO-OBJETOS, onde os atributos do GEO-OBJETOS são atualizados a partir do resultado de operações booleanas sobre as classes dos GEO-CAMPOS temáticos de entrada.

Atualiza um atributo dos objetos, previamente associados a entidades em um mapa cadastral, a partir de valores obtidos pela aplicação de operadores zonais sobre um plano de informação de referencia.

Sintaxe:

```
obj."atr" = Atualize (pie, obj OnMap cad, opZ)
```

Considerações:

obj é o nome de uma variável associada a geo-objetos de uma categoria do modelo objetos. Estes geo-objetos, associados previamente a entidades de um mapa cadastral, devem ter seus campos de atributos preenchidos com valores numéricos ou nomes de classes tematicas..

pie é o nome de uma variável associada ao plano de informação de entrada, declarada previamente no programa e associada a uma certa categoria temática ou digital.

A operação zonal utilizada deve estar coerente com o modelo do dado representado pelo PI de referência, isto é: alguns operadores não fazem sentido diante do tipo de dado de referência, por exemplo, uma operação de *MediaZonal* não é viável sobre um plano de modelo temático.

"*atr*" é o nome do atributo que se deseja atualizar referente a cada objeto da categoria de objetos associada à variável *obj* que estejam associados a entidades de um mapa cadastral.

cad é uma variável declarada no programa como sendo de uma certa categoria do modelo Cadastral.

Exemplo:

```
// Programa Atualiza tabela com operacao de media zonal
{
Objeto          regioes ("municipios");
Cadastral      mapamunicipios ("mapacad");
Digital        altimetria("altime");

mapamunicipios = Recuperar (Nome = "municipios");
altimetria = Recuperar (Nome = "alt");
regioes."Altitudemedia" = Atualize ( altimetria, regioes OnMap
mapamunicipios, MedZ) ;
}

// Programa Atualiza tabela com operacao de maximo zonal
{
Objeto          regioes ("municipios");
Cadastral      mapamunicipios ("mapacad");
Digital        altimetria("altime");

mapamunicipios = Recuperar (Nome = "municipios");
altimetria = Recuperar (Nome = "alt");
regioes."Altitudemaxima" = Atualize ( altimetria, regioes
OnMap
mapamunicipios, MaxZ);
}
```

MinZonal(*pie, lista_de_zonas*)

Identifica o valor mínimo dentro de cada zona (região) de um plano de informação referenciado pelo argumento *pie*. As zonas são identificadas, uma a uma pela *lista_de_zonas*.

Sintaxe:

Resultado em grade Numérica.

```
pis = MinZonal (pie, lista_de_zonas)
```

Resultado em um único valor numérico

```
vr = MinZonal (pie, zona)
```

Resultado numérico em Tabela de Atributos de Objetos
Objeto."atr" = **MinZonal** (pie, objeto OnMap *pic*)

VariedadeZonal(*pie, lista_de_zonas*)

Calcula a diversidade de valores ou de temas dentro de cada zona (região) de um plano de informação referenciado pelo argumento *pie*. As zonas são identificadas, uma a uma pela *lista_de_zonas*.

Sintaxe:

Resultado tipo **Numerico** (geo-campo).

```
pis = VariedadeZonal(pie, lista_de_zonas)
```

Resultado em um único valor numérico

```
vr = VariedadeZonal(pie, zona)
```

FaixaZonal(*pie, lista_de_zonas*)

Sintaxe:

Resultado tipo **Numerico** (geo-campo).

```
pis = FaixaZonal(pie, lista_de_zonas)
```

Resultado em um único valor numérico

```
vr = FaixaZonal(pie, zona)
```