

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7115-TDI/667

**ÁLGEBRA DE MAPAS E SUAS APLICAÇÕES EM
SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO**

Cláudio Clemente Faria Barbosa

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pela Dra. Evlyn Márcia Leão Moraes Novo e pelo Dr. Gilberto Câmara Neto, aprovada em agosto de 1997.

INPE
São José dos Campos
1999

681.322.0 : 528.711.7

BARBOSA,C.C.F.

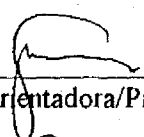
Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento. / C.C.F.Barbosa – São José dos Campos: INPE, 1997.

157p. – (INPE-7115-TDI/667.


1.Geoprocessamento. 2.Sensoriamento remoto. 3.Álgebra. 4.Mapas. 5.Sistemas de informação geográfica(SIG). 6.Zoneamento econômico ecológico. 7.Sistema de processamento de informações Geo-referenciadas. 8.LEGAL(linguagens de computação). I.Título.

Aprovada pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

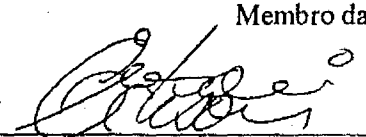
Dra. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo


Orientadora/Presidente


Dr. Mario Valerio Filho


Membro da Banca

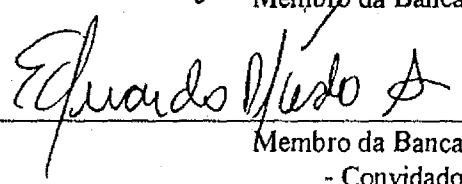
Dr. Edison Crepani


Membro da Banca

Dr. Antonio Miguel Vieira Monteiro


Membro da Banca

Dr. Eduardo Delgado Assad


Membro da Banca
- Convidado

Candidato: Cláudio Clemente Faria Barbosa

São José dos Campos, 20 de agosto de 1997

A minha esposa Elizabeth
e a nossa filha Carla,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Dra. Evelyn Márcia Leão Moraes Novo, pela orientação, motivação, apoio e sugestões úteis na elaboração deste trabalho

Ao Dr. Gilberto Câmara Neto, pela orientação, leitura e sugestões que muito contribuíram no aprimoramento deste trabalho.

Ao Dr. Edison Crepani, pelo apoio, correções e sugestões feitas ao capítulo 7.

Aos colegas João Pedro C. Cordeiro e Ubirajara Freitas pelo apoio e discussões durante a implementação dos comandos na LEGAL.

Ao colega Júlio César D'Alge, pelas diversas leituras, correções e sugestões muito contribuíram no aprimoramento deste trabalho.

Aos amigos Antonio Miguel, Celso Luis Mendes, pelas correções e sugestões.

Aos colegas José Simeão de Medeiros, Teresa Gallotti Florenzano e Valdete Duarte pelo apoio na montagem do exemplo de manipulação em LEGAL.

Aos amigos, Eduardo Celso Gerbi Camargo, Fernando Yutaka Yamaguchi e Lauro Tsumo Hara, pelas oportunidades de discussões.

RESUMO

O termo “Álgebra de Mapas” é utilizado na literatura de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto para denotar o conjunto de operadores que manipulam campos geográficos (imagens, mapas temáticos e modelos numéricos de terreno). Este trabalho discute as diferentes questões envolvidas na concepção, implementação e uso dos operadores da Álgebra de Mapas. Na análise conceitual, o trabalho apresenta uma visão teórica consistente do problema, ao analisar a definição destes operadores e ao indicar as alternativas de conversão de formatos necessárias para implementar cada operador. A implementação dos operadores foi realizada no ambiente da linguagem de comandos do sistema SPRING (LEGAL). Para testar e validar os operadores implementados, tomou-se uma aplicação prática, de grande importância (Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal). A partir de um roteiro metodológico¹, que objetiva estimar o grau de estabilidade de unidades homogêneas de paisagem, foi desenvolvida uma aplicação em LEGAL, a qual automatiza algumas etapas do roteiro utilizando os operadores implementados neste trabalho. A grande coerência entre os resultados obtidos por essa técnica e os produzidos anteriormente (com uso de interpretação visual) revelou o potencial da Álgebra de Mapas como ferramenta de apoio a estudos de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

¹Este roteiro metodológico foi desenvolvido com a participação do INPE, para ser utilizado no Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal. Equipe do INPE responsável pelo desenvolvimento da metodologia: Edison Crepani, José Simeão de Medeiros, Pedro Hernandez Filho, Teresa Gallotti Florenzano e Valdete Duarte.

MAP ALGEBRA AND ITS APPLICATION IN REMOTE SENSING AND GEOPROCESSING

ABSTRACT

The term "Map Algebra" is used in the Geoprocessing and Remote Sensing literature to denote the set of operators that handle geographic fields (images, thematic maps and numerical terrain models). This work analyzes the different questions involved in the conception, implementation and use of the operators from Map Algebra. In the conceptual analysis, this work presents a consistent theoretical vision of the problem, by analyzing the definition of these operators and by indicating the alternatives of format conversion that are required to implement each operator. The operators were implemented under the environment of the command language of the SPRING system (LEGAL). To test and validate the implemented operators, a concrete, important application was considered (Ecological and Economical Zoning of Legal Amazon). Starting with a methodological plan, which aims to estimate the degree of stability of homogeneous units of scenery, an application in LEGAL was developed to automate such plan, using the operators developed in this work. The great coherency between the results achieved by this technique and those previously produced (with the use of visual interpretation) has shown the potential of Map Algebra as a supporting tool for studies in Remote Sensing and Geoprocessing.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xxi
 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	 1
1.1 - Introdução	1
1.2 - Objetivos do Trabalho	2
1.3 - Organização do Trabalho	4
 CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS	 7
2.1 - Informação Geográfica	7
2.2 - Atributos	8
2.3 - Níveis de Medidas	9
2.4 - Mapas e Variáveis Espaciais	12
2.5 - Banco de Dados Geográficos	13
2.6 - Sistema de Informação Geográfica	14
2.6.1 - Componentes de um SIG	15
2.7 - Do Dado à Informação Geográfica	17
 CAPÍTULO 3 - MODELAGEM	 19
3.1 - Conceituação de Modelo.....	19
3.2 - Paradigma dos Quatro Universos.....	20
3.3 - Universo do Mundo Real	22
3.3.1 - Modelagem Ambiental.....	22
3.4 - Universo Matemático	25
3.4.1 - Classes de Dados Geográficos: Campo e Objeto	26
3.4.2 - Definição de Campo	26
3.5 - Universo de Representação	28
3.5.1 - Representações Geométricas	29
3.5.2 - Características das Representações Geométricas	33
3.5.3 - Relação entre Universo Matemático e Universo de Representação.....	35
3.6 - Universo de Implementação	37
3.6.1 - Relação Universo de Representação/Universo de Implementação	37
3.7 - Conclusões	38
 CAPÍTULO 4 - MANIPULAÇÃO: ANÁLISE E SÍNTESE	 41
4.1 - Manipulando Campos	42
4.2 - Conversões entre Representações Geométricas	44
4.2.1 - Conversão entre Representações de Campos Numéricos	45
4.2.2 - Conversão entre Representações de Campos Temáticos	47
4.2.3 - Regras para Conversão.....	49
4.3 - Álgebra de Campos	53

4.3.1 - Classes de Operações sobre Campos	53
4.3.1.1 - Operações Pontuais	54
4.3.1.2 - Operações de Vizinhaça	60
4.3.1.3 - Operações Zonais.....	65
4.4 - Linguagem de Manipulação	69
4.4.1 - Linguagem de Comandos Interpretados	70
CAPÍTULO 5 - LINGUAGEM LEGAL E EXTENSÕES PROPOSTAS.....	73
5.1 - Objetivo da LEGAL.....	73
5.2 - Estrutura da LEGAL	74
5.2.1 - Funcionalidades Propostas para o Módulo de Manipulação.....	75
5.3 - Implementação Disponível no SPRING-2.0.3	76
5.4 - Limitações da versão-2.0.3	76
5.5 - Contribuição à Linguagem LEGAL.....	77
5.5.1 - Mecanismos de Controle do Fluxo de Ações	78
5.5.2 - Operações Zonais.....	78
5.5.3 - Resultados Numéricos	79
5.5.4 - Geração de Relatórios	79
CAPÍTULO 6 - MATERIAIS E SISTEMAS	81
6.1 - Descrição da Região usada como Exemplo	81
6.1.1 - Localização	81
6.1.2 - A Paisagem da Folha Rio Fresco (SB-22-Y-D).....	82
6.2 - Materiais	83
6.3 - Sistemas	84
6.3.1- YACC	84
6.3.2 - SCARTA	85
6.3.3 - SPRING	85
6.3.3.1 - Modelo de Dados Conceitual do Sistema SPRING	86
CAPÍTULO 7 - EXEMPLO DE MANIPULAÇÃO EM LEGAL	89
7.1 - Estrutura de um Programa em LEGAL.....	89
7.2 - Exemplo de Aplicação	92
7.2.1 - Roteiro Metodológico para Elaboração de Cartas Temáticas de Vulnerabilidade Natural à Erosão	92
7.2.2 - Elaboração de Carta de Vulnerabilidade usando a LEGAL.....	100
7.2.2.1 - Conversão dos Dados.....	100
7.2.2.2 - Manipulação dos Dados.....	101
7.2.2.3 - Apresentação dos Dados e Resultados Obtidos	103
7.2.3 - Análise dos Resultados	115
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	121
8.1 - Conclusões	121
8.2 - Sugestões.....	123

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
APÊNDICE A- SINTAXE DOS COMANDOS UTILIZADOS DA LEGAL....	129
APÊNDICE B- LISTAGEM DO EXEMPLO DE MANIPULAÇÃO EM LEGAL.....	143
APÊNDICE C- CLASSES PRESENTES NOS DADOS TEMÁTICOS.....	155

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Unificação de conceitos de modelagem em SIG	3
2.1 - Componentes de um Sistema de Informação Geográfica	17
2.2 - Ciclo de extração e utilização de informações	18
3.1 - Níveis de abstração relevantes	21
3.2- Estatística espacial: Uma ferramenta de modelagem ambiental	25
3.3 - Representação <i>grade regular de células</i> de uma variável geo-campo	30
3.4 - Representação <i>regiões contíguas</i> de uma variável geo-campo	30
3.5 - Representação <i>grade triangular</i> de uma variável geo-campo	31
3.6 - Representação <i>grade regular de pontos</i> de uma variável geo-campo.....	32
3.7 - Representação <i>amostras irregulares</i> de uma variável geo-campo	32
3.8 - Representação <i>isolinhas</i> de uma variável geo-campo	33
4.1 - Operação entre geo-campos de representações diferentes	43
4.2 - Exemplo de interpolação na representação <i>isolinha</i>	46
4.3 - Polígonos de Thiessen	48
4.4 - Operações entre representações diferentes	52
4.5 - Classes de operações geográficas	53
4.6 - Operações Pontuais	54
4.7 - Operação matemática pontual.....	55
4.8 - Operação pontual de Fatiamento.....	58
4.9 - Operação pontual de Reclassificação.....	59
4.10 - Operação pontual de Ponderação.....	59
4.11 - Operação de vizinhança	61
4.12 - Operação Minoria de uma vizinhança	62
4.13 - Operação Intervalo de uma vizinhança	63
4.14 - Operação Diversidade de uma vizinhança	64
4.15 - Exemplo de operação zonal	65
4.16 - Máximo zonal	66
4.17 - Operação de Maioria zonal	67
5.1 - Estrutura de LEGAL	74
6.1 - Localização da área de estudo, no Estado do Pará.....	81
6.2 - Yacc um gerador de analisador gramatical	85
6.3 - Modelo conceitual do SPRING	87
7.1 - Fluxograma do roteiro metodológico usado na elaboração de cartas temáticas de vulnerabilidade à erosão.....	93
7.2 - Modelo para estimar da vulnerabilidade natural à erosão de uma Unidade Territorial Básica	99
7.3 - Operações executadas sobre o conjunto de dados	102
7.4 - Mosaico em composição colorida das bandas 3(B),4(G),5(R) do sensor Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT associada as cores Azul, Verde e Vermelho respectivamente	103
7.5 - Compartimentação das Unidades Territoriais Básicas da área de estudo.....	104

7.6 - a) Mapa temático de Geologia; b) Grade regular com os valores médios nas <i>utbs</i> para o tema geologia; c) Mapa temático de vulnerabilidade das <i>utbs</i> relativa ao tema geologia.....	105
7.7 - a) Mapa temático de Geomorfologia; b) Grade regular com os valores médios nas <i>utbs</i> para o tema geomorfologia; c) Mapa temático de vulnerabilidade das <i>utbs</i> relativa ao tema geomorfologia	106
7.8 - a) Mapa temático de Solos; b) Grade regular com os valores médios nas <i>utbs</i> para o tema Solos; c) Mapa temático de vulnerabilidade das <i>utbs</i> relativa ao tema Solos.....	107
7.9 - a) Mapa temático de Vegetação; b) Grade regular com os valores médios nas <i>utbs</i> para o tema Vegetação; c) Mapa temático de vulnerabilidade das <i>utbs</i> relativa ao tema Vegetação	108
7.10 - Operação pontual de média para estimar a Vulnerabilidade natural à erosão.....	109
7.11 - Mapa temático de Vulnerabilidade Natural à Erosão	110
7.12 - Representação Gráfica das Discrepâncias entre o Processo Manual e a Linguagem	117
7.13 - Contagens das Discrepâncias absolutas em cada tema	119

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1. - Mapeamento de representação geométrica para estrutura de dados.....	38
3.2. - Correspondência entre os Universos de Modelo.....	39
4.1. - Operações Pontuais sobre geo-campos	55
4.2. - Operações Pontuais de Transformação	58
4.3. - Operações de Vizinhaça	62
4.4. - Operações Zonais	66
7.1 - Valores de estabilidade de unidades de paisagem	95
7.2 - Modelo de Integração e Representação de Dados Temáticos (ZEE)	98
7.3 - Nome das classe de vulnerabilidade/estabilidade	99
7.4 - Valores de vulnerabilidade de cada unidade ambiental estimados pelos processos manual e automático	111
7.5 - Percentuais de Discrepâncias entre processo Manual e Linguagem	116

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<i>ASCII</i>	American Standard Code for Information Interchange
<i>LEGAL</i>	<u>L</u> inguagem <u>E</u> spacial para <u>G</u> eoprocessamento <u>A</u> lgébrico
<i>SPRING</i>	<u>S</u> istema de <u>P</u> rocessamento de <u>I</u> nformações <u>G</u> eo-referenciadas
<i>TIN</i>	Triangulation Irregular Network
<i>utb</i>	Unidade Territorial Básica
<i>ZEE</i>	Zoneamento Ecológico Econômico

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 - INTRODUÇÃO

As questões ambientais estão entre as mais importantes com as quais tomadores de decisões se deparam hoje em dia. A dinâmica dos sistemas atmosférico e hidrológico da Terra mostra que todos os sistemas ambientais estão fortemente interrelacionados, dinamicamente e espacialmente. Impactos ambientais em uma determinada posição geográfica têm geralmente efeito sobre outras posições geográficas (Kemp,1992).

Com o objetivo de monitorar os efeitos destes impactos, tecnologias tais como Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento e Computação, têm alcançado considerável progresso na integração de dados geográficos, incluído a proposição e implementação de modelos matemáticos aplicados a processos ambientais. Os produtos desta tecnologia, sistemas baseados em computador capazes de capturar, modelar, manipular, recuperar, analisar e apresentar dados referenciados geograficamente, são denotados genericamente de *sistemas de informação geográfica* (SIG) (Worboys, 1995).

Apesar dos progressos obtidos, existem ainda incompatibilidades que inibem uma integração completa entre os modelos ambientais e os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs). Enquanto os SIGs gerenciam dados estáticos e discretos, os modelos ambientais tratam de processos espacialmente contínuos e com variações temporais. As bases de dados gerenciadas pelos SIGs contém informações de localização, de distribuição espacial e de relacionamento espacial entre entidades, enquanto alguns modelos ambientais trabalham com conceitos de conservação e transferência de massa ou energia (Maidment,1993).

Este trabalho aborda uma destas incompatibilidades, que é a questão de se manipular variáveis ambientais espacialmente contínuas através de suas representações discretas no contexto computacional dos SIGs, usando para isto uma

linguagem de comandos com sintaxe e semântica apropriada à manipulação de dados geográficos.

Os trabalhos anteriores na literatura que serviram de motivação para a linha de estudo adotada no presente trabalho foram:

- Câmara Neto (1995), que aborda questões como modelagem conceitual e operações em SIG.
- Kemp (1992), que trata das formas de representação e manipulação de campos geográficos.
- Tomlin (1990), que formaliza a álgebra de mapas no formato matricial.
- Berry (1987), que descreve as classes básicas de operações da álgebra de mapas.

1.2 - OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo teórico dar uma contribuição à modelagem em SIG, sugerindo como *unificar* os conceitos apresentados por Câmara Neto (1995), Kemp (1992) e Tomlin (1990), fornecendo como resultado um arcabouço conceitual para uma abordagem multi-nível para modelagem em SIG. A Figura 1.1 ilustra a abordagem multi-nível¹ a ser apresentada no Capítulo 3.

¹A abordagem multi-nível discutida neste trabalho é uma adaptação da hierarquia de abstrações ou Paradigma dos quatro universos, proposta por Gomes e Velho (1994) para modelar objetos de estudos em computação gráfica.

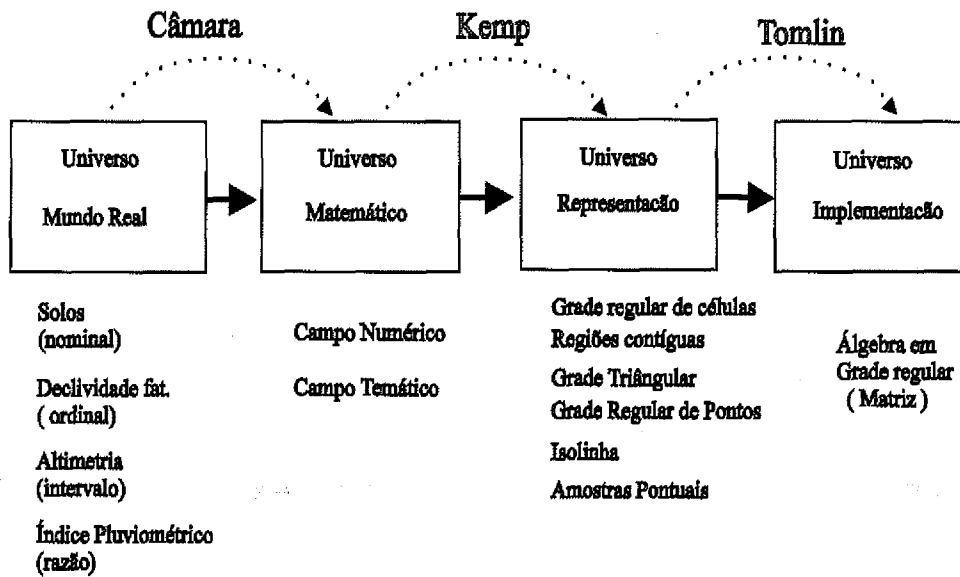


Fig. 1.1 - Unificação de conceitos de modelagem em SIG

Para melhor esclarecer este objetivo teórico, é importante considerar a contribuição de cada um dos autores mencionados e como este trabalho procura estabelecer uma ligação entre eles.

Em Câmara Neto (1995), é apresentada uma modelagem dos dados geográficos, onde a ênfase principal está em estabelecer uma formulação conceitual das variáveis geográficas. Em outras palavras, este autor procura mostrar como as variáveis do mundo real podem ser reduzidas a seis tipos básicos de objetos no universo matemático. O trabalho de Câmara Neto (1995) não entra em muitos detalhes sobre as diferenças entre as diversas representações do mesmo dado geográfico. Assim sendo, consideramos que a contribuição maior deste autor está no mapeamento entre o universo do mundo real e o universo matemático.

Kemp (1992) parte do ponto de vista específico do estudo de geo-campos (variáveis espaciais contínuas) e mostra como as diferentes representações de geo-campos diferem entre si e procura estabelecer regras para a conversão entre as representações. Na perspectiva do paradigma dos quatro universos, o trabalho de Kemp (1992) se coloca como definindo o mapeamento entre o *universo matemático* dos geo-campos e o *universo de suas representações*.

Já Tomlin (1990) tem uma abordagem essencialmente prática. Partindo essencialmente de uma representação fixa (matriz), este autor postula um conjunto de operações de manipulação de mapas. A abordagem de Tomlin pode ser vista como tomando um subconjunto do universo de representação (mapas representados por matrizes), pode-se implementar um conjunto de operadores.

Deste modo, pode-se ver que há uma grande complementariedade entre os três autores, que essencialmente analisaram aspectos diferentes do problema de modelagem de dados geográficos. Nesta perspectiva, a parte teórica desta dissertação irá procurar mostrar como se pode unificar os conceitos presentes em Câmara Neto (1995), Kemp (1992) e Tomlin (1990).

O objetivo prático deste trabalho é ampliar a linguagem de comandos LEGAL², atualmente disponível no sistema SPRING³, adicionando à linguagem *operadores zonais* (máximo, mínimo, diversidade etc), *comandos de controle* (while, if...else) e funcionalidade para *geração de relatórios* (print). É também objetivo deste trabalho mostrar que com a utilização da linguagem e dos novos comandos implementados é possível automatizar procedimentos de manipulação.

1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 2 trata de uma série de conceitos básicos necessários à melhor compreensão deste trabalho. O Capítulo 3 apresenta uma abordagem multi-nível para modelagem ambiental, usada para integrar dados geográficos ao ambiente computacional de um Sistema de Informação Geográfica.

O Capítulo 4 aborda a questão de operadores para a manipulação de variáveis da classe geo-campo através do que se convencionou chamar de álgebra de campos. Estas duas ferramentas, modelagem ambiental e álgebra de campos, permitem implementar uma metodologia de processamento de dados geográficos denominada na

²A linguagem de manipulação LEGAL do sistema SPRING é apresentada no Capítulo 5.

³SPRING, Sistema de Processamento de Informações Geo-referenciadas, desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI), INPE

literatura de modelagem cartográfica, cujo objetivo é tratar de forma clara e consistente diversas aplicações na área de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (Tomlin,1991).

No Capítulo 5 apresentam-se a linguagem LEGAL e a contribuição deste trabalho para a extensão da linguagem LEGAL. O Capítulo 6 descreve o modelo de dados conceitual do SPRING e os sistemas e material utilizados na execução deste trabalho.

O Capítulo 7 apresenta a estrutura geral de um programa em LEGAL, descreve o roteiro metodológico para elaboração de uma carta de vulnerabilidade natural à erosão, segundo uma metodologia usada pelo ZEE⁴ e exemplifica o uso da linguagem através da execução de forma automatizadas de algumas etapas deste roteiro.

O Capítulo 8 é dedicado às conclusões e sugestões. O Apêndice A mostra a sintaxe dos comandos utilizados no exemplo, o Apêndice B apresenta a listagem completa do programa escrito para o exemplo, e o Apêndice C contém uma lista das classes presentes nos dados temáticos usados.

⁴ZEE - Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazonia Legal.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS BÁSICOS

Este Capítulo apresenta inicialmente a definição e a forma de descrição de dados geográficos. Discute também os níveis de medidas usados na aquisição de amostras de variáveis ambientais e introduz o conceito de banco de dados geográficos. Finalmente, apresenta de forma sucinta uma ferramenta para gerenciar e manipular estes dados em um ambiente computacional: os *sistemas de informação geográfica*.

2.1 - INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

A aquisição de dados que representam propriedades significativas da superfície da Terra é uma parte importante da atividade das sociedades organizadas. Desde as civilizações antigas até os tempos modernos, dados referenciados a localidades da superfície terrestre têm sido coletados por navegadores, geógrafos e outros estudiosos, e organizados na forma de mapas e imagens.

Estes dados são denominados *dados geográficos* e descrevem um objeto do mundo real em termos de sua posição em relação a um sistema de coordenadas conhecidas, *localização geográfica*; de suas relações espaciais com outros objetos como pertinência, vizinhança e distância, *relacionamentos espaciais*; e de suas propriedades medidas ou observadas, *atributos temáticos* (Burrough, 1987). As informações extraídas destes dados são denominadas de *informações geográficas*.

Nas últimas décadas, o estudo científico dos recursos naturais por disciplinas como geologia, meteorologia, pedologia e ecologia gerou novos dados passíveis de serem mapeados. Com esta massa crescente de dados, tornou-se praticamente impossível mapeá-los manualmente. Isto levou ao desenvolvimento de ferramentas automáticas e computadorizadas para manipulação destes dados. As ferramentas desta nova tecnologia são denominadas Sistemas de Informação Geográfica¹ (SIG).

¹A Seção 2.7 define de maneira mais detalhada o termo SIG

2.2 - ATRIBUTOS

No ambiente de um SIG as entidades do mundo real podem ser didaticamente descritas por atributos espaciais, temporais e temáticos.

Os *atributos espaciais* guardam informações sobre localização, topologia e geometria das entidades. A *localização* é registrada em coordenadas geográficas, coordenadas de projeção ou coordenadas retangulares com uma origem local. A *topologia* contém informações sobre vizinhança, distância; a *geometria* contém informações sobre área, perímetro, forma. A tecnologia atual de Sistemas de Informação Geográfica permite a geração de topologia e geometria a partir dos dados de localização.

Os *atributos temporais* referem-se à idade do objeto de estudo, à data ou à frequência de aquisição. Os *atributos temáticos* referem-se a outras propriedades das entidades, que não são de localização nem temporais, tais como tipos de rochas, índice pluviométrico anual, tipos de solos, presença de minerais. Os atributos temporais e os temáticos são também conhecidos como *atributos não-espaciais* ou *atributos descritivos*.

A manipulação destes atributos, manualmente ou através de sistemas computacionais, com o objetivo de extrair informações, é denominada de *análise geográfica*. Conceitualmente pode-se dividir as operações de análise geográfica em três grupos:

- As operações de *manipulação*² são usadas por exemplo para classificar tematicamente um atributo em função do seu valor em cada posição, ou combinar atributos diferentes com o objetivo de encontrar alguma correlação espacial entre eles. Tomlin (1990) denomina estas operações de *álgebra de mapas*.
- As operações de *consulta espacial* são usadas, por exemplo, para recuperar de um banco de dados um conjunto de dados que satisfaça a uma condição

²Algumas operações de manipulação são discutidas no Capítulo 4 deste trabalho. Uma discussão mais completa pode ser encontrada no Capítulo 8 de Star and Estes (1990) e no Capítulo 5 do Burrough (1987)

definida pelo usuário. O resultado de uma operação de consulta pode ser posteriormente manipulado por um operador de manipulação ou simplesmente visualizado através de uma operação de apresentação.

- As operações de *apresentação* são usadas para controlar as possíveis formas de visualização dos resultados das operações de manipulação ou de consulta.

O registro dos atributos pode ser feito de acordo com várias escalas ou níveis de medidas, dependendo do grau de refinamento que se queira dar à descrição do objeto de estudo.

2.3 - NÍVEIS DE MEDIDAS

De forma genérica, o termo *medição* pode ser definido como o processo de se atribuir um valor numérico ou um nome a cada evento observado, segundo regras pré-estabelecidas (Kemp,1992). Estas regras podem ir deste a simples atribuição do valor 0 ou 1 para as amostras (0 = *sêco*, 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.

Segundo Kemp (1992), as medidas podem ser classificadas em 5 níveis: *binário, nominal, ordinal, intervalo e razão*. Os três 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 *binário* baseia-se na diferenciação entre os objetos segundo duas classes distintas. Por exemplo, o clima pode ser classificado como: seco ou úmido, quente ou frio, atribuindo-se valores 0 e 1 para classes distintas. Evidentemente que esta é uma forma bastante grosseira de se descrever os eventos, na qual possivelmente há uma grande perda de informações, mas pode haver situações nas quais esta descrição seja suficiente.

O nível de medida *nominal* é uma evolução do nível binário, em que o número de classes disponíveis para a descrição do objeto de estudo é maior do que dois. 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.

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, ou o ponto de congelamento da água usado como referência nas medidas de temperatura em graus Celsius são exemplos de referências zero arbitrárias. Temperatura em graus Celsius, elevação, pressão, localização geográfica em latitude/longitude, são 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; por exemplo, não faz sentido físico a operação $10^{\circ}\text{C} \times 2$, desde que 20°C não é duas vezes mais quente do que 10°C (Abler, 1972).

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 são incluídos para permitir a conversão de valores medidos no nível por intervalo para o nível por razão, em unidades apropriadas. Um exemplo de conversão parametrizada, envolvendo medidas por intervalo, é a fórmula para cálculo do potencial de evapotranspiração (Turc, 1961)

$$PET = \frac{0.4T(R_s + 50)}{T + 50}$$

Onde :

PET = potencial de evapotranspiração (mm/mes) (*razão*)
 T = temperatura média do ar (°C) (*intervalo*)
 Rs = radiação solar (cal/cm2) (*razão*)

2.4 - MAPAS E VARIÁVEIS ESPACIAIS

O dado geográfico na forma tabular perde uma de suas principais características, que é a visão da distribuição espacial dos atributos sobre a superfície terrestre. A visão espacializada dos dados geográficos facilita a análise das correlações entre amostras de uma mesma variável e entre amostras de variáveis diferentes. Um mapa é um modelo simplificado da realidade, onde a informação geográfica é apresentada de forma espacializada e em escala. Historicamente, os mapas têm sido usados para navegação através de regiões desconhecidas. Dentro deste contexto, a preparação de mapas com exatidão na localização das características físicas é o primeiro foco de atenção.

Mais recentemente, a análise de dados mapeados para auxiliar na tomada de decisões tem se tornado uma parte importante no gerenciamento dos recursos naturais e urbanos. Durante a década de 60, os procedimentos manuais de sobreposição (overlays) foram popularizados. Estes procedimentos marcaram uma mudança importante na utilização de mapas, saindo de uma ênfase na descrição física do espaço para uma prescrição espacial, apropriada para gerenciamento de ações (Berry, 1991).

Esta mudança do mapeamento descritivo para o mapeamento prescritivo marcou uma fase que revolucionou os conceitos na estrutura, conteúdo e uso de mapas. Os mapas de papel tendem a ser substituídos por mapas digitais, e as mesas de luz pelo ambiente computacional. Atualmente, para satisfazer o formalismo matemático necessário ao processamento computacional dos dados geográficos, cada tema de um mapa é tratado como uma *variável espacial* separada.

Os SIGs fornecem um meio para efetivar esta transição, pois de um lado permitem o uso dos procedimentos de sobreposição manual e de outro fornecem um

vasto conjunto de ferramentas que permite tratar questões complexas de gerenciamento de recursos naturais de uma maneira inteiramente nova.

Burrough (1987) classifica os mapas em dois tipos: mapas de *propósito geral* e mapas *temáticos*. Mapas topográficos são considerados de propósito geral, porque eles não são construídos com objetivos específicos e servem como referência para a navegação. Por outro lado, mapas de distribuição de tipos de rochas, tipos de solos ou uso da terra, são feitos com propósitos específicos. Estes mapas, são referenciados como mapas *temáticos* porque possuem informação sobre um determinado tema. Num ambiente computacional, um mapa *temático* é referenciado como uma *variável temática*.

No contexto deste trabalho, um subconjunto qualquer da superfície terrestre delimitando uma área sobre a qual um determinado fenômeno é modelado para fins de estudo será chamado de *região geográfica*.

2.5 - BANCO DE DADOS GEOGRÁFICOS

Um repositório de dados de qualquer natureza é denominado de *banco de dados*. Quando os dados existentes neste repositório são geográficos, denomina-se *banco de dados geográfico*. Como exemplo de banco de dados geográfico tem-se: atlas dos municípios e anuários estatísticos gerados pelo IBGE, dados topográficos, dados geoquímicos e dados geofísicos, etc. Em todos estes dados as propriedades registradas estão sempre associadas a uma localização na superfície da Terra. Na forma de papel, os dados de um banco são representados por tabelas e mapas. Na forma digital³, os dados podem ser representados por imagens de sensoriamento remoto, grades regulares de pontos, grades triangulares⁴, além de tabelas e mapas.

A informação geográfica de interesse nem sempre está explícita em um dado geográfico. Em muitos casos a informação desejada pode estar implícita em várias instâncias de uma variável ou mesmo depender da influência de outras variáveis

³Banco de Dados Geográfico Digital

⁴As representações geométricas de dados geográficos no ambiente de SIG estão descritas na Seção 3.5

correlacionadas. Por exemplo, a qualidade do ar na cidade de São Paulo é função de diversas variáveis, como índice pluviométrico, temperatura, pressão, circulação de veículos, áreas verdes e etc. A informação da contribuição de cada variável na qualidade final do ar é obtida a partir de uma série de manipulações. Neste caso, é essencial que todos os dados estejam disponíveis e possam ser manipulados simultaneamente a qualquer instante. Neste contexto, um *banco de dados geográfico* pode ser visto como uma forma organizada de se manter dados que possam estar correlacionados.

2.6 - SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

O termo *sistema de informação geográfica* (SIG) é aplicado para sistemas computacionais que manipulam dados geográficos. A palavra *sistema* deve-se ao fato do SIG ser composto por vários componentes interrelacionados. A palavra *informação* deve-se ao fato do SIG permitir a conversão de dados em informações a partir de manipulações e consultas interativas sobre os dados armazenados. A palavra *geográfica* implica que os dados possuem localizações conhecidas ou podem ser calculadas em termos de coordenadas geográficas. Devido à 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 (Câmara Neto, 1995):

- *como tecnologia de gerenciamento de uma base de dados geográficos:*

Os avanços da tecnologia de computadores e de satélites espaciais nas últimas décadas, facilitaram a aquisição de dados geográficos por órgãos governamentais e privados, gerando com isto uma massa muito grande de dados. Os SIGs possuem ferramentas que permitem a integração, em uma única base, de informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo, cadastro urbano e rural, imagens de satélite.

- *como suporte para análise espacial de fenômenos:*

No estudo de sistemas ambientais, a interação entre processos deve ser considerada. Os SIGs oferecem mecanismos para manipular simultaneamente vários dados. Estes mecanismos vão desde a consulta, a recuperação e a visualização, até a combinação das variáveis para análise. O processo de análise dos dados é, geralmente, aquele no qual as relações e significados que estão implícitos em um conjunto de dados são extraídos e mostrados de forma explícita (Bonham-Carter, 1996).

- *como ferramenta para produção cartográfica:*

Por possuir facilidades de edição, visualização, acesso rápido, registro geográfico dos dados, os SIGs estão se tornando uma ferramenta de trabalho nos órgãos responsáveis por produção cartográfica.

2.6.1 - COMPONENTES DE UM SIG

Os componentes básicos de um SIG são: *Interface com usuário, Entrada e Integração de Dados, Consulta e Manipulação, Saída de Dados e Sistema de Gerência de Banco de Dados*. Cada sistema de informações geográficas, em função de seus objetivos e necessidades, implementa estes componentes de forma distinta, mas todos estão presentes em um SIG (Câmara Neto, 1995).

A interação do usuário com o sistema pode ser através de uma interface gráfica com menus ou através de uma linguagem de comandos, onde o usuário determina uma sequência de operações e ser executada.

Na entrada e integração de dados realiza-se a conversão de dados externos para um formato interno de trabalho do SIG. Os dados externos podem estar na forma de mapas e tabelas de atributos em papel, arquivos de mapas digitalizados, imagens de satélites, fotografias, etc. Devido à diversidade de fontes e formatos, a entrada de dados é a maior restrição na implementação de um projeto em ambiente de SIG, pois o investimento necessário para a construção de uma base de dados de grande porte pode ser de 5 a 10 vezes superior aquele necessário para a aquisição de hardware e software juntos (Aronoff, 1989). Uma operação necessária e importante, executada pelo

componente de entrada é a compatibilização de localização entre os diversos dados que estão sendo integrados. O componente de entrada e integração interage diretamente com o componente Sistema de Gerência de Banco de Dados (SGBD), descrito a seguir.

O componente sistema de gerência de banco de dados é responsável pelo armazenamento e recuperação dos dados no banco de dados geográfico digital do SIG. Para que estes dados tenham uso prático, é necessário que o SGBD possua as seguintes características: eficiência (acesso e modificações de grandes volumes de dados); integridade (controle de acesso por múltiplos usuários); e persistência (manutenção de dados por longo tempo, independentemente dos aplicativos que acessem o dado).

O componente de consulta e manipulação interage com o SGBD para extrair as informações desejadas pelo usuário. Fazem parte deste módulo as funções de processamento de imagens, consulta e análise espacial. As operações discutidas e implementadas neste trabalho são classificadas como pertencentes ao módulo de manipulação.

Para permitir análises interativas, visualizar resultados de consultas e manipulações, gerar relatórios e mapas, os SIGs possuem um módulo de saída. Com o aprimoramento da tecnologia de geoprocessamento, alguns formatos de intercâmbio de dados estão se estabelecendo como padrões de fato, e isto tem permitido o uso de pacotes específicos, como por exemplo pacotes estatísticos, fora do ambiente do SIG. A conversão dos dados do formato interno para um formato de intercâmbio é feita por rotinas do componente de saída.

A Figura 2.1 ilustra o relacionamento entre os principais componentes de um SIG.

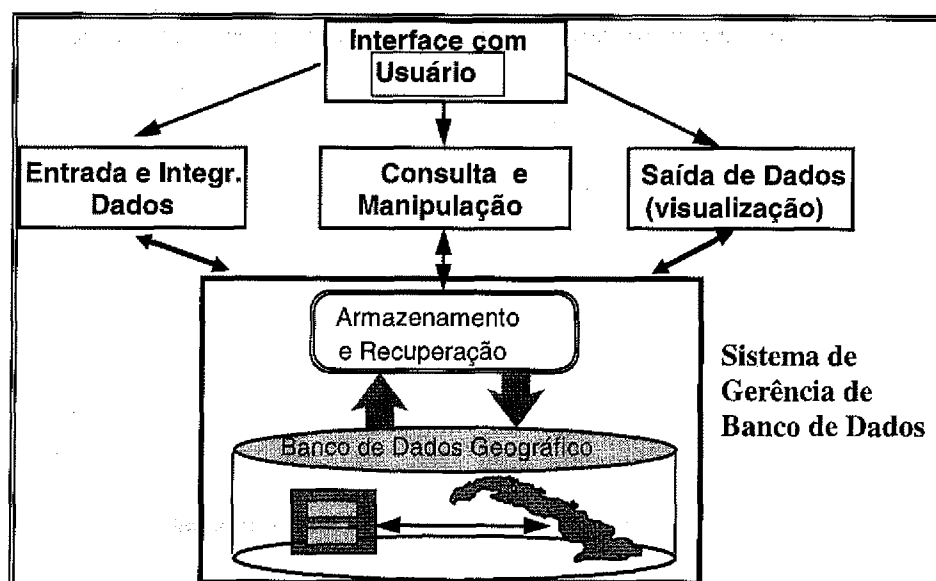


Fig. 2.1 - Componentes de um Sistema de Informação Geográfica
 FONTE: adaptada de Câmara Neto(1995), p. 2.6

2.7 - DO DADO À INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

O fluxo dos dados no processo de conversão de dados geográficos em informações geográficas e a posterior utilização destas informações na geração de ações de controle pode ser decomposto em várias etapas distintas, conforme ilustrado na Figura 2.2.

A primeira etapa compreende a aquisição dos dados através de várias formas, satélites, aviões, equipamentos manuais em campo, etc, e níveis de medidas, nominal, ordinal, intervalo e razão. O resultado desta etapa pode ser uma grande massa de dados em diversos formatos, analógicos e digitais, e possivelmente sem uma organização lógica.

A etapa seguinte é a modelagem e a integração destes dados em uma base comum, gerando um banco de dados geográfico no formato digital. As questões envolvidas nesta etapa são discutidas no próximo Capítulo.

A terceira etapa, que compreende a recuperação e a manipulação dos dados disponíveis no banco, tem por objetivo a análise e extração de informações que possam eventualmente estar implícitas nos dados. É nesta etapa que, com o auxílio das

ferramentas de manipulação de dados geográficos presentes nos SIGs, estes dados são convertidos em informações geográficas.

A próxima etapa é a utilização das novas informações no suporte à tomada de decisões.

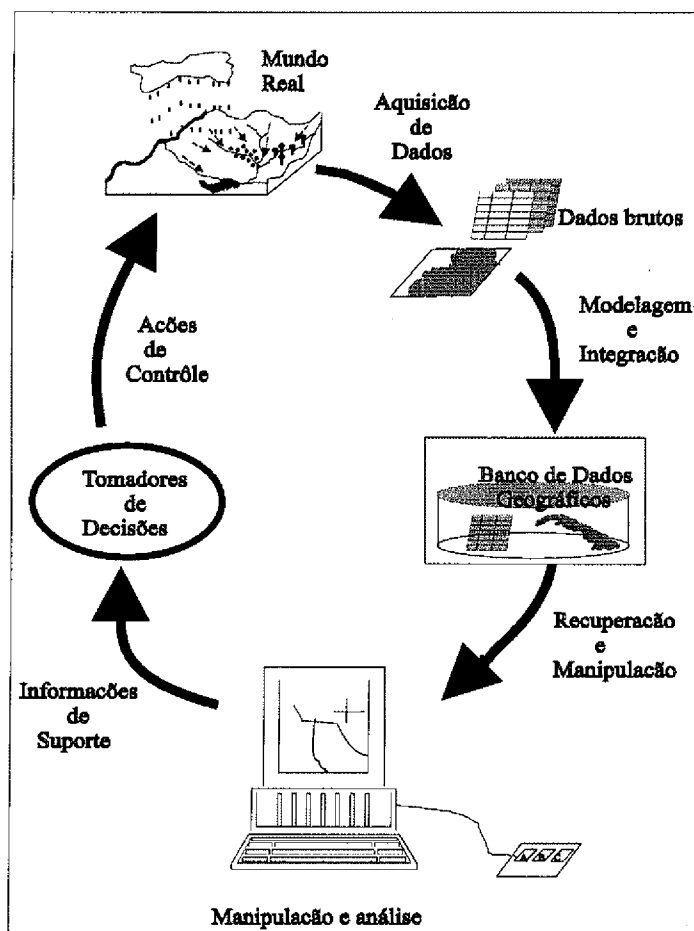


Fig. 2.2 - Ciclo de extração e utilização de informações
FONTE: adaptada de Aronoff (1989), p. 34

CAPÍTULO 3

MODELAGEM

Este Capítulo procura situar o leitor com respeito às principais fases do processo de modelagem e representação de dados geográficos em ambiente computacional. A abordagem adotada, ao dividir o processo em várias fases, tem por objetivo permitir um melhor entendimento do problema.

3.1 - CONCEITUAÇÃO DE MODELO

Ao se estudar um determinado processo ambiental, é comum o uso de modelagem, que consiste em descrever de forma matemática, simbólica ou funcional o processo de interesse. O resultado é um modelo que procura representar o conhecimento que se tem sobre o processo em estudo. Por exemplo, para descrever o comportamento hidrológico de uma determinada região, pode-se gerar para a área de estudo um modelo hidrológico que descreva o fluxo da água e sua composição.

Os computadores e consequentemente os Sistemas de Informação Geográfica operam sobre números e caracteres, por isto não há como aplicá-los diretamente a variáveis do mundo real. A representação e a análise destas variáveis ambientais no contexto computacional passam primeiramente pela aquisição de amostras da variável. Contudo, devido à complexidade da natureza, à imprecisão na medida das amostras, às aproximações de modelagem, aos interesses de estudo e às limitações computacionais, os modelos são representações simplificadas da realidade. Um bom modelo é aquele que prevê correta e consistentemente o funcionamento do mundo real para a variável de interesse.

Para uma mesma área geográfica de estudo podem ser obtidos diversos modelos, cada um representando a visão e o interesse do modelador. Por exemplo, ao criar um modelo conceitual a partir de uma imagem de Sensoriamento Remoto, um geólogo estrutural, um geomorfólogo e um geobotânico provavelmente produzirão três modelos diferentes. O geólogo estrutural registrará lineamentos, atitude das camadas,

eixo de dobras. O geomorfólogo está interessado nas unidades de relevo e suas formas e o geobotânico mapeará as unidades de vegetação e suas relações com a litologia.

O grau de similaridade de um modelo com a realidade pode ser estimada pela acurácia com que o resultado do modelo ajusta-se ao resultado do fenômeno natural e pela correspondência entre a previsão gerada pelo modelo e a observada no fenômeno. Neste contexto de verificação da validade do modelo, a acurácia dos dados e seus métodos de aquisição são fatores relevantes.

Sob a perspectiva de gerenciamento, os modelos são projetados para avaliar as consequências da aplicação de determinada política ambiental, acompanhar a evolução de planejamentos e simular e estimar situações de risco. Do ponto de vista científico, os modelos são construídos para melhorar a compreensão de sistemas naturais, pois o processo de construção de um modelo força o modelador a justificar sua visão conceitual do fenômeno e a quantificar a influência de cada fator (Cross and Moscardini, 1985).

3.2 - PARADIGMA DOS QUATRO UNIVERSOS

Devido à complexidade do mundo real, o processo de captura da realidade para efeito de modelagem envolve abstrações, generalizações e aproximações. Neste caso uma abordagem recomendada é a divisão do processo em vários níveis que permitam o encapsulamento dos problemas de cada nível, possibilitando assim um melhor entendimento destes problemas e a conseqüente a solução dos mesmos. Esta abordagem é discutida por Peuquet (1984), Gomes e Velho (1994) e aplicada por Câmara Neto (1995) no desenvolvimento do modelo conceitual do SPRING. Denominada de “*paradigma dos quatro universos*”, esta abordagem estabelece quatro níveis ou *universos* de abstração:

- Universo do *mundo real*, que contém os objetos do mundo real que se pretende estudar.
- Universo *matemático* ou *conceitual*, que contém uma descrição matemática formal dos objetos do mundo real e incorpora somente as propriedades

consideradas relevantes para o estudo. É a conceitualização humana dos objetos do universo do mundo real.

- Universo de *representação*, que é constituído por descrições simbólicas e finitas associadas a componentes do universo matemático. Neste nível é feito o mapeamento dos objetos conceituais para representações geométricas.
- Universo de *implementação*, que é um conjunto de regras que especifica a implementação do modelo dentro de um ambiente computacional (Guptill,1991). É neste nível que acontece a codificação. Várias estruturas de dados podem ser implementadas para um mesmo modelo conceitual, baseado em considerações como desempenho, capacidade do equipamento, da massa de dados.

A Figura 3.1 ilustra os níveis de abstração relevantes para modelagem de dados geográficos, segundo a abordagem do paradigma dos quatro universos.

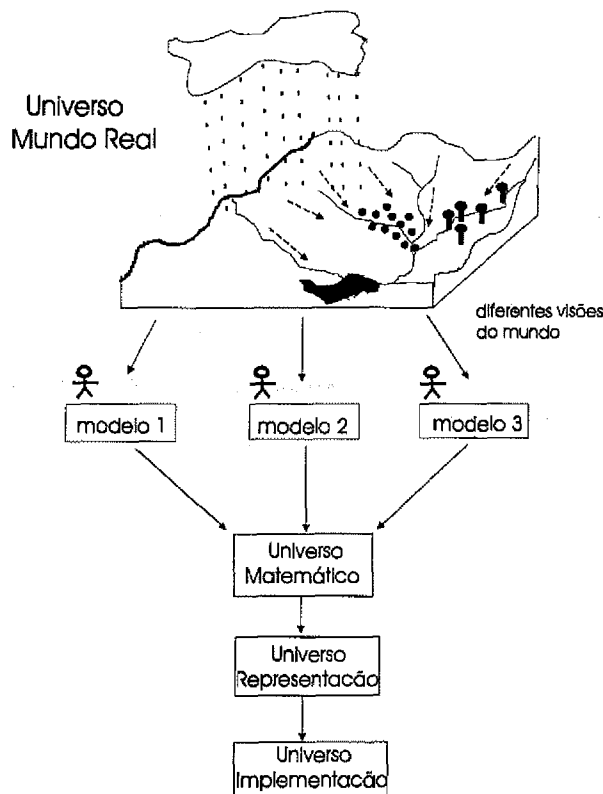


Fig. 3.1 - Níveis de abstração relevantes.

FONTE: adaptada de Laurini e Thompson, (1992),p.23

Uma consideração importante durante o processo de modelagem é que o modelo resultante não apenas define como uma variável geográfica será representada, mas também determina o conjunto de processos e análises que podem ser implementados a partir daquele modelo.

3.3 - UNIVERSO DO MUNDO REAL

Do universo do mundo real selecionam-se os objetos, as variáveis de interesse. Estes objetos se caracterizam através da variação de uma determinada grandeza física ou química. Esta variação pode ocorrer em relação ao espaço ou ao tempo. Por exemplo, ao se estudar o comportamento do uso do solo em uma determinada região (*variável de interesse*), posições diferentes na região, provavelmente possuirão culturas diferentes, como milho, soja, arroz, pastagem, etc (*variação espacial*). E em uma mesma posição, o uso do solo poderá sofrer alterações quando avaliado em épocas distintas (*variação temporal*).

3.3.1 - MODELAGEM AMBIENTAL

A modelagem ambiental é o desenvolvimento de modelos de estudo para processos ambientais. Uma característica comum nos dados tratados em modelagem ambiental é a presença do atributo espacial sempre associado a atributos temáticos.

Os dados espaciais extraídos do universo do mundo real e incluídos em modelos ambientais são derivados de dados disponíveis sobre topografia, meteorologia, propriedades dos solos, propriedades geológicas, cobertura da terra, uso da terra, hidrologia e qualidade da água, etc. Cada um destes tipos de dado tem características próprias quando usados em modelos ambientais.

Uma vez que não se pode medir uma variável espacialmente contínua em todas as posições, deve-se usar técnicas de aquisição de informações para capturar um número finito, mas representativo de valores, que descreva a variável de estudo. Os computadores disponíveis são máquinas finitas, discretas, que só podem armazenar valores com precisão finita, não permitindo o armazenamento ou a manipulação de duas

variáveis espacialmente contínuas, e ter como resultado uma terceira variável, também espacialmente contínua. Assim sendo, devido às limitações de aquisição e de manipulação em um ambiente computacional, a continuidade espacial presente em algumas variáveis ambientais requer discretização.

Para efeito de estudo estas variáveis são descritas inicialmente como um conjunto de valores medidos de forma amostral no universo do mundo real. As medidas podem ser feitas por níveis de medidas numéricos ou por níveis de medidas temáticos, conforme discutido na Seção 2.3.

Como os dados não podem ser armazenados em computadores nem adquiridos de forma contínua, um dos maiores problemas em usar dados espaciais em modelos ambientais é o não casamento entre a realidade espacialmente contínua, as formas de discretização usadas para coletar e armazenar amostras deste dados contínuos e a forma na qual estes dados devem ser usados no modelo.

Uma das abordagens para o tratamento de variações contínuas da natureza considera a variação como um conjunto infinito de estados ou observações. Como não se pode enumerar este conjunto infinito, concentra-se apenas em um subconjunto destas observações. As observações escolhidas dependem dos objetivos, dos interesses e principalmente das ferramentas de medidas disponíveis (Casti, 1989).

A pesquisa matemática de técnicas para solução de equações diferenciais contínuas tem produzido alguns métodos numéricos que são apropriados para o tratamento da continuidade no ambiente computacional. Estes métodos, denominados de métodos numéricos de diferença, baseiam-se em técnicas que permitem a simplificação de equações diferenciais complexas de forma que elas possam ser resolvidas por meios analíticos. Dentre estes métodos, dois estão sendo utilizados nas implementações computacionais de modelos ambientais, o *método de elementos finitos* e o *método das diferenças finitas*.

O método de soluções por *diferença finita* é o mais usado em modelos ambientais. Nele, o tempo e o espaço são discretizados em pequenos intervalos e uma equação diferencial é escrita para cada intervalo gerando-se assim um sistema de equações. O sistema de equações é então resolvido simultaneamente (Gerald e Wheatley, 1989).

O método de soluções por *elemento finito* é mais apropriado para problemas nos quais a área de estudo não pode ser facilmente quebrada em unidades retangulares simples ou são melhor tratadas como um conjunto de áreas homogêneas mas de formas irregulares.

Uma das características da tecnologia SIG é representar a informação espacial numericamente, o que contrasta com a forma analógica e espacializada dos mapas em papel. A necessidade em modelagem ambiental de ferramentas que descrevam e manipulem esta informação numérica de forma espacializada tem estimulado o desenvolvimento de áreas como *estatística espacial* e *álgebra de mapas* (Berry, 1993).

A *estatística espacial*¹ desenvolveu-se como uma extensão da estatística clássica com o objetivo de melhor caracterizar a distribuição espacial presente nos dados geográficos. A Figura 3.2 exemplifica como o recurso da estatística espacial dá uma visão mais precisa do comportamento da variável.

A Figura 3.2 mostra o mapeamento da densidade de microorganismos em uma região de um lago. Os valores usados podem ser obtidos através de análises em laboratório de amostras coletadas em algumas posições do lago. A plotagem em um sistema de coordenadas x,y é mostrada na parte superior esquerda, onde cada par (x,y) é a localização de cada amostra de densidade em um determinado período de tempo. Quando avaliado pela distribuição numérica, o atributo de localização (x,y) é desprezado, e a concentração média de microorganismos (430 ± 5.17) assumida como verdadeira para todo o lago, como se vê no gráfico inferior direito. Quando avaliado

¹A estatística espacial aplicada a dados geográficos é chamada de geoestatística.

pela *estatística espacial*, onde o atributo de localização é também considerado, tem-se uma descrição mais realista da distribuição de microorganismos no lago. Percebe-se, por exemplo, que a posição de maior e a de menor concentração de microorganismos está na região sul da área analisada.

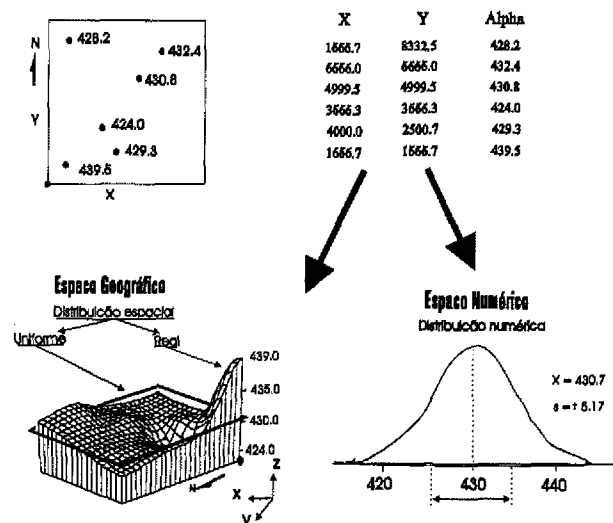


Fig. 3.2 Estatística espacial: Uma ferramenta de modelagem ambiental
 FONTE: Goodchild et al. (1993), p.59

A *álgebra de mapas*, por sua vez, também pode ser vista como uma extensão da álgebra tradicional aplicada a dados geográficos. Na álgebra de mapas o comportamento espacial de um variável ambiental sobre uma região geográfica é tratado como um operando da álgebra.

3.4 - UNIVERSO MATEMÁTICO

Neste nível de abstração busca-se conceituar e definir formalmente os objetos de estudo, selecionados do universo do mundo real. O resultado deste nível de abstração é a conceituação humana da realidade descrita na forma matemática. Normalmente só as propriedades consideradas relevantes são incorporadas ao modelo.

Quando o modelo assume a forma matemática, com entidades simbólicas satisfazendo um conjunto particular de axiomas e teoremas, este modelo é denominado *modelo matemático*.

3.4.1 - CLASSES DE DADOS GEOGRÁFICOS: CAMPO E OBJETO

No universo matemático, classificam-se os dados geográficos em duas grandes classes (Goodchild, 1992):

A primeira classe, denominada de *campo geográfico* ou *geo-campo*, é formada por variáveis cujos valores são definidos em todas as posições da região geográfica de estudo, ou seja, são variáveis espacialmente contínuas. Variáveis como temperatura, topografia, teor de minerais, reflectância e emitância pertencem a esta classe de dados geográficos.

A segunda classe, denominada de *objetos geográficos* ou *geo-objetos*, é formada por variáveis que apresentam descontinuidade espacial e podem ser individualizadas, ou seja, estas variáveis não são definidas em todas as posições da região geográfica de estudo. Variáveis como rios, determinada cultura em uma imagem ou lotes em um mapa cadastral pertencem a esta classe de dados geográficos.

Variáveis cujo valor pode estar associado com uma posição geográfica (x,y) , são denominadas genericamente de *variáveis espaciais*. Este trabalho aborda somente a modelagem e manipulação de *variáveis espaciais* da classe *geo-campo*.

3.4.2 - DEFINIÇÃO DE CAMPO

Goodchild (1992) sugere que o elemento fundamental de informação geográfica é uma tupla do tipo:

$$T = \langle x, y, z_1, z_2, z_3, \dots, z_n \rangle$$

Esta tupla T descreve o valor de n variáveis espaciais na posição (x,y) . Como x e y determinam posições no espaço, e o espaço é contínuo, o número de tuplas é infinito. Usando o conceito de tupla, pode-se afirmar que *uma variável espacial da classe campo pode ser descrita como um conjunto infinito de tuplas $\langle x,y,z \rangle$, tal que a componente z de cada tupla contém o valor da variável espacial na posição x,y (Goodchild, 1992).*

Usando uma abordagem mais formal, Câmara Neto(1995) define um *geo-campo* (f) como uma entidade matemática que representa a distribuição de uma variável espacialmente contínua sobre uma região geográfica (R).

$$f = [R, V, \lambda]$$

R : região geográfica definindo o domínio espacial

V : contra-domínio de valores da variável na região geográfica

λ : mapeamento entre pontos (x,y) em R e valores em V ($\lambda : R \rightarrow V$)

O conceito de geo-campo pode ser especializado em função da variável geográfica que se esta modelando. Câmara (1995) sugere três especializações para geo-campo.

- *Temático*: usado para modelar variáveis cujos valores foram obtidos através de escalas de medidas temáticas², binária, nominal e ordinal. A função λ caracteriza um *geo-campo temático* quando define um mapeamento $\lambda : R \rightarrow V$, tal que V é um conjunto finito enumerável. Os elementos de V definem os *temas* de um geo-campo temático (p.ex. um mapa de solos é caracterizado pelo conjunto de temas {latosolo roxo, litosolo, podzólico vermelho, ...}).
- *Numérico*: usado para modelar variáveis cujos valores foram obtidos através de escalas de medidas numéricas³, intervalo e razão. A função λ caracteriza um *geo-campo numérico* quando define um mapeamento $\lambda : R \rightarrow V$, tal que V é o conjunto dos reais. Dados de altimetria, temperatura, pressão são exemplos de dados geográficos que podem ser modelados conceitualmente como *geo-campo*.
- *Imagem*: usado para modelar variáveis cujos valores foram obtidos através de discretização da resposta recebida por sensor remoto (passivo ou ativo) de uma área da superfície terrestre. A função λ caracteriza um *geo-campo*

²A Seção 2.3 descreve os níveis de medidas temáticas e numéricos

³A Seção 2.3 descreve os níveis de medidas temáticas e numéricos

imagem quando define um mapeamento $\lambda : R \rightarrow V$, tal que V é o conjunto dos naturais. Esta classe é uma especialização da classe *geo-campo numérico*.

Uma característica particular dos campos físicos é o grau extremamente alto de autocorrelação espacial (Cliff e Ord, 1981). Esta característica permite inferir que posições próximas têm chance de possuírem características similares, compensando assim o fato de não se medir o fenômeno contínuo em todas as posições, dado que elas são infinitas.

O conhecimento da autocorrelação espacial fornece pouca informação de quão rapidamente os valores mudam entre posições conhecidas. Para manipular e representar campos em modelos matemáticos é necessário encontrar alguma forma de ligar a variação contínua do campo, como ela é observada na natureza, com as amostras individuais armazenadas no computador, representando os valores do fenômeno em certas posições. Esta ligação entre a realidade contínua e sua representação no computador é obtida:

- dividindo-se o espaço contínuo em posições discretas, onde valores discretos podem ser medidos e registrados;
- estabelecendo-se regras para interpolar valores desconhecidos entre estas posições, de forma que seja possível derivar a continuidade presente no campo a partir de sua representação discreta.

3.5 - UNIVERSO DE REPRESENTAÇÃO

Neste nível de abstração, concentra-se em como representar geometricamente no ambiente computacional as entidades de interesse selecionadas do universo do mundo real e definidas formalmente no universo matemático. Neste contexto são feitas as associações entre definições matemáticas das entidades e as possíveis representações geométricas para as mesmas.

3.5.1 - REPRESENTAÇÕES GEOMÉTRICAS

O processo de desenvolvimento de modelos para grandezas físicas ou químicas da realidade envolve a discretização da variação espacial destas grandezas com o objetivo de permitir a sua descrição, a sua representação e a sua manipulação em um ambiente computacional.

A “plotagem” do conjunto de amostras de uma variável ambiental modelada conceitualmente como geo-campo em um gráfico tri-dimensional x,y,z , onde z é o valor da variável e (x,y) sua posição geográfica, gera uma superfície⁴ que representa geometricamente o comportamento espacial da variável em estudo.

Para Goodchild (1992) as entidades reais modeladas conceitualmente como geo-campo podem ser representadas geometricamente como: *grade regular de células, regiões contíguas, grade triangular, isolinhas, grade regular de pontos e amostras irregulares*. Cada representação geométrica incorpora características próprias ao se representar a realidade, e estas características determinam as manipulações matemáticas possíveis sobre o modelo.

- ***grade regular de células***: a representação *grade regular de células* de uma variável geo-campo particiona a região geográfica de estudo, domínio espacial, em uma matriz de células, e atribui a cada célula o valor médio de todas as posições da variável dentro da célula. Como resultado desta estratégia, os valores atribuídos às células vizinhas podem ser diferentes, causando mudanças abruptas entre células. Dados adquiridos por satélites de sensoriamento remoto normalmente usam a representação *grade regular de células*. A geografia de uma *grade regular de células* pode ser descrita completamente pela largura, pelo comprimento da célula, pela coordenada de origem da grade, pelo número de linhas e colunas da grade.

⁴No contexto deste trabalho, esta superfície será denominada *superfície da variável*.

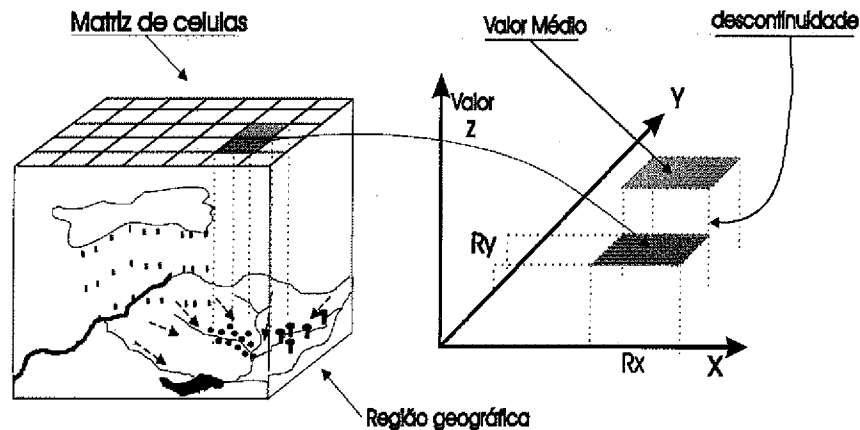


Fig. 3.3 - Representação *grade regular de células* de uma variável geo-campo

- **regiões contíguas:** a representação *regiões contíguas* particiona o domínio espacial de uma variável geo-campo em regiões contíguas e com formas normalmente irregulares, atribuindo a cada região o valor médio estimado de todas as posições da variável dentro daquela região. Os limites de cada região, representada por um polígono, podem ser definidos por características similares da própria variável, como por exemplo tipos de cobertura vegetal, tipos de solos, etc, ou por características da área de estudo que independam da variável, como linhas divisórias, de municípios, de bacias hidrográficas e etc. Em bancos de dados ambientais a representação *regiões contíguas* é normalmente usada para geo-campos temáticos, tipos de solos, tipos de vegetação, etc. Para que estes dados possam ser manipulados, as regiões poligonais são associadas a tabelas contendo informações numéricas e descritivas sobre as mesmas.

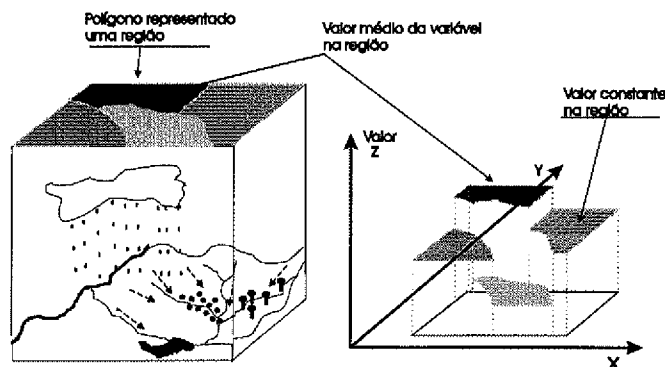


Fig. 3.4 - Representação *regiões contíguas* de uma variável geo-campo

- ***grade triangular*⁵ (TIN)**: particiona o espaço da área de estudo em regiões triangulares. A correspondência entre uma variável campo e sua representação *grade triangular* é determinada por um conjunto de pontos críticos amostrados na variável de estudo e seus valores usados são como vértices dos triângulos na representação. A determinação do valor da variável em qualquer posição é obtida por uma função linear, que tem como parâmetros os valores dos vértices do triângulo que contém a posição desejada. No caso da representação *grade triangular*, não ocorrem mudanças abruptas entre regiões triangulares, o que ocorre são mudanças de declividade entre regiões.

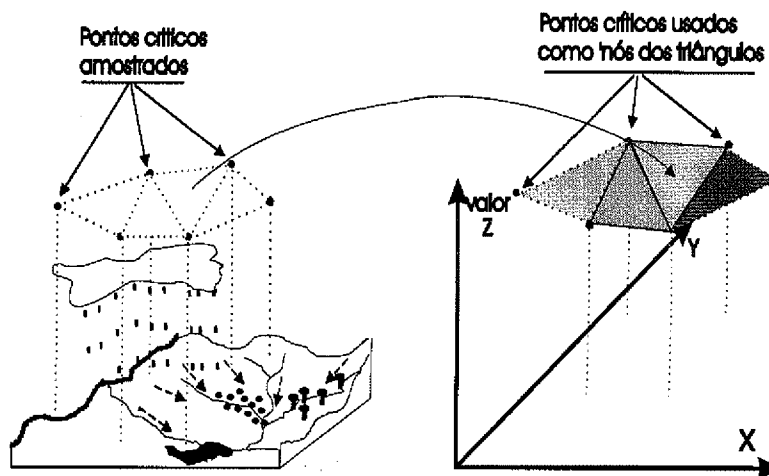


Fig. 3.5 - Representação *grade triangular* de uma variável geo-campo

- ***grade regular de pontos***: a representação *grade regular de pontos* de uma variável geo-campo guarda os valores da variável nos pontos de interseção de uma grade retangular imaginária sobre a área de estudo. A representatividade destes valores em relação ao comportamento do fenômeno de estudo depende da taxa de amostragem destes valores. Por exemplo, o espaçamento entre as amostras deve ser no mínimo duas vezes menor que a maior variação espacial⁶ presente no fenômeno em estudo. A geografia de uma *grade regular*

⁵TIN, Triangulated Irrregular Network

⁶Teorema da amostragem (Nyquist)

de pontos pode ser descrita especificando-se o espaçamento (x,y) , a origem, e a orientação da grade.

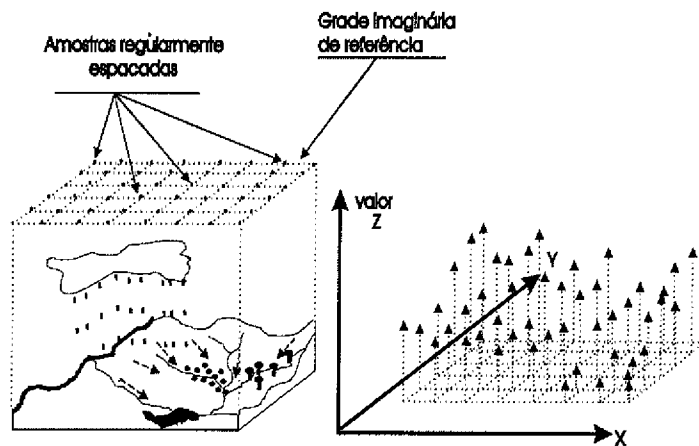


Fig. 3.6 - Representação *grade regular de pontos* de uma variável geo-campo

- **amostras irregulares:** A representação *amostras irregulares* descreve uma variável geo-campo através de um conjunto de valores medidos em posições irregularmente espaçadas dentro da região geográfica de estudo. Estas posições podem ser definidas em função do comportamento do processo em estudo e ser representativas de suas vizinhanças, como por exemplo, locais cuidadosamente selecionados para coleta de índices pluviométricos. Em alguns casos estas posições são definidas por fatores que não dependem do processo em estudo e podem ser menos representativas deste processo, como por exemplo, coleta de dados atmosféricos em aeroportos.

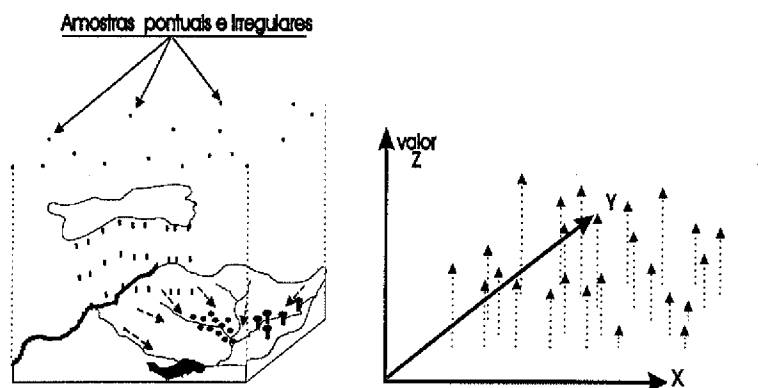


Fig. 3.7 - Representação *amostras irregulares* de uma variável geo-campo

- **isolinhas**: nas representações anteriores partia-se da posição e determinava-se o valor. A estratégia da representação *isolinha* parte do valor e determinam-se todas as posições dentro da região geográfica para aquele valor da variável. Desta forma constrói-se uma sequência de linhas ordenada por valor, onde cada linha representa posições adjacentes de mesmo valor. Na representação *isolinha* os valores são definidos somente ao longo das linhas. Diferente das representações anteriores, onde os elementos espaciais são pontos e áreas, o modelo *isolinha* usa linhas como elementos espaciais. Como a *grade triangular*, a representação *isolinha* particiona o espaço em regiões sobre a qual o valor do fenômeno varia. Diferente da *grade triangular*, a variação entre linhas não é linear nem definida de forma clara. A única consideração que se pode fazer é que o valor da variável, a menos de algumas exceções, se mantém dentro da faixa de valores determinada pelas linhas adjacentes. Finalmente, a exemplo da *grade triangular*, como as isolinhas devem ser medidas por níveis de medidas numéricos, a representação *isolinha* não deve ser usada para representar dados gerados por sistemas de medidas temáticas.

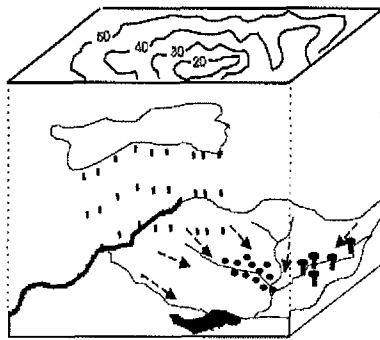


Fig. 3.8 - Representação *isolinhas* de uma variável geo-campo

3.5.2 - CARACTERÍSTICAS DAS REPRESENTAÇÕES GEOMÉTRICAS

As seis representações geométricas de variáveis da classe geo-campo, representam duas formas distintas de explorar a autocorrelação espacial existente nestas variáveis (Goodchild, 1992). As representações geométricas denominados *por partes* consideram que localizações próximas são similares, enquanto que as representações

denominadas de *amostras pontuais* exploram o fato de que os valores de localizações vizinhas podem ser estimados a partir dos valores de certas localizações.

Das 6 representações descritas acima, 3 podem ser classificadas como representações por partes: *grade regular de células*, *regiões contíguas* e *grade triangular*, pois estas representações dividem a área geográfica (domínio espacial) da variável geo-campo em regiões contíguas. As variações no valor do geo-campo dentro de cada região são descritas por uma função matemática, tendo como variáveis as coordenadas espaciais (x,y). Para as representações *grade regular de células* e *regiões contíguas* a função matemática é uma constante para cada região. mas para a representação *grade triangular* a função mais usada é uma função linear⁷. Desta forma, ao se representar a variável em um gráfico tri dimensional, as representações *grade regular de células* e por *regiões contíguas* geram uma superfície com degraus de descontinuidade entre as regiões horizontais, enquanto a representação *grade triangular* gera uma superfície onde os planos das regiões triangulares possuem declividades diferentes, mas sem degraus de descontinuidade entre os limiares das regiões. A principal característica das representações *por partes* é que o valor ou função atribuída a cada região é representativo do valor médio ou tendência geral da região. Como não se pode representar precisamente a variável em todos os pontos individualmente, pressupõe-se que uma integração sobre os valores da região resultaria no valor ou função que se está atribuindo a região.

Usando uma abordagem diferente, as representações geométricas denominadas de *amostras pontuais* - *isolinhas*, *grade regular de pontos* e *amostras irregulares* - procuram representar a variável a partir de um conjunto de medidas pontuais em diferentes posições da região geográfica de interesse. Nenhum valor é atribuído a posições que não foram amostradas e, exceto no caso de *isolinhas*, nenhuma informação é fornecida sobre a variação do valor entre amostras. Como no caso anterior, supõe-se que a variação entre amostras pode ser descrita por uma função matemática;

⁷Funções não lineares, que podem ser usadas para descrever a variação dentro de uma região triangular, não têm recebido muita atenção até o momento na área de SIG(Goodchild,1993).

contudo, neste caso, a forma desta função nem sempre é definida claramente. Normalmente são usadas funções lineares, embora outras formas sejam também comuns, como por exemplo, funções de maior ordem que representam de forma mais exata uma superfície em uma janela 3x3 de uma *grade regular de pontos*. A função de interpolação usada depende da aplicação, mas, em geral, a precisão com que um valor pode ser estimado depende da resolução do modelo.

Vale ressaltar que a representação geométrica *isolinha* é, na verdade, uma combinação das duas classes de representações descritas acima. Além de se encaixar na classe *amostras pontuais*, a representação *isolinha* permite inferir informações sobre a variação entre linhas com base na concentração destas linhas, sendo esta uma característica da classe de representações *por partes*.

Em resumo, pode-se afirmar que as representações *por partes* fornecem uma descrição geométrica de forma genérica de uma variável geo-campo, enquanto as representações *por amostras pontuais* fornecem dados precisos em um número limitado de posições.

Em termos de representação de superfície, é útil considerar as representações anteriormente descritas em 3 grupos distintos. Representações *por partes constantes*: *grade regular de células e regiões contíguas*, que representam as variáveis por superfícies horizontais, com quebra vertical nos limiares dos pixels ou das regiões poligonais. Representações *de superfície*: *grade triangular e isolinhas*, que representam as variáveis por superfícies contínuas com valores variando dentro das regiões e com continuidade nos limiares. Representações *pontuais*: *grade regular de pontos e amostras irregulares*, que não representam de forma direta uma superfície, necessitando de interpolações para descreverem uma superfície.

3.5.3 - RELAÇÃO ENTRE UNIVERSO MATEMÁTICO E UNIVERSO DE REPRESENTAÇÃO

Diversas questões devem ser consideradas na análise de quão bem as representações computacionais descrevem a realidade.

A primeira questão independe das características dos modelos de representações e está relacionada com a qualidade⁸ dos dados disponíveis. Dados com erros interferem na fidelidade das representações. Estes erros surgem principalmente durante o processo de aquisição, podem ser aleatórios ou sistemáticos e estão associados a acurácia das localizações e dos valores medidos.

Mesmo assumindo que as medidas são acuradas, os modelos continuam sendo representações simplificadas da realidade. Estimar a acurácia com que o modelo discreto representa uma variável espacialmente contínua torna-se uma tarefa difícil, dado que não se pode comparar diretamente os dois.

A terceira questão, que afeta a relação realidade/representação, é a escala e a frequência de amostragem com a qual o fenômeno está sendo capturado. Segundo o teorema da amostragem (Nyquist)⁹, para se recuperar uma informação, é necessário que a taxa de amostragem seja no mínimo duas vezes maior que a maior variação presente no dado. Ou seja, para uma grade regular com espaçamento de 30 metros (taxa de amostragem) não se consegue recuperar facilmente objetos menores que 60 metros (maior variação).

Outra questão importante que afeta a relação realidade/representação é a capacidade que cada representação geométrica possui para reproduzir fielmente as variações presentes nos processos ambientais. Representações *por partes constantes* substituem a variação local por uma média local, suavizando a variabilidade. Representações de *superfície* representam a variabilidade através de mudanças de declividade, permitindo melhor fidelidade da taxa de variação. O usuário deve, em função da aplicação, determinar como usar e interpretar estes modelos de representações geométricas da realidade. Por exemplo, se pequenas variações no valor da variável espacial são importantes, é essencial que a representação escolhida seja capaz de representar esta variação. Em uma situação oposta, quando as pequenas variações no valor da variável geográfica levam a resultados inconcludentes, a utilização de um

⁸O Capítulo 6 do Burrough, 1987 apresenta uma boa discussão sobre qualidade de dados.

modelo que suaviza estas variações de altas frequências enquanto mantém uma boa representação das baixas frequências pode ser a solução.

Algumas conversões entre representações podem também introduzir artefatos, tais como faces triangulares sem declividade em *grade triangular* gerada a partir de representação *isolinha* (isto ocorre quando os três nós do triângulo são obtidos de uma mesma isolinha). Pode também acontecer de cumes e vales serem eliminados (isto ocorre quando faces triangulares cobrem cumes e vales que não foram representados pelas isolinhas). Estes dois exemplos de artefatos são críticos em modelos hidrológicos por causarem mudanças na direção de fluxos.

Em alguns casos a fidelidade do modelo em representar a variável desejada é uma questão de escolha subjetiva: este modelo ajusta-se com a versão de realidade esperada pelo modelador?

3.6 - UNIVERSO DE IMPLEMENTAÇÃO

O conceito de universo de implementação como um dos níveis do processo de modelagem tem por objetivo separar o universo de representação das particularidades das estruturas de dados utilizadas na implementação computacional de representações geométricas. Neste nível trabalha-se com estruturas de dados matriciais e vetoriais e com formas eficientes de acesso aos dados.

3.6.1 - RELAÇÃO UNIVERSO DE REPRESENTAÇÃO/ UNIVERSO DE IMPLEMENTAÇÃO

Devido a um mapeamento complexo entre representações geométricas e estruturas de dados, frequentemente as duas são confundidas (Goodchild,1992). Se se considerar somente duas grandes categorias de estruturas de dados - matriz e vetor, este mapeamento pode ser visto como:

⁹Gomes e Velho (1994) apresenta uma boa discussão sobre a teoria da amostragem.

**TABELA 3.1 - MAPEAMENTO DE REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA PARA
ESTRUTURA DE DADOS**

<i>Representação</i>	<i>Estrutura de dados</i>
Grade regular de células	matriz
Regiões contíguas	vetor (arco, nó,polígono)
grade triangular	vetor (arco, nó,polígono)
Isolinhas	vetor(linhas)
Grade regular de pontos	vetor ou matriz
Amostras irregulares	vetor

Então, um conjunto de dados armazenado em estrutura vetorial, pode representar uma realidade geográfica em vários modelos de representações diferentes. Para que um conjunto de dados geográficos presentes em um banco seja usado de forma apropriada, é importante saber qual representação geométrica foi usada no estágio de modelagem dos dados no banco de dados.

3.7 - CONCLUSÕES

Todas as representações geométricas descritas anteriormente podem ser utilizadas para descrever em maior ou menor detalhe os geo-campos numéricos. Já os geo-campos temáticos, por serem formados por um conjunto finito de classes ou temas, não utilizam as representações de superfície (*grade triangular* e *isolinhas*).

A seguir, na Tabela 3.2 é apresentado uma correspondência entre os universos do modelo apresentado neste Capítulo.

TABELA 3.2 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS UNIVERSOS DO MODELO

<i>Universo do mundo real</i>	<i>Universo conceitual</i>	<i>Universo de representação</i>	<i>Universo de implementação</i>
Tipos de solos, Cobertura Vegetal, etc	Geo-campo (Temático)	Regiões Contíguas, Grade Regular de Células, amostras irregulares, Grade Regular de pontos	Estruturas de dados Vetor/Matriz (arco, nó, polígono, linhas)
Altimetria, Temperatura, Reflectância	Geo-campo (Numérico)	Grade Regular de Células, Regiões Contíguas, Grade Regular de pontos, Grade triangular, Isolinhas, amostras irregulares	Estruturas de dados Vetor/Matriz (arco, nó, polígono, linhas)

CAPÍTULO 4

MANIPULAÇÃO: ANÁLISE E SÍNTESE

Normalmente, utilizam-se formalismos matemáticos bem definidos para expressar o desenvolvimento de um modelo e com isto provar a sua validade. No entanto, no caso de dados geográficos não existe ainda uma maneira formal de expressar as transformações e manipulações necessárias na etapa de análise dos dados geográficos. Como consequência desta carência de uma linguagem formal, a ser usada para expressar os procedimentos de manipulação sobre os dados disponíveis, torna-se difícil estimar a validade dos resultados obtidos a partir destes dados.

Em uma análise da literatura disponível sobre os esforços no sentido de suprir esta carência da tecnologia de geoprocessamento, identificam-se duas abordagens distintas: de um lado existem tentativas que procuram formalizar a integração *dado geográfico/modelo matemático* no ambiente computacional (Goodchild,1992; Kemp,1992; Câmara,1995), de outro lado existem trabalhos que procuram caracterizar os principais operadores sobre dados geográficos, mas sem formalismo matemático (Burrough,1987; Berry,1987; Tomlin,1990). Parece existir também um consenso entre alguns autores de que é desejável e possível separar as operações matemáticas que podem ser aplicadas sobre geo-campos, das suas possíveis formas de representação no ambiente computacional.

Este Capítulo procura mostrar as questões envolvidas na manipulação de um conjunto de dados geográficos. Mostra inicialmente a necessidade de conversões entre as várias representações geográficas e apresenta um conjunto de regras possíveis de serem utilizadas nestas conversões. A seguir, apresenta a álgebra de campos, formada por um conjunto de operadores usados na manipulação de geo-campos. Finalmente discute as formas de interação do usuário com as ferramentas de manipulação.

4.1 - MANIPULANDO CAMPOS

Como se afirmou anteriormente, em um ambiente computacional não é possível adicionar dois geo-campos e se ter como resultado um terceiro geo-campo, devido à continuidade espacial inerente ao conceito de geo-campo e às limitações presentes nos computadores, como máquinas finitas e discretas. A manipulação matemática de geo-campos em computador passa então pela redução de cada geo-campo a um conjunto finito de amostras numéricas. Esta é a função dos modelos de dados espaciais usados para representar variáveis contínuas em modelagem ambiental, conforme discutido anteriormente.

Outra consideração é que, para se manipularem duas variáveis geo-campo simultaneamente, as posições com valores dos geo-campos devem corresponder. Ou seja, para se adicionar uma variável geo-campo "A" com uma variável geo-campo "B", todas as posições discretizadas do geo-campo "A" devem ser somadas com o valor da mesma posição no geo-campo "B". O problema é que em geo-campos descritos por representações geométricas diferentes, as posições com registro de valores normalmente não correspondem. Isto exige que, antes de qualquer operação sobre variáveis geo-campos, seja verificado se as representações geométricas são espacialmente equivalentes e, se não forem, é necessário convertê-las.

Duas variáveis geo-campo são *espacialmente equivalentes* quando a geografia de todos os elementos espaciais corresponde exatamente e completamente (Kemp,1992). Tal condição é encontrada por exemplo, em duas imagens registradas, de mesma resolução e de igual dimensão. Isto é, se A e B são representações espacialmente equivalentes, elas têm mesma resolução, mesma origem, mesma orientação e mesma projeção. A comparação entre geo-campos só pode ser feita entre representações espacialmente equivalentes.

A Figura 4.1 ilustra uma operação de adição e uma operação de atribuição entre geo-campos cujos modelos de representação não são espacialmente equivalentes. Na operação de adição $B + C$, como a representação geométrica do geo-

campo B, *grade regular de pontos*, não é espacialmente equivalente à representação geométrica do campo C, *amostras irregulares*, será necessário, antes de se efetuar a operação, converter a representação do geo-campo B para a representação *amostras irregulares* ou converter a representação do geo-campo C para a representação *grade regular de pontos*.

A representação geométrica do geo-campo “soma” resultante da adição será *grade regular de pontos*, se a representação do geo-campo C foi convertida para *grade regular de pontos* antes da adição, ou será *amostras irregulares*, se a representação do geo-campo B foi convertida para *amostras irregulares* antes da adição. Mas a operação de atribuição especifica que a representação geométrica do resultado deve ser *isolinhas* (variável A). Neste caso uma nova conversão de representação deve acontecer.

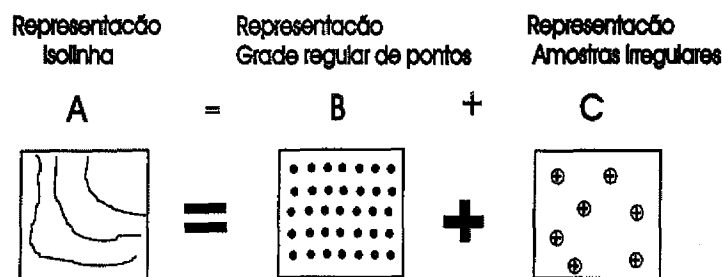


Fig. 4.1 - Operação entre geo-campos de representações diferentes

As Seções 4.2.1 e 4.2.2 mostram que é possível prescrever um conjunto de regras de conversão de representações para campos numéricos e para campos temáticos, de maneira que as operações entre campos armazenados em diferentes representações possam ser executadas. A Seção 4.2.3 apresenta um conjunto de regras para conversão, onde o princípio para definição das regras de conversão é a densidade de amostras da representação.

A manipulação algébrica entre variáveis espaciais, como as variáveis do tipo campo, pode ser vista como uma extensão da manipulação algébrica de variáveis de tipos tradicionais como inteiro, ponto flutuante, etc, onde o atributo posição espacial

deve ser considerado. Por causa do atributo espacial, uma simples operação matemática pode se tornar uma operação espacial complexa, envolvendo a conversão de uma determinada representação para outra.

Estas conversões são feitas para:

- permitir que o lado direito da equação seja computado,
- para que o resultado seja atribuído ao lado esquerdo da equação.

4.2 - CONVERSÕES ENTRE REPRESENTAÇÕES GEOMÉTRICAS

Os Bancos de Dados Geográficos, frequentemente, existem antes da tarefa de modelagem ambiental ser concebida, e o que normalmente acontece é que um modelo ambiental é projetado de forma a usar os dados que estão disponíveis. Estes dados podem estar em representações que não são *espacialmente equivalentes*, e isto leva à necessidade de uma série de conversões, de forma a compatibilizá-los para manipulação.

O processo de conversão entre representações geométricas de uma variável espacial pode ser conceitualizado em dois estágios. O primeiro estágio, que inclui a *interpolação espacial*, procura recuperar a continuidade espacial da variável a partir de sua representação discreta presente no modelo de dados disponível. O segundo estágio, que inclui a *amostragem*, deriva uma nova representação a partir dos valores gerados pela interpolação espacial. Juntos, *interpolação espacial* e *amostragem*, podem ser chamados de *reamostragem*.

Kemp (1992) define interpolação espacial como um conjunto de regras para obtenção de um geo-campo completo a partir de uma representação geométrica; e amostragem como um conjunto de regras para obtenção de uma representação geométrica a partir de um geo-campo completo.

Ao se efetuar conversão entre representações geométricas é necessário considerar o tipo de dado envolvido. Geo-campos numéricos são provenientes de níveis

de medidas de escala contínua, números reais, e com isto permite que, no processo de conversão, novos valores dentro dos limites dos dados originais sejam gerados. Geo-campos temáticos são provenientes de níveis de medidas de escalas discretas, conjunto finito de temas, e não se pode criar novos temas no processo de conversão. Esta diferença sugere que a abordagem para conversão de representações com geo-campos temáticos seja diferente da abordagem para conversão de representações com geo-campos numéricos.

A seguir é descrita de forma sucinta uma abordagem possível para a conversão entre representações geométricas de geo-campos numéricos e de geo-campos temáticos. O objetivo desta descrição é mostrar que é possível prescrever regras de conversão entre representações. Com a evolução da tecnologia de Geoprocessamento, as linguagens para manipulação de geo-campos deverão incorporar regras que permitam que, em operações como a exemplificada na Seção 4.1, as conversões necessárias sejam automáticas.

A descrição a seguir é dividida em duas partes:

- Como cada representação origem pode ser interpolada;
- Como amostrar valores para gerar a representação destino.

4.2.1 - CONVERSÃO ENTRE REPRESENTAÇÕES DE CAMPOS NUMÉRICOS

a) Interpolação

O processo de interpolação pode ser entendido como o mecanismo de se encontrar o valor de um campo em um número tão grande quanto se queira de posições a partir de uma de suas possíveis representações discretas. Como cada representação possui suas particularidades, técnicas diferentes são usadas na determinação dos valores de um geo-campo em todas as suas posições desejadas.

- *Grade Triangular*: As próprias funções lineares que descrevem a representação grade triangular podem ser usadas na interpolação.

- *Grade Regular de Células e Regiões Contíguas*: Quando se manipulam geo-campos numéricos em representações Grade Regular de Células e Regiões Conectadas, pode-se usar um conjunto de interpoladores clássicos para determinar um valor intermediário entre as regiões adjacentes, tendo-se assim uma estimativa mais precisa da realidade. Estes interpoladores incluem a simples média ponderada e funções matemáticas de maior ordem, como interpoladores bicúbicos e fractais (Felgueiras e Goodchild, 1995).
- *Isolinhas*: Muitos algoritmos para estimar valores entre isolinhas estão disponíveis (Weibel e Heller, 1991). Conceitualmente, o valor de um ponto posicionado entre duas linhas de uma representação isolinha pode ser determinado por uma interpolação linear ponderada pelas distâncias do ponto as duas linhas adjacentes a ele.

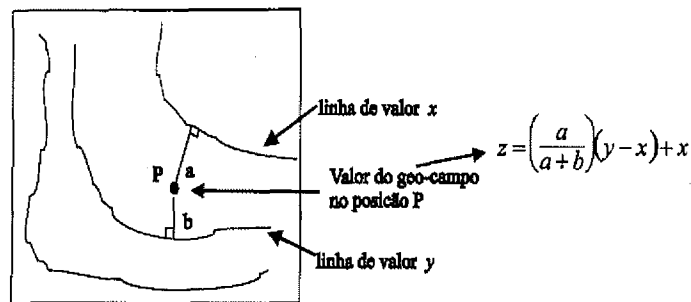


Fig. 4.2 - Exemplo de interpolação na representação *isolinha*

- *Grade regular de pontos e amostras irregulares*: Existe um grande número de técnicas¹ para determinar valores de um campo numérico a partir de amostras pontuais. Pode-se citar algumas como ponderação por distância, Kriging², splines³, interpolação polinomial e mínimos quadrados. Mas nenhuma técnica é superior às outras para todas as aplicações, e a seleção da mais apropriada para conversão entre representações computacionais depende do tipo dos dados, do grau de precisão desejado, do esforço computacional disponível, da experiência e conhecimento dos dados pelo modelador.

¹Estas técnicas estão descritas em diversos livros sobre o assunto; entre eles podemos citar o Capítulo 8 do Burrough (1987)

²Kriging- Técnica de interpolação que utiliza aspectos estocásticos da variação espacial.

³splines - Curva matemática usada para representar variação espacial de forma suave Burrough (1987)

b) Amostragem

- *Modelos por partes constantes*: na conversão para representações por partes constantes, a interpolação na representação origem deve gerar um conjunto de valores para cada região da representação destino, de forma a permitir o cálculo de uma média representativa para a região.
- *Grade Triangular*: a amostragem para gerar a representação grade triangular de um campo requer a seleção de pontos críticos da variável espacial. Quando o número de amostras disponível é representativo, a seleção de pontos críticos pode ser feita automaticamente (Kumler,1992). Um número representativo de amostras só depende do estágio de interpolação.
- *Isolinhas*: a amostragem para gerar a representação isolinha de um campo requer somente um conjunto denso de valores de forma a permitir precisão das isolinhas geradas.
- *amostras irregulares*: a geração de uma representação por pontos irregulares é a mais direta, pois amostram-se pontos em algumas posições da representação origem.

4.2.2 - CONVERSÃO ENTRE REPRESENTAÇÕES DE CAMPOS TEMÁTICOS

a) Interpolação

O princípio usado na interpolação de dados temáticos é o de que as características de uma posição de valor desconhecido são similares às características da posição de valor conhecido mais próxima.

A interpolação de campos temáticos a partir de representações por partes constantes (grade regular de células e regiões contíguas) retorna o valor da região origem que contém a posição desejada.

Para representações pontuais, o algoritmo de interpolação mais usado é o de polígonos de Thiessen (Burrough,1987). Este algoritmo divide a área de estudo em regiões contendo amostras. O que caracteriza uma região de Thiessen é que a distância de qualquer ponto da região à amostra é menor do que a distância deste mesmo ponto a qualquer outra amostra fora da região. A Figura 4.3 ilustra a definição de polígonos de Thiessen.

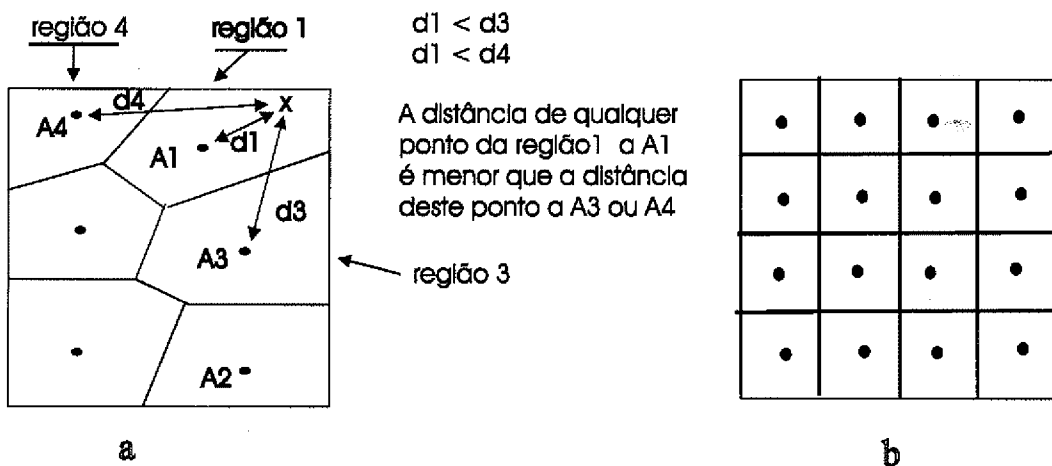


Fig. 4.3 - Polígonos de Thiessen: a) Amostras irregulares b) Amostras regulares
FONTE: adaptada de Burrough(1987),p. 148

b) Amostragem

O estágio de amostragem, na conversão de representação entre campos temáticos, deve ser baseado em um conjunto de regras que gerem um modelo fiel a variação do fenômeno. As regras mais usadas são:

- a classe que cobre maior parte da região no dado fonte torna-se o valor da região destino;
- Regras de precedência. Se várias classes da representação origem ocupam uma mesma região destino, a de maior precedência é atribuída à região. A precedência neste caso é definida pelo usuário com base na metodologia usada na sua pesquisa.

4.2.3 - REGRAS PARA CONVERSÃO

Um dos desafios para pesquisas envolvendo linguagens para manipulação de campos é como incorporar à linguagem regras automáticas de conversões, de forma que, a partir de uma rotina escrita na linguagem, não sejam necessárias interações do usuário durante sua execução. Algumas propostas aparecem na literatura (Kemp,1992; Smith,1992), mas nenhuma com o objetivo de serem regras definitivas, pois todos reconhecem que em alguns casos, dados específicos requerem tratamentos específicos.

Intuitivamente, é possível desenvolver um conjunto de regras para conversão de geo-campos. Como a estrutura mais conveniente para operações espaciais e matemáticas é a grade regular de pontos, uma regra simples poderia ser converter todas as variáveis para sua representação grade regular de pontos e em seguida operar sobre estes geo-campos; esta é a abordagem da álgebra de mapas proposta por Tomlin(1992). Entretanto, toda conversão de representação geralmente causa perda de informação, devido às aproximações causadas pelas interpolações e amostragens. Com o objetivo de minimizar estas possíveis perdas de informação, pode-se optar por converter as representações para a representação do dado de maior densidade na equação, onde *densidade é definida como o número de elementos espaciais por unidade de área*. Usando a abordagem de densidade, Kemp(1992) sugere as seguintes regras:

- Se as representações das variáveis presentes na operação são espacialmente equivalentes, não se fazem conversões;
- Se uma das representações presentes na operação for TIN ou isolinhas, usa-se a representação da variável que receberá o resultado da operação, variável destino;
- Se as representações das variáveis presentes na operação são grades regulares espacialmente equivalentes, usa-se a representação da grade mais densa;

- Se a representação da variável destino for espacialmente idêntica à representação de uma variável da operação, use a representação da variável destino;
- Se a representação de uma das variáveis da operação for TIN ou isolinhas e a outra uma grade regular, usa-se a representação grade regular;
- Se as representações das variáveis presentes na operação possuírem densidades próximas, usa-se a representação da variável destino;
- Usa-se a estrutura mais densa.

A Figura 4.4 mostra, usando o operador soma como exemplo, uma série de possíveis combinações entre representações de variáveis geo-campo e, usando a abordagem de densidade, indica através do símbolo • qual a representação mais indicada para realizar a operação.

Por exemplo, no primeiro conjunto de combinações tem-se como entrada uma representação *grade regular de pontos* e uma representação *amostras irregulares*. Considerando cinco possíveis representações para o resultado da operação tem-se:

- Representação de saída é uma *grade regular de células* com densidade próxima a de uma *grade regular de pontos* presente na entrada. \Rightarrow Converte as representações de entrada, *grade regular de pontos* e *amostras irregulares* para a representação de saída, *grade regular de células*, e a seguir efetua a operação.
- Representação de saída é uma *grade regular de células* de densidade menor que a da *grade regular de pontos* de entrada. \Rightarrow Converte a representação de entrada *amostras irregulares* para a representação *grade regular de pontos*, ou a representação *grade regular de pontos* para *amostras irregulares*, efetua a operação, e a seguir converte o resultado da operação para a representação de saída desejada, *grade regular de células*.

- Representação de saída é uma *grade regular de células* de densidade maior do que as representações de entrada; *grade regular, amostras irregulares*. \Rightarrow Converte as representações de entrada, *grade regular de pontos* e *amostras irregulares* para a representação de saída, *grade regular de células*, e a seguir efetua a operação.
- Representação de saída é *regiões contíguas*. \Rightarrow Converte a representação de entrada *amostras irregulares* para a representação *grade regular de pontos*, ou a representação *grade regular de pontos* para *amostras irregulares*, efetua a operação, e a seguir converte o resultado da operação para a representação de saída desejada, *regiões contíguas*.
- Representação de saída é uma *grade regular de pontos* com densidade próxima a de uma *grade regular de pontos* presente na entrada. \Rightarrow Converte a representação de entrada *amostras irregulares* para a representação *grade regular de pontos*, e a seguir efetua a operação.

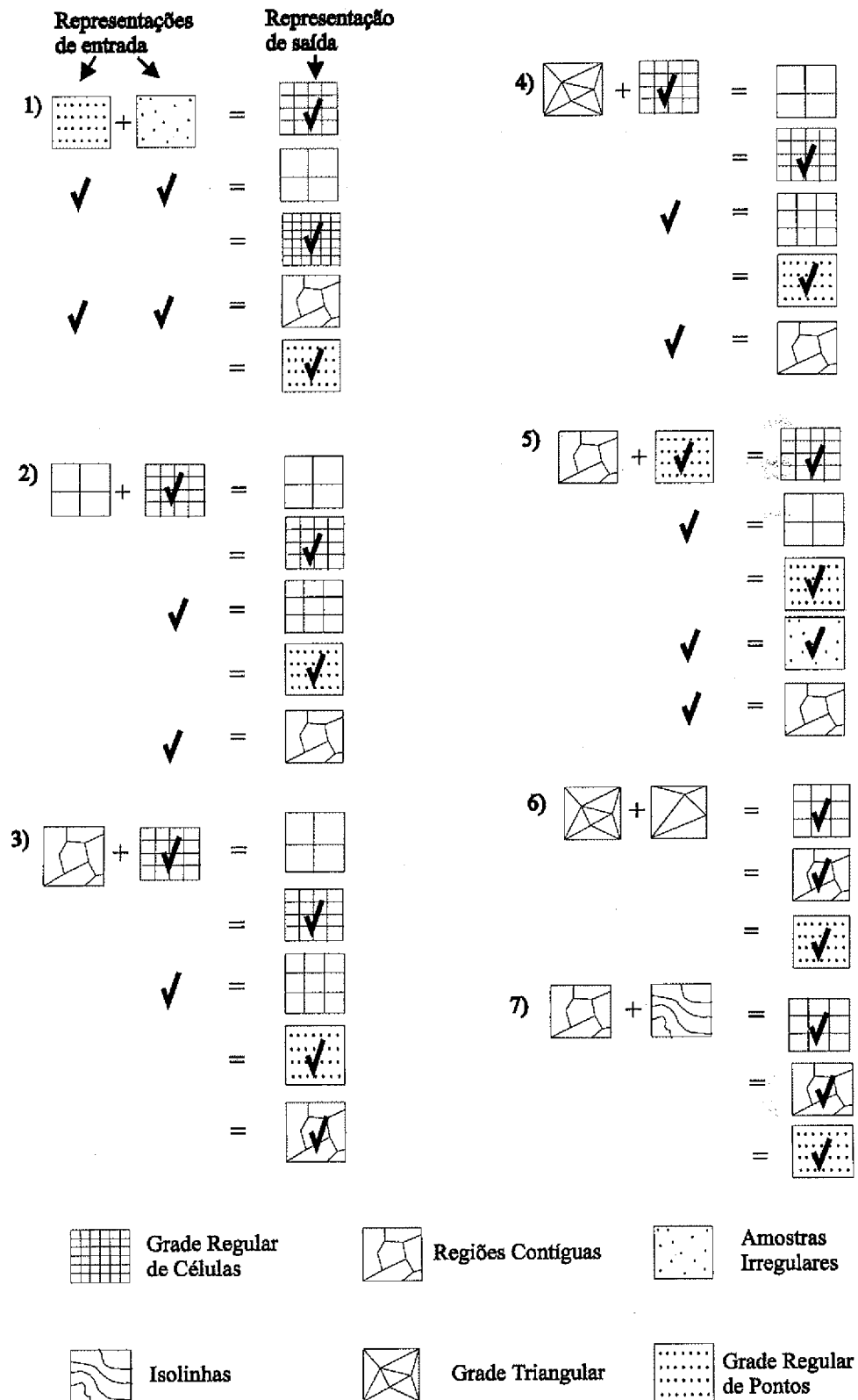


Fig. 4.4 - Operações entre representações diferentes
 FONTE: Kemp (1992), p. 71

4.3 - ÁLGEBRA DE CAMPOS

O conceito de *álgebra de mapas* ou *álgebra de campos* pode ser visto como uma extensão da álgebra tradicional, com um conjunto de operadores onde as variáveis manipuladas são campos geográficos (Berry,1993). Estes operadores manipulam um, dois ou mais geo-campos, sendo que cada geo-campo descreve um atributo diferente ou um mesmo atributo com datas de aquisição diferentes.

4.3.1 - CLASSES DE OPERAÇÕES SOBRE CAMPOS

As operações sobre geo-campos podem ser classificadas como: *pontuais*, *zonais* e de *vizinhança* (Tomlin,1990). A Figura 4.5 ilustra esta classificação, que é baseada na forma *como os valores dos atributos nos geo-campos origem são obtidos para processamento*, identificando-se se o valor atribuído a uma determinada posição geográfica do geo-campo destino é função dos valores na mesma posição geográfica nos geo-campos origem, dos valores de uma *região* geográfica nos geo-campos origem que contém a posição ou dos valores de uma *vizinhança* da posição nos geo-campos origem.

Neste trabalho serão denominados de geo-campos origem as variáveis do tipo campo usadas nas operações. O geo-campo resultante da operação será denominado de geo-campo destino.

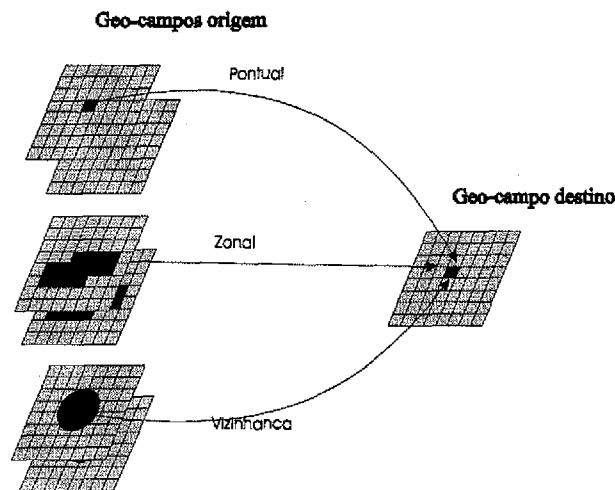


Fig. 4.5 - Classes de operações geográficas

4.3.1.1 - OPERAÇÕES PONTUAIS

Nas transformações *pontuais*, o valor resultante em cada posição geográfica do geo-campo destino depende somente dos valores na mesma posição geográfica dos geo-campos origem. Ou seja, não há influência dos valores dos atributos das posições vizinhas no geo-campo origem sobre o resultado atribuído à mesma posição geográfica do geo-campo destino.

Cada posição da região geográfica de estudo pode estar associada a um ou mais valores de atributos, sendo que cada atributo vem de geo-campos diferentes. A Figura 4.6 ilustra as transformações pontuais que operam sobre um geo-campo ou mais geo-campos origem.

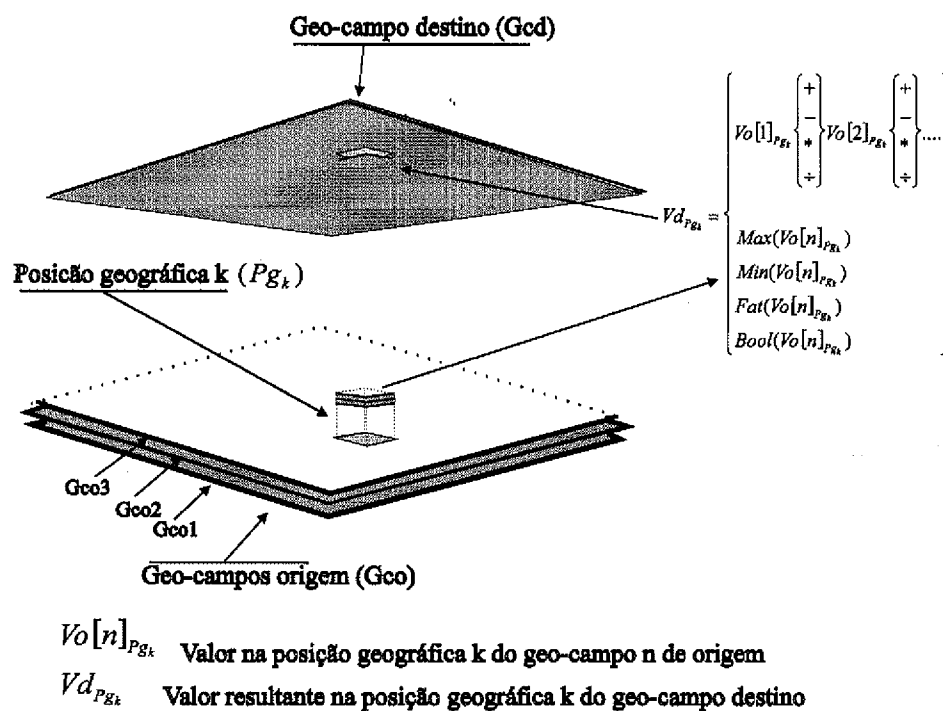


Fig. 4.6 - Operações Pontuais

FONTE: adaptada de Tomlin(1990), p. 72.

A seguir, nas Tabelas 4.1 e 4.2, são listadas algumas das operações pontuais mais comuns segundo Burrough (1987), Berry (1987) e Tomlin (1990).

TABELA 4.1 - OPERAÇÕES PONTUAIS SOBRE GEO-CAMPOS

OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA																											
	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor resultante em cada posição geográfica é a soma, a subtração, a divisão ou a multiplicação:</p> <ul style="list-style-type: none"> do valor na posição geográfica correspondente no geo-campo origem com um valor constante. $Vd_{pg_k} = Vo_{pg_k} + \alpha$ $Vd_{pg_k} = Vo_{pg_k} - \alpha$ $Vd_{pg_k} = Vo_{pg_k} \times \alpha$ $Vd_{pg_k} = Vo_{pg_k} \div \alpha$ dos valores de dois atributos associados à posição geográfica correspondente nos geo-campos origem.																											
SOMA																												
SUBTRAÇÃO																												
DIVISÃO																												
MULTIPLICAÇÃO	<p>Exemplo:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>Geo1</p> <table border="1"> <tr><td>0.35</td><td>0.35</td><td>0.20</td></tr> <tr><td>0.20</td><td>0.20</td><td>0.20</td></tr> <tr><td>0.20</td><td>0.20</td><td>0.20</td></tr> </table> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Geo2</p> <table border="1"> <tr><td>5.0</td><td>3.0</td><td>8.0</td></tr> <tr><td>5.0</td><td>10.0</td><td>15.0</td></tr> <tr><td>10.0</td><td>12.0</td><td>20.0</td></tr> </table> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>Ged</p> <table border="1"> <tr><td>0.55</td><td>0.68</td><td>0.33</td></tr> <tr><td>0.40</td><td>0.30</td><td>0.27</td></tr> <tr><td>0.30</td><td>0.25</td><td>0.25</td></tr> </table> </div> <div style="margin-left: 20px;"> $Vd_{pg_k} = Vo[1]_{pg_k} + \frac{1}{Vo[2]_{pg_k}}$ </div> </div>	0.35	0.35	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	5.0	3.0	8.0	5.0	10.0	15.0	10.0	12.0	20.0	0.55	0.68	0.33	0.40	0.30	0.27	0.30	0.25	0.25
0.35	0.35	0.20																										
0.20	0.20	0.20																										
0.20	0.20	0.20																										
5.0	3.0	8.0																										
5.0	10.0	15.0																										
10.0	12.0	20.0																										
0.55	0.68	0.33																										
0.40	0.30	0.27																										
0.30	0.25	0.25																										

Fig. 4.7 -Operação matemática pontual

FONTE: adaptada de Câmara (1995)

Tanto os geo-campos origens (*Geo*) quanto o geo-campo destino (*Ged*) devem ser geo-campos numéricos

Tabela 4.1 - Continuação

OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA
MÉDIA	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor resultante em cada posição geográfica é a média aritmética dos valores dos atributos na mesma posição geográfica dos geo-campos origem. Se necessário o valor do atributo em cada geo-campo pode ser ponderado por um peso. Esta operação só é aplicada sobre geo-campos numéricos:</p> $Vd_{pgk} = \sum_{i=0}^n \frac{Vo[n]_{pgk} \times VP_n}{n}$ <p>onde:</p> <p>n = número de geo-campos de origem</p> <p>VP_n = Valor de ponderação do geo-campo n</p> <p>Exemplo: Determinação do valor médio de dados geográficos adquiridos em datas diferentes (temperatura, pressão, etc).</p>
MÁXIMO/MÍNIMO	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor resultante em cada posição geográfica é o maior valor ou o menor valor do atributo na mesma posição geográfica dos geo-campos origem. Esta operação só é aplicada sobre geo-campos numéricos:</p> $Vd_{pgk} = \text{Max}(VO[1]_{pgk}, \dots, VO[n]_{pgk})$ $Vd_{pgk} = \text{Min}(VO[1]_{pgk}, \dots, VO[n]_{pgk})$

Tabela 4.1 - Conclusão

OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA
<p>FUNÇÕES TRIGONOMÉTRICAS</p>	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor em cada posição geográfica é o resultado da aplicação de uma função trigonométrica sobre o valor do atributo na mesma posição geográfica do geo-campo origem. Esta operação só é aplicada sobre geo-campos numéricos:</p> $Vd_{Pg_k} = \Gamma(Vo_{Pg_k})$ <p>onde: $\Gamma = \text{sen}(), \text{cos}(), \text{tang}(), \text{arctan}() \dots$</p>
<p>COMBINAÇÃO BOOLEANA (CRUZAMENTO)</p>	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor em cada posição geográfica é o resultado da aplicação de um operador da lógica booleana (AND,OR,NOT,XOR) sobre os valores dos atributos na mesma posição geográfica dos geo-campos origem. Estas operações são aplicadas sobre geo-campos temáticos</p> $Vd_{Pg_k} = Vo[1]_{Pg_k} \text{ OR } Vo[2]_{Pg_k}$ $Vd_{Pg_k} = Vo[1]_{Pg_k} \text{ AND } Vo[2]_{Pg_k}$ $Vd_{Pg_k} = Vo[1]_{Pg_k} \text{ NOT } Vo[2]_{Pg_k}$ $Vd_{Pg_k} = Vo[1]_{Pg_k} \text{ XOR } Vo[2]_{Pg_k}$

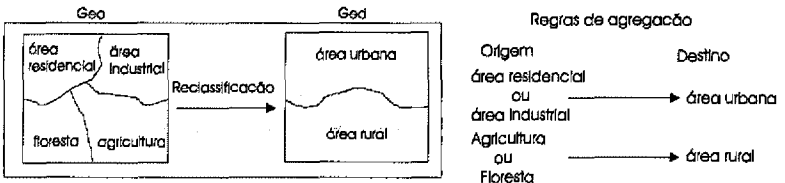
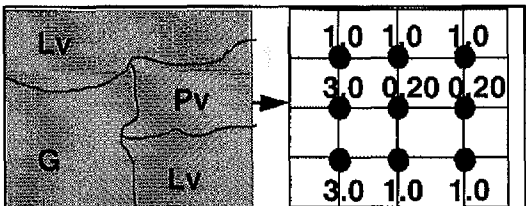
TABELA 4.2 - OPERAÇÕES PONTUAIS DE TRANSFORMAÇÃO

OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA
FATIAMENTO	<p>Divide a faixa de valores de um geo-campo origem em certo número de intervalos de valores e gera um geo-campo destino onde o valor em cada posição geográfica será:</p> $se\ Vo_{p_{gk}} \in [V_{1i \rightarrow 1s}) \rightarrow Vd_{p_{gk}} = T_1$ $se\ Vo_{p_{gk}} \in [V_{2i \rightarrow 2s}) \rightarrow Vd_{p_{gk}} = T_2$ <p>.....</p> $se\ Vo_{p_{gk}} \in [V_{ni \rightarrow ns}] \rightarrow Vd_{p_{gk}} = T_n$ <p>onde:</p> <p>T_n = valor atribuido a posições geográficas do geo-campo destino, se o valor do atributo no geo-campo origem pertencer ao intervalo n</p> <p>$V_{ni \rightarrow ns}$ = valores do intervalo n, sendo ni o limite inferior e ns o limite superior</p> <p>O operador de fatiamento tem como parâmetro de entrada um geo-campo numérico. O geo-campo resultante pode ser numérico ou temático. Nos sistemas comerciais, este operador é usado para <u>transformar</u> um geo-campo numérico em um geo-campo temático.</p> <p>Exemplo: A Figura 4.8 ilustra uma operação de fatiamento que transforma um geo-campo numérico de declividade em um geo-campo temático de classes de declividade, T_n. Os intervalos em graus, $V_{ni \rightarrow ns}$, usado pela operação são: { (0°-9°) → “baixa”; (10°-19°) → “média”; (acima de 20°) → “alta” }.</p> <div data-bbox="603 1503 1246 1764"> </div>

Fig. 4.8 -Operação pontual de Fatiamento

FONTE: adaptada de Câmara (1995)

Tabela 4.2 - Conclusão

OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA
RECLASSIFICAÇÃO	<p>Agrega temas distintos de um geo-campo temático, segundo regras definidas pelo usuário.</p> <p>Exemplo: Com o objetivo de enfatizar o limite entre as áreas urbana e rural, um geo-campo temático de uso da terra com quatro classes pode ser reclassificado, gerando um novo geo-campo temático com somente duas classes.</p>  <p>Fig. 4.9 -Operação pontual de Reclassificação</p>
PONDERAÇÃO	<p>Transforma um geo-campo temático em um geo-campo numérico. Este operador pode ser usado para integrar¹ dados temáticos para manipulação posterior.</p> <p>Exemplo: Conversão de um geo-campo temático de tipos de solo em um geo-campo numérico ponderado de solos. As regras de ponderação neste caso foram:</p> <p>{ (Lv → 1.0), (Pv → 2.0), (G → 3.0) }</p>  <p>Fig. 4.10 -Operação pontual de Ponderação</p>

¹A metodologia ZEE apresentada no Capítulo 7, usa o operador de ponderação para integrar dados temáticos.

4.3.1.2 - OPERAÇÕES DE VIZINHANÇA

Em muitos processos naturais, o valor do fenômeno observado em uma determinada posição é influenciado pelas condições de sua vizinhança. Normalmente conceitua-se vizinhança como aquela área circular próxima a uma determinada posição. Mas para propósitos de análise ambiental, vizinhança deve ser definida como *uma área adjacente a uma determinada localização geográfica cujas condições afetam o processo em estudo naquela posição*.

A extensão e o formato da vizinhança são determinados pelo processo em estudo. Se o processo for isotrópico, a vizinhança pode ser expressa por um círculo em torno do ponto de referência, cujo raio é igual à distância de influência dos vizinhos sobre o ponto de referência. Por outro lado, se o processo for anisotrópico, a vizinhança se estenderá na direção do efeito, caracterizando um formato irregular de vizinhança.

As operações de transformações por vizinhança operam sobre um geo-campo origem e uma máscara que delimita a vizinhança. Durante o processamento, a máscara se desloca sobre o geo-campo origem, e a cada passo de deslocamento aplica-se uma operação de vizinhança sobre os valores do atributo presente no geo-campo origem e delimitados pela máscara.

No ambiente computacional, o formato de máscara mais usado é o de uma matriz de células. O efeito de direção, neste caso, pode ser obtido atribuindo-se pesos diferentes para cada célula da matriz. Filtragem espacial de geo-campos usando representação imagem e cálculo de declividades a partir de um geo-campo de altimetria são exemplos de operações de vizinhança que usam máscara no formato matriz de células.

A Figura 4.11 ilustra o princípio da operação de vizinhança usando uma máscara retangular 3x3.

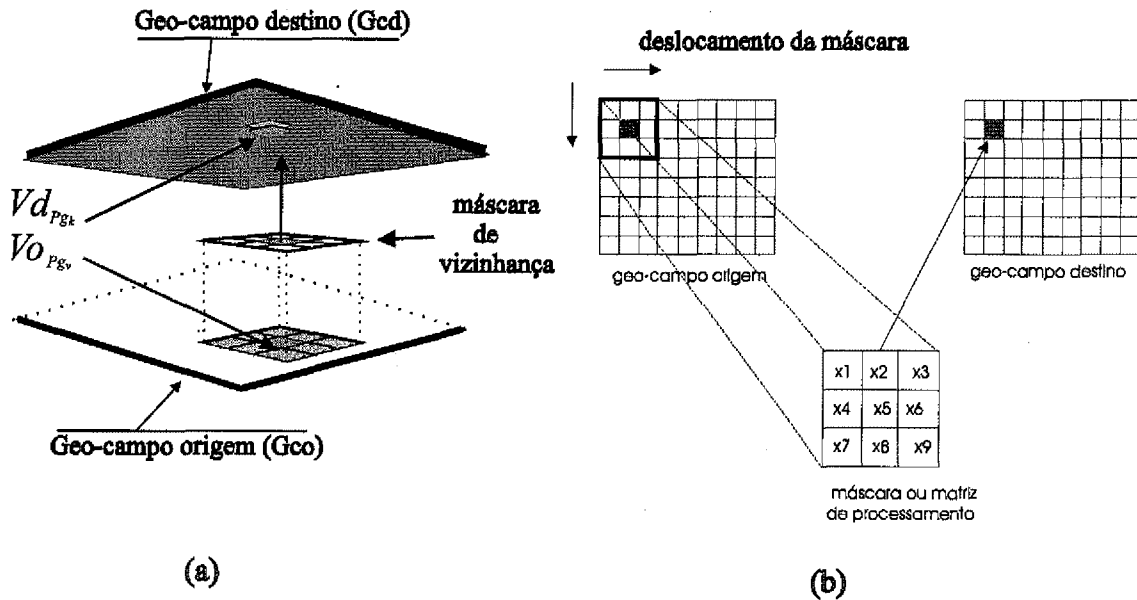


Fig. 4.11 - (a) Operação de vizinhança (b) Implementação computacional mais usada em Operações de vizinhança.

FONTE: (a) adaptada de Tomlin (1990), p. 97

(b) adaptada de Crosta (1992), p. 79

A seguir na Tabela 4.2 são listadas algumas das operações de vizinhança mais comuns segundo Burrough (1987), Berry (1987), Tomlin (1990), e Aronoff (1989).

TABELA 4.3 - OPERAÇÕES DE VIZINHANÇA

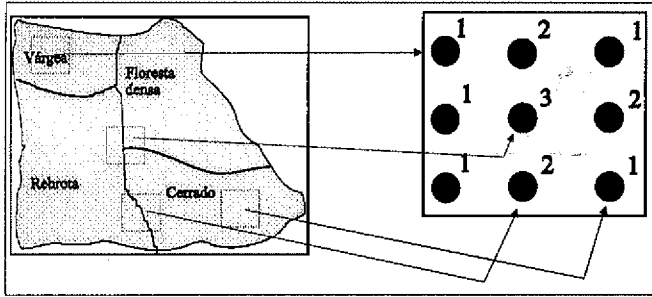
OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA																																																																								
MINORIA	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor em cada posição geográfica é igual ao valor de menor frequência entre os valores do atributo na vizinhança daquela posição no geo-campo origem.</p> <p>Tanto o geo-campo origem quanto o geo-campo destino são numéricos</p> <p>Exemplo: A Figura abaixo ilustra a operação de minoria aplicada sobre um geo-campo numérico, usando como vizinhança uma máscara 3x3. Quando mais de um valor acontece com a mesma frequência, o resultado é não definido (ND)²</p> <div style="text-align: center;"> <p>Geo</p> <table> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>3</td><td>2</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>4</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td></tr> </table> <p>Ged</p> <table> <tr><td>ND</td><td>2</td><td>ND</td><td>ND</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>ND</td><td>4</td><td>ND</td><td>ND</td><td>ND</td><td>ND</td></tr> <tr><td>ND</td><td>4</td><td>ND</td><td>ND</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>ND</td><td>ND</td><td>ND</td><td>ND</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>ND</td><td>ND</td><td>ND</td><td>ND</td></tr> <tr><td>ND</td><td>2</td><td>ND</td><td>ND</td><td>ND</td><td>ND</td></tr> </table> </div>	0	1	1	0	3	0	0	3	3	2	0	0	4	0	3	2	4	2	0	2	2	1	4	2	0	0	0	4	4	0	0	2	0	0	0	3	ND	2	ND	ND	2	3	ND	4	ND	ND	ND	ND	ND	4	ND	ND	1	2	4	ND	ND	ND	ND	2	3	2	ND	ND	ND	ND	ND	2	ND	ND	ND	ND
0	1	1	0	3	0																																																																				
0	3	3	2	0	0																																																																				
4	0	3	2	4	2																																																																				
0	2	2	1	4	2																																																																				
0	0	0	4	4	0																																																																				
0	2	0	0	0	3																																																																				
ND	2	ND	ND	2	3																																																																				
ND	4	ND	ND	ND	ND																																																																				
ND	4	ND	ND	1	2																																																																				
4	ND	ND	ND	ND	2																																																																				
3	2	ND	ND	ND	ND																																																																				
ND	2	ND	ND	ND	ND																																																																				
DECLIVIDADE SOBRE UMA REGIÃO GEOGRÁFICA	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor em cada posição geográfica é a declividade, máxima inclinação de um plano tangente à superfície no ponto, calculada a partir de um geo-campo origem contendo valores de altimetria. O algoritmo mais usado para estimar a declividade usa métodos numéricos por diferenças finitas³ com uma máscara retangular 3x3, como a ilustrada na Figura 4.11b (Burrough,1987)</p> <p>Tanto o geo-campo origem quanto o geo-campo destino, são geo-campos numéricos.</p>																																																																								

²Esta é a abordagem adotada pelo sistema Arc/Info da ESRI, usando o conceito de nodata (1991)³Ver referência na Seção 3.2.1

Tabela 4.3 - Continuação

OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA																																																																								
INTERVALO	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor em cada posição geográfica é igual ao resultado da expressão $Vomax_{vizinhanca} - Vomin_{vizinhanca}$ aplicada sobre os valores do atributo no geo-campo origem que pertencem à vizinhança da posição geográfica avaliada.</p> <p>onde:</p> <p>$Vomax_{vizinhanca}$ Valor máximo na vizinhança do geo-campo origem.</p> <p>$Vomin_{vizinhanca}$ Valor mínimo na vizinhança do geo-campo origem.</p> <p>Tanto o geo-campo origem quanto o geo-campo destino, são geo-campos numéricos</p> <p>Exemplo: A Figura abaixo ilustra a operação de intervalo usando como vizinhança uma máscara 3x3</p> <div> <div> <p>Geo</p> <table> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>3</td><td>2</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>4</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td></tr> </table> </div> <div> <p>Ged</p> <table> <tr><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td></tr> </table> </div> </div> <p>Fig. 4.13 - Operação Intervalo de uma vizinhança</p>	0	1	1	0	3	0	0	3	3	2	0	0	4	0	3	2	4	2	0	2	2	1	4	2	0	0	0	4	4	0	0	2	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	4	4	4	4	3	2	4	4	4	4
0	1	1	0	3	0																																																																				
0	3	3	2	0	0																																																																				
4	0	3	2	4	2																																																																				
0	2	2	1	4	2																																																																				
0	0	0	4	4	0																																																																				
0	2	0	0	0	3																																																																				
3	3	3	3	3	3																																																																				
4	4	3	4	4	4																																																																				
4	4	3	4	4	4																																																																				
4	4	4	4	4	4																																																																				
3	2	4	4	4	4																																																																				
3	2	4	4	4	4																																																																				
FILTRAGEM ESPACIAL	<p>Operação usada principalmente sobre geo-campos numéricos na representação grade regular de células (imagens de sensoriamento remoto) para realçar determinadas feições lineares, direcionais, de bordas ou padrões de textura. A vizinhança usada em filtragem espacial é também uma máscara retangular. Para obter o efeito desejado (realçar determinadas feições ou textura), cada célula da máscara pode ser ponderada por um peso diferente (Richards, 1986).</p>																																																																								

Tabela 4.3 - Conclusão

OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA
DIVERSIDADE	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor resultante em cada posição geográfica é igual à diversidade de valores, número de valores diferentes do atributo, na vizinhança daquela posição no geo-campo origem.</p> <p>Exemplo: A Figura abaixo mostra a operação de diversidade aplicada sobre um geo-campo temático de cobertura vegetal. O geo-campo resultante com a diversidade de cobertura vegetal é numérico. No exemplo, a vizinhança usada foi retangular, e ilustra apenas algumas amostras. Uma operação completa envolve o deslocamento da máscara de vizinhança sobre toda a região geográfica do geo-campo origem. O passo de deslocamento depende da resolução do geo-campo.</p> <p>Esta operação é normalmente aplicada sobre um geo-campo temático. Pode eventualmente ser aplicada sobre um geo-campo imagem, mas não é aplicada sobre geo-campos numéricos. O geo-campo resultante é sempre um geo-campo numérico.</p>  <p>Fig. 4.14 - Operação Diversidade de uma vizinhança</p>

4.3.1.3 - OPERAÇÕES ZONAIS

Uma região é um conjunto de posições geográficas com características similares ou delimitadas pelo homem. Por exemplo, num mapa de solos, cada tipo de solo delimita uma região, ao passo que num mapa de divisão política de municípios, os limites territoriais de cada município delimitam uma região.

No processamento por *região* o valor de cada posição geográfica do geo-campo destino depende do valor do atributo em todas as posições geográficas que compõem a região no geo-campo origem. As transformações zonais são utilizadas para agregar, nas posições geográficas do geo-campo destino, uma das características de toda a região no geo-campo origem. Por exemplo, em um geo-campo resultante de uma transformação zonal, posições geográficas individuais de uma mesma região passam a conter a média, ou a variância, ou o valor de maior frequência, de toda a região.

As operações de transformações zonais ou por região operam sobre um geo-campo origem e um conjunto de regiões delimitadas por polígonos na forma matricial ou vetorial. Diferente das transformações de vizinhança, onde cada posição geográfica possui sua própria vizinhança representada por uma máscara que se desloca sobre os dados, nas transformações zonais as regiões são estáticas, ou seja, não se deslocam sobre a região geográfica de estudo.

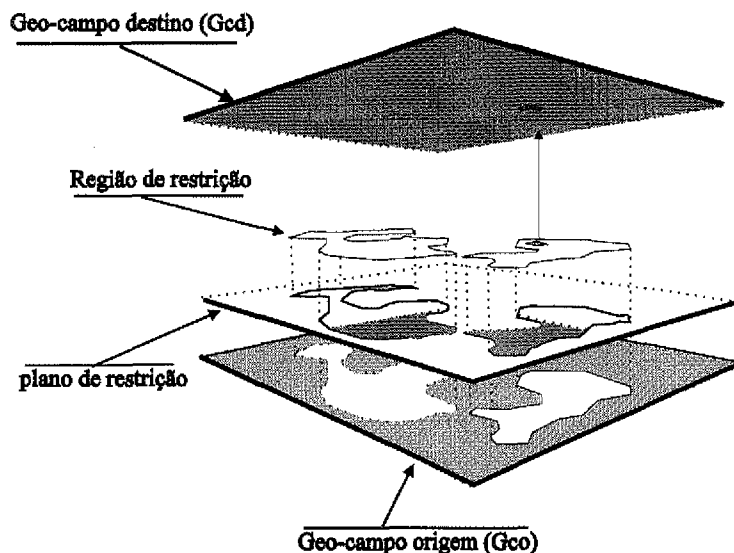


Fig. 4.15 - Exemplo de operação zonal

FONTE: adaptada de Tomlin(1990), p. 155.

A seguir, na Tabela 4.4 são listadas algumas das operações zonais mais comuns, segundo Burrough (1987), Berry (1987) e Tomlin (1990).

TABELA 4.4 - OPERAÇÕES ZONAIS

OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA
MÁXIMO ZONAL MÍNIMO ZONAL	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor resultante em todas as posições geográficas que compõem uma região é igual ao maior valor ou ao menor valor do atributo encontrado na mesma região sobre o geo-campo origem.</p> <p>Considere-se, por exemplo, a operação MÁXIMO ZONAL, onde o geo-campo origem é a declividade da área de estudo e as regiões, zonas, são definidas por um geo-campo temático de tipos de solo.</p> <p><i>Tipos de solos (restrição)</i></p> <p><i>Declividade em graus (Entrada)</i></p> <p><i>Geo</i></p> <p><i>Declividade máxima em cada região</i></p> <p><i>Ged</i></p>

Fig. 4.16 - Máximo zonal

FONTE: adaptada de Câmara (1995)

Tabela 4.4 - Continuação

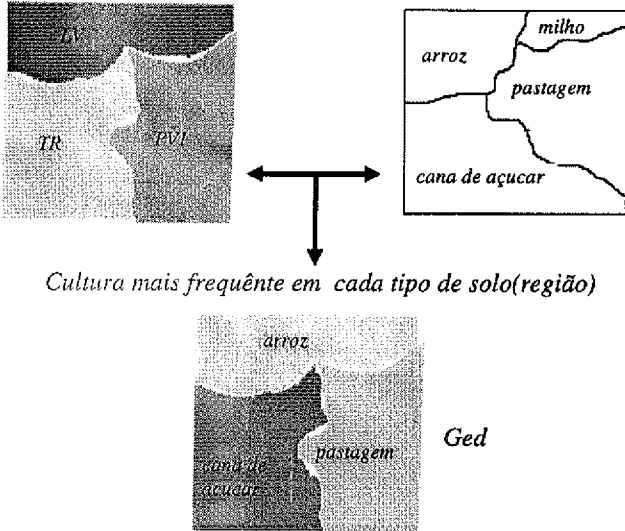
OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA
MAIORIA ZONAL	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor em todas as posições geográficas dentro de uma região é igual ao valor de maior frequência encontrado na mesma região sobre o geo-campo origem.</p> <p>Considere-se, por exemplo, a operação MAIORIA ZONAL, onde o geo-campo origem é um geo-campo temático de uso da terra, e as regiões, zonas, são definidas por um geo-campo temático de tipos de solo. O tema de uso da terra de maior área dentro de uma região preencherá todo o espaço da região no geo-campo resultante.</p> <p>Caso o geo-campo origem seja numérico, o geo-campo destino também será numérico.</p> <p><i>Tipos de solos (restrição)</i></p>  <p><i>Uso da terra (Entrada)</i></p> <p><i>Cultura mais freqüente em cada tipo de solo(região)</i></p> <p>Fig. 4.17 - Operação de Maioria zonal</p>

Tabela 4.4 - Conclusão

OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA																								
MÉDIA ZONAL	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor resultante em todas as posições geográficas que compõem uma região é igual à média aritmética dos valores do atributo nas mesmas posições geográficas no geo-campo origem.</p> $Vd_{p_{gr}} = \sum_{i=0}^n \frac{Vo_{p_{gr}}}{n}$ <p>Exemplo: Ver Capítulo 7, exemplo de uso.</p>																								
DIVERSIDADE ZONAL	<p>Gera um geo-campo destino onde o valor resultante em todas as posições geográficas que compõem uma região é igual a diversidade de valores da região (número de valores diferentes do atributo) no geo-campo origem.</p> <p>Exemplo: Seja um geo-campo representando uso do solo no estado de São Paulo. Se se considera a divisão política dos municípios do estado como regiões distintas e contarmos os diferentes usos do solo em cada região, tem-se um geo-campo de diversidade zonal de uso do solo para o estado de São Paulo. Neste geo-campo resultante, todas as posições geográficas de um município terão o mesmo valor, representando a diversidade de uso do solo do município.</p>																								
ESTATÍSTICA ZONAL	<p>Produz uma estatística dos valores para cada região. O resultado é um dado tabular, indicando, por exemplo para cada região, os valores máximo, médio, mínimo, variância, desvio padrão e diversidade.</p> <p>Exemplo</p> <table><tr><th>região</th><th>média</th><th>máximo</th><th>mínimo</th><th>desvio padrão</th><th>variedade</th></tr><tr><td>1</td><td>10</td><td>15</td><td>2</td><td>3</td><td>5</td></tr><tr><td>2</td><td>50</td><td>200</td><td>20</td><td>8</td><td>15</td></tr><tr><td>....</td><td>.....</td><td>....</td><td>.....</td><td>.....</td><td>...</td></tr></table>	região	média	máximo	mínimo	desvio padrão	variedade	1	10	15	2	3	5	2	50	200	20	8	15
região	média	máximo	mínimo	desvio padrão	variedade																				
1	10	15	2	3	5																				
2	50	200	20	8	15																				
....																				

4.4 - LINGUAGEM DE MANIPULAÇÃO

Uma das características da tecnologia de Geoprocessamento que contribui para diferenciá-la da tecnologia de Cartografia Automatizada é a presença nos Sistemas de Informação Geográfica de uma estrutura topológica que permite a implementação de um repertório de operações como as descritas na Seção 4.3. Este conjunto de operações permite ao usuário aplicar transformações que extraem novas informações a partir dos dados presentes no Banco de Dados Geográfico do SIG.

Mas um usuário de SIG não está necessariamente interessado em saber como as operações sobre os dados são programadas, nem os métodos usados para organizar internamente estes dados no computador. Seu interesse é ter um conhecimento geral dos processos aritméticos e lógicos de manipulação, interagir com o sistema e aplicar seus conhecimentos para fazer análise geográfica dos dados. (Burrough,1987).

Esta interação do usuário com um SIG pode ser feita através de janelas de menus hierárquicos ou através de uma linguagem de comandos a serem interpretados pelo sistema. Menus hierárquicos são mais apropriados para usuários que fazem uso ocasional do sistema e para quem não deseja ter conhecimento de todos os comandos e funções disponíveis. Usuários que necessitam documentar e repetir sequências de manipulações são melhor servidos por uma linguagem de comandos para manipulação (Burrough,1987).

O princípio de uma linguagem de comandos para manipulação de dados geográficos é o de que os comandos necessários para recuperar dados, para executar transformações sobre estes dados e para modificar sequências de processamentos possam ser escritos de maneira a serem entendidos por ambos, usuário e máquina.

Por exemplo, se um responsável por planejamento ambiental desejasse criar uma zona de preservação em torno de uma rede de rodovias, ele não gostaria de ter que digitalizar a zona de preservação em torno de todas as rodovias que ele está vendo na tela ou em um mapa. Mas desejaria digitar o seguinte comando no teclado:

ZONA_DE_PRESERVACAO = EXPANDIR ESTRADAS X METROS;

O resultado seria uma região de x metros de largura em torno de cada rodovia. Na sequência ele poderia digitar:

CONTAR CASAS ZONA_DE_PRESERVACAO;

O resultado seria o número de casas dentro da área de preservação. Ele poderia também desejar determinar a densidade média de casas em diferentes partes da área de preservação; neste caso ele gostaria de digitar o seguinte comando:

FATIAR DENSID_CASAS PARA CLASSES_FAT;

Então, se o usuário pode expressar em palavras a ação que ele deseja efetuar sobre um conjunto de dados geográficos, porque não deveria ele ser capaz de expressar esta ação de forma similar para um SIG? Uma prova de que uma linguagem com estas características possui penetração entre os usuários é a grande popularidade das planilhas eletrônicas.

Uma linguagem de manipulação com as características descritas acima deve possuir regras sintáticas e gramaticais isentas de ambiguidades. No ambiente computacional, uma linguagem como esta é denominada de Linguagem de Comandos Interpretados.

4.4.1 - LINGUAGEM DE COMANDOS INTERPRETADOS

Essencialmente, uma linguagem de comandos consiste de 3 componentes: *verbo*, *substantivo* e *modificadores*. (Burrough,1987).

- verbo

Refere-se à ação que o sistema deve executar, tal como *entrar*, *transferir*, *rotacionar*, *apagar*, *recuperar*, que são comuns para a maioria das operações.

- substantivo

Refere-se aos tipos de elementos que serão manipulados. Para dados geográficos, os substantivos incluem *ponto*, *linha*, *polígono*, *arco*, *texto*, *geo-campo* e atributos descritivos que são referenciados pelos seus nomes.

- modificadores

Como o próprio nome já diz, os modificadores são usados para uma sintonia fina do verbo sobre o substantivo.

Exemplo:

ENTRE	LINHA	HORIZONTAL;
(<i>verbo</i>)	(<i>substantivo</i>)	(<i>modificador</i>)

Para que o sistema possa determinar o término de uma linha de comando, e passe a executar a operação, um identificador deve ser usado. Neste exemplo ilustrativo foi usado o caracter “;”. Uma lista de verbos, substantivos, regras sintáticas e gramaticais da linguagem é mantida pelo sistema, permitindo assim que eventuais erros cometidos pelo usuário sejam identificados.

Possuir uma linguagem de comandos não inibe o sistema de também possuir interação via janelas de menus. A vantagem da linguagem de comandos é possuir maior flexibilidade e gerar simultaneamente um histórico das manipulações aplicadas. Além disto, uma interface de menus pode ser construída e alterada usando-se uma linguagem de comandos onde as opções do menu são combinações de verbo/substantivos da linguagem. Tem-se neste caso um ambiente misto com menus e comandos.

CAPÍTULO 5

LINGUAGEM LEGAL E EXTENSÕES PROPOSTAS

Os operadores de manipulação de campos geográficos implementados neste trabalho tiveram como ambiente de desenvolvimento a Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL), disponível na versão 2.0.3 do SPRING. Este capítulo apresenta os principais tópicos da proposta da linguagem LEGAL, descreve a versão disponível da linguagem, discute suas limitações e, finalmente, apresenta as contribuições deste trabalho à linguagem LEGAL.

5.1 - OBJETIVO DA LEGAL

A LEGAL é uma linguagem de comandos interpretados para uso em análise geográfica que está em desenvolvimento no ambiente do sistema SPRING.

A linguagem LEGAL, que foi proposta por Câmara Neto (1995), tem como objetivo prover um ambiente geral para análise geográfica, incluindo operações de manipulação (dita álgebra de campos), operações de consulta espacial e operações de apresentação de resultados de consulta e manipulação.

A discussão das operações de manipulação é feita na literatura de forma separada das operações de consulta espacial e apresentação. Isto se reflete nos sistemas comerciais para Geoprocessamento, onde estas operações são implementadas em pacotes de software distintos, obrigando o usuário a mudar de ambiente durante uma sessão de trabalho (Câmara Neto, 1995).

A inovação na proposta de LEGAL é o tratamento destas operações de forma integrada, provendo um ambiente único para manipulação, consulta espacial e apresentação de resultados de consulta e manipulação.

5.2 - ESTRUTURA DA LEGAL

Funcionalmente a linguagem LEGAL pode ser dividida em quatro módulos, como ilustra a Figura 5.1. Estes módulos formam um ambiente integrado para as operações de análise geográfica.

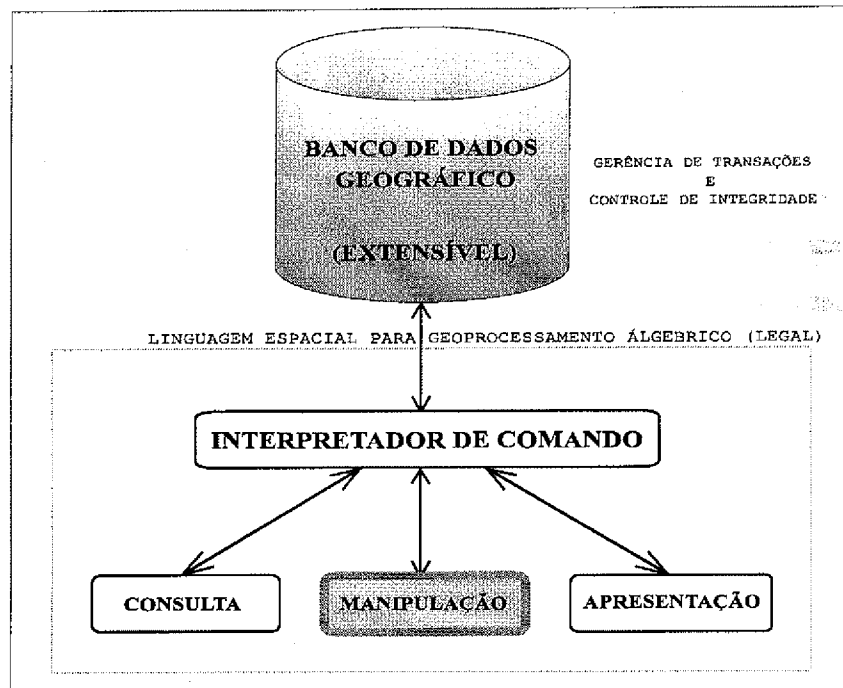


Fig. 5.1 - Estrutura de LEGAL.

- *Interpretador de comandos:* lê cada linha de comando de um programa em LEGAL, interpreta-a, e executa uma ação apropriada.
- *Módulo de consulta espacial:* biblioteca com um repertório de operadores e funções de consulta espacial (seleção e busca, distância, dentro, toca, cruza). Através dos operadores e funções deste módulo, recuperam-se geo-campos, mapa de geo-objetos, um geo-objeto ou uma coleção¹ de geo-objetos ou geo-campos, que podem ser manipulados posteriormente.
- *Módulo de manipulação:* biblioteca com operadores e funções para manipulação de dados geográficos modelados conceitualmente como geo-

¹coleção de geo-objetos: contém um número arbitrário de elementos do mesmo tipo.

campo, e operadores de conversão entre geo-campos e geo-objetos geográficos.

- *Módulo de apresentação*: biblioteca com operadores e funções para apresentação de dados espaciais. Este módulo permite o controle de apresentação de forma independente do resultado da operação realizada.

A discussão teórica deste trabalho, apresentada nos Capítulos 2, 3 e 4, limitou-se a conceitos de modelagem e de manipulação de dados geográficos que podem ser tratados conceitualmente como geo-campo. O escopo prático deste trabalho também limita-se à implementação de operadores para a manipulação de geo-campos e à geração de um exemplo com dados reais, mostrando como o uso de uma linguagem de comandos permite a automatização de certas etapas repetitivas de análise geográfica. Neste escopo, somente as funcionalidades previstas no módulo de manipulação da LEGAL serão utilizados.

5.2.1 - FUNCIONALIDADES PROPOSTAS PARA O MÓDULO DE MANIPULAÇÃO

Segundo a proposta da linguagem LEGAL, o módulo de manipulação deverá possuir as seguintes funcionalidades:

- Transformações pontuais entre geo-campos.
- Operações booleanas entre geo-campos.
- Operadores matemáticos pontuais, tais como funções aritméticas e trigonométricas.
- Métodos de classificação contínua, utilizando a função FUZZY, com intervalo [0..1].
- Operações de vizinhança.
- Operações zonais entre geo-campos.

- Operações zonais entre geo-campos e geo-objetos.
- Geração de mapas de geo-objetos a partir de geo-campos
- Geração de geo-campos a partir de mapas de geo-objetos.

5.3 - IMPLEMENTAÇÃO DISPONÍVEL NO SPRING-2.0.3

Na versão 2.0.3 do SPRING estão implementados no módulo de manipulação da linguagem LEGAL os operadores pontuais *aritméticos*, *booleanos*, *de transformação* (*ponderação*, *fatiamento* e *reclassificação*); os operadores de *vizinhança*, que permitem a escrita de programas para aplicações que necessitam manipular dados utilizando o conceito de vizinhança, como *filtragem*, *declividade*, etc; e os métodos de classificação contínua. Apesar da grande utilidade dos operadores presentes na versão 2.0.3, algumas aplicações de análise geográfica necessitam das funcionalidades descritas na proposta de LEGAL e que não estão ainda presentes na versão disponível da linguagem.

5.4 - LIMITAÇÕES DA VERSÃO 2.0.3

A seguir enumeram-se algumas limitações da versão 2.0.3. Para que a linguagem LEGAL venha a tornar-se realmente um ambiente geral para análise geográfica, é necessário, entre outras coisas, que estas limitações sejam eliminadas.

- Representações geométricas

Na versão atual, é necessário que o usuário converta seus dados para as representações grade regular de células ou grade regular de pontos, antes de executar uma operação de manipulação sobre os dados. Por exemplo, se um geo-campo temático estiver na representação regiões contíguas, é necessário convertê-lo para a representação grade regular de células, antes de usá-lo em uma operação no contexto da linguagem LEGAL. Incorporar a LEGAL, regras para conversão de representações, de forma a tornar transparente para os usuários as representações geométricas, é

uma necessidade não só da LEGAL, mas de todas as linguagens disponíveis comercialmente para manipulação de dados geográficos.

- Operações zonais;

Algumas aplicações de modelagem ambiental necessitam de operadores que manipulem dados delimitados por regiões (zonas). Estas operações não estão implementadas na versão 2.0.3.

- Mecanismos de controle do fluxo de ações;

Algumas aplicações de manipulação requerem que se disponha de meios para estabelecer um controle do fluxo das ações a serem executadas através de testes condicionais. Comandos como *While* e *If...Else*, não estão disponíveis.

- Resultados numéricos em um único valor;

Na versão 2.0.3, os resultados de operações sobre geo-campos, sempre geram novas representações geométricas, não permitindo resultados numéricos no formato tabular. A possibilidade de resultado através de um único valor para uma operação é útil no caso de algumas aplicações usando operadores zonais como estatística zonal, perímetro zonal e etc.

- Geração de relatórios;

Algumas vezes o resultado desejado é um relatório com as informações na forma tabular. Também não está disponível esta opção na linguagem.

5.5 - CONTRIBUIÇÃO À LINGUAGEM LEGAL

Em função das limitações discutidas na Seção anterior, este trabalho implementa as seguintes funcionalidades na linguagem LEGAL.

5.5.1 - MECANISMOS DE CONTROLE DO FLUXO DE AÇÕES

As operações de manipulação requerem que se disponha de meios para estabelecer um controle do fluxo de ações a serem executadas (interação e testes). Estes meios foram previstos na proposta da linguagem, mas não implementados até a versão 2.0.3 do SPRING. Implementou-se neste trabalho o comando WHILE que permite que uma determinada sequência de *ações*, comandos, seja repetida enquanto uma determinada condição for verdadeira. Implementou-se também o comando IF....ELSE, que possibilita a escolher, entre duas sequências de ações, qual executar.

*Exemplos:*²

```

While(condição)      // enquanto a condição for verdadeira a
sequência
{
    // de ações abaixo é executada.
    sequência de ações;
};

If(condição1)        // Se condição1 for verdadeira, executa
sequência1
{
    // Se condição1 for falsa, executa sequência2
    sequência1
}
else
{
    sequência2
};

```

5.5.2 - OPERAÇÕES ZONAIS

As operações zonais discutidas no Capítulo 4, foram especificadas e implementadas como parte deste trabalho. As operações zonais são aplicadas sobre um geo-campo que possui os dados a serem avaliados. As regiões, *zonas*, são definidas por um segundo plano de informação. O Apêndice A descreve a sintaxe dos operadores zonais.

Os seguintes operadores zonais foram implementados:

² No exemplo, os comandos da linguagem estão escritos com a fonte tipográfica Courier New

- **Máximo Zonal** (MaxZ), aplicável sobre dados geográficos adquiridos em escalas numéricas, *imagens de satélites*, *grades de altimetria* e etc.
- **Mínimo Zonal** (MinZ), aplicável sobre dados geográficos adquiridos em escalas numéricas.
- **Média Zonal** (MedZ), aplicável sobre dados geográficos adquiridos em escalas numéricas.
- **Soma Zonal** (SomZ), aplicável sobre dados geográficos adquiridos em escalas numéricas.
- **Maioria Zonal** (MaiZ), aplicável sobre dados geográficos adquiridos em escalas numéricas ou temáticas.
- **Minoria Zonal** (MinoZ), aplicável sobre dados geográficos adquiridos em escalas numéricas ou temáticas.
- **Diversidade Zonal** (VarZ), aplicável sobre dados geográficos adquiridos em escalas numéricas ou temáticas.

5.5.3 - RESULTADOS NUMÉRICOS

O resultado de uma operação zonal pode ser um único valor numérico ou uma nova representação geométrica. Se a variável que recebe o resultado da operação zonal for do tipo inteiro (*int*) ou ponto flutuante (*float*), o resultado será um único valor. Mas se a variável do lado esquerdo do sinal de atribuição (=) for do tipo representação geométrica, o resultado será uma nova representação geométrica.

5.5.4 - GERAÇÃO DE RELATÓRIOS

A flexibilidade de uma linguagem de comandos abre a possibilidade de que os resultados numéricos intermediários e finais de uma sequência de operações de manipulação sejam colocados na forma de relatórios com texto e tabelas. Implementou-se na linguagem LEGAL o comando "Print", que escreve na tela ou em um arquivo do sistema os valores numéricos de variáveis do tipo int, float, e informações adicionais na forma de texto.

CAPÍTULO 6

MATERIAIS E SISTEMAS

Este Capítulo apresenta os materiais e sistemas utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente descreve-se sucintamente a região de estudo. A seguir apresenta-se os materiais e sistemas utilizados para desenvolvimento e testes. Finalmente descreve-se o modelo de dados conceitual do SPRING, base para desenvolvimento da linguagem LEGAL.

6.1 - DESCRIÇÃO DA REGIÃO USADA COMO EXEMPLO

6.1.1 - LOCALIZAÇÃO

A região de estudo corresponde à folha Rio Fresco, (SB-22-Y-D) e está situada no estado do Pará, perfazendo uma área de 18150 Km² (165km x 110km), entre os paralelos 7° 00' e 8° 00' de latitude Sul e os meridianos 51° 00' e 52° 30' de longitude Oeste. O mapa de localização da região é apresentado na figura 6.1.

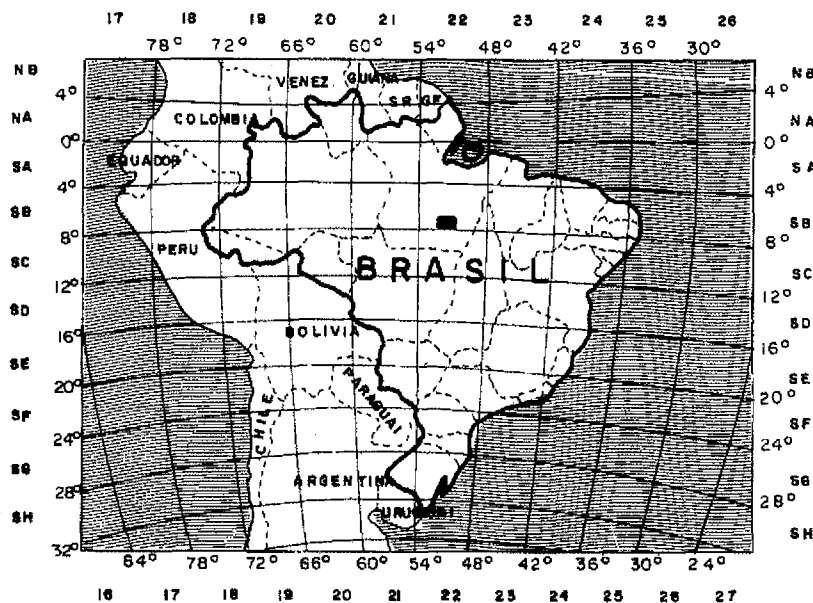


Fig. 6.1 - Localização da área de estudo, no Estado do Pará.

6.1.2 - A PAISAGEM DA FOLHA RIO FRESCO (SB-22-Y-D)

A análise geomorfológica da área contida na Folha Rio Fresco permite a caracterização, muito clara, de dois compartimentos distintos:

- Maciços residuais de topo aplainado e conjunto de cristas e picos, ambos interpenetrados por faixas de terrenos rebaixados, na forma de vales interplanálticos alargados por processos de pedimentação, com altitudes variando entre 500 e 600 metros.
- Áreas dissecadas em colinas e ravinas resultantes da dissecação generalizada, com altitudes variando entre 200 e 300 metros.

O primeiro compartimento faz parte da unidade morfoestrutural e morfoclimática denominada “Planalto Dissecado do Sul do Pará” (RADAMBRASIL, 1977) que é resultado da dissecação de antigos pediplanos, de idades pliocênica e pré-Cretáceo, que muitas vezes coincidem parcialmente.

Dentro da área da Folha Rio Fresco esta unidade foi esculpida em rochas pré-Cambrianas como os riolitos e outras rochas pertencentes ao episódio de vulcanismo ácido, fissural e explosivo do Grupo Uatumã, que formam as serras de Cubencranquém e da Fortaleza; granitos do tipo Serra dos Carajás que formam serras como a da Areia Branca, da Seringa e do Gorotire, e jaspilitos, itabiritos e quartzitos do Grupo Grão Pará, que aparecem nas serras do Coquinho, da Tocandera, do Trairão, Bom Jardim e da Seringa.

Sobre estas serras desenvolveram-se principalmente solos litólicos, e secundariamente podzólicos, que suportam vegetação de campo cerrado e florestas tropicais densas. Muitas vezes estas serras são capeadas por testemunhos residuais de arenitos ortoquartzíticos pré-Cambrianos da Formação Gorotire, como na Serra da Casa de Pedra, Serra do Cipó e Serra do Gorotire, locais em que os solos litólicos e afloramentos rochosos suportam campos cerrados pouco densos.

A tendência atual da erosão neste compartimento é de dissecação em cristas e vales encaixados.

O segundo compartimento participa da unidade morfoestrutural e morfoclimática “Depressão Periférica do Sul do Pará” (RADAMBRASIL, 1977), caracterizada como resultado da atuação dos processos erosivos pós-pleiocênicos que, orientados pela litologia e geologia estrutural de grandes massas rochosas, elaboraram uma ampla faixa de circunsdenudação na periferia das bacias sedimentares paleozóicas do Piauí-Maranhão e do Amazonas, denominada Pediplano Pleistocênico.

Na área da Folha Rio Fresco o Pediplano Pleistocênico foi elaborado sobre rochas pré-Cambrianas, como as vulcânicas intermediárias (predominância de andesito) do episódio vulcânico efusivo do Grupo Uatumã, sobre as quais se desenvolveram associações de solos do tipo terra roxa estruturada, podzólicos e latossolos que suportam florestas tropicais abertas; rochas granodioríticas migmatizadas do Complexo Xingu sobre as quais se desenvolveram solos podzólicos que suportam cerradões e florestas tropicais abertas, e argilitos, folhelhos e arcózios da sedimentação intermontana do Grupo Uatumã, onde os latossolos associados a solos hidromórficos suportam cerradões.

A tendência atual da erosão neste compartimento é a dissecação generalizada do Pediplano Pleistocênico na forma de colinas e ravinas.

6.2. - MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

- Imagem de Satélite

Foram utilizadas 6 imagens do satélite TM/LANDSAT -5, bandas 3,4,5, na escala 1:250000. Estas imagens foram utilizadas tanto no formato digital quanto em uma composição colorida (5R4G3B) em papel. Para cobrir toda a área foi necessário fazer um mosaico de duas cenas do satélite.

Cena 1: órbita 224, ponto 65. Data 24/07/1992

Cena 2: órbita 225, ponto 65. Data 31/07/1992

- Material cartográfico

- Quatro cartas temáticas na escala 1:1000000 do Projeto RADAMBRASIL. Volume 4- Folhas SB/SC 22

Mapa Geológico;

Mapa FitoEcológico;

Mapa Geomorfológico;

Mapa Exploratório de Solos.

- Carta topográfica na escala 1:250000, confeccionada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE/1982). Projeção UTM/SAD-69, carta Rio Fresco, Folha SB-22-Y-D MIR224.

- Relatório do PROJETO RADAMBRASIL Volume 4

6.3. - SISTEMAS

Na parte prática deste trabalho, foram utilizados os seguintes sistemas: YACC, SCARTA e SPRING

6.3.1- YACC

O yacc é um gerador de analisador gramatical, isto é, um programa para converter uma especificação gramatical de uma linguagem em um analisador gramatical para esta linguagem. Este analisador gramatical é na verdade um programa que analisa gramaticalmente sentenças escritas segundo esta linguagem. A Figura 6.2 a seguir ilustra de forma mais clara o parágrafo anterior.

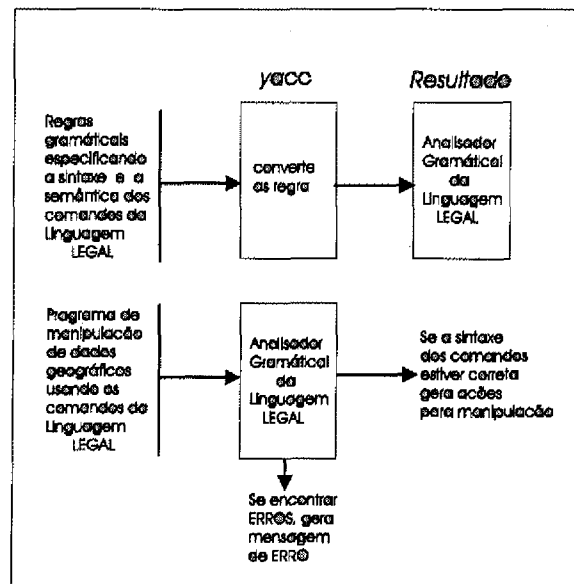


Fig. 6.2 - yacc um gerador de analisador gramatical.

6.3.2- SCARTA

O SCARTA é um módulo para edição de documentos cartográficos que utiliza como entrada um banco de dados geográficos organizado através do sistema SPRING. A edição final das cartas de vulnerabilidade apresentadas no Capítulo 7 foram elaboradas através deste módulo.

6.3.3- SPRING

O SPRING, Sistema de Processamento de Informações Geo-referenciadas desenvolvido no INPE foi o principal sistema utilizado na parte prática deste trabalho. A linguagem LEGAL, apresentada no Capítulo 5, foi especificada e está sendo desenvolvida tomando por base o modelo de dados do sistema SPRING. Em função disto, o uso da LEGAL pressupõe que os dados estejam organizados segundo este modelo.

O modelo de dados de um SIG, descreve como os dados são organizados e representados naquele SIG. No caso do sistema SPRING, uma descrição deste modelo pode ser encontrada no **volume II** do manual do usuário do sistema.

Para facilitar o entendimento do exemplo de manipulação em LEGAL apresentado no Capítulo 7 e dos Apêndices A e B, o modelo de dados conceitual do SPRING e alguns palavras chaves usados neste trabalho são apresentados de forma sucinta a seguir.

6.3.3.1 - MODELO DE DADOS CONCEITUAL DO SISTEMA SPRING

O princípio básico do modelo de dados do sistema SPRING é o de que dados geográficos podem ser descritos pelo conceito¹ de geo-campo e geo-objeto.

A entidade *banco de dados* é o repositório de todos os dados geográficos manipulados pelo SPRING. Este repositório por sua vez, é formado por uma ou mais entidades denominadas de *projeto*; onde o *projeto* é composto por todos os dados disponíveis no banco de dados para uma determinada região geográfica.

Dentro de um projeto os dados são organizados por categorias. As categorias podem ser de seis tipos diferentes: Imagem, Temático, Numérico, Objeto, Cadastral e Não-Espacial. As entidades geográficas que podem ser modeladas como geo-campo são organizadas em categorias dos tipos Imagem, Temático, Numérico e, fazem parte do escopo deste trabalho. Já as entidades geográficas que podem ser modeladas como geo-objeto são organizadas em categorias dos tipos Objeto, Cadastral e Não-Espacial e, não fazem parte do escopo deste trabalho.

Em uma categoria de dados de um projeto, dados distintos são guardados em planos de informação diferentes. Por exemplo, se um projeto possui uma categoria do tipo Imagem denominada de TM/LANDSAT, cada banda do sensor TM forma um plano de informação diferente.

Para diferenciar classes distintas de um dado temático, uma categoria do tipo temático, no sistema SPRING, é formada por um conjunto de classes temáticas onde, cada uma destas classes temáticas pode ser associada a uma classe presente no

¹ver seção 3.4.1

dado. Por exemplo, em um plano temático de tipos de solos cada solo é associado a uma classe temática.

A Figura 6.3 ilustra a organização dos dados no ambiente SPRING.

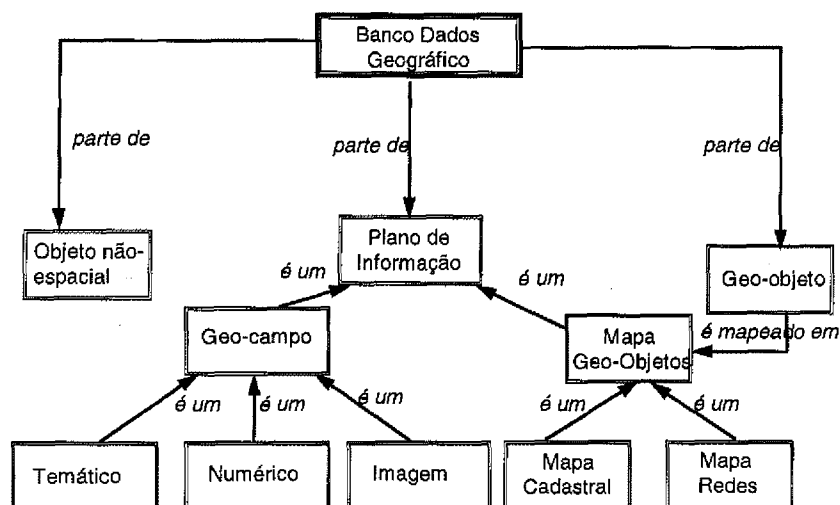


Fig.6.3 - Modelo conceitual do SPRING
Fonte: adaptada de Câmara (1995)

CAPÍTULO 7

EXEMPLO DE MANIPULAÇÃO EM LEGAL

Este Capítulo é dedicado à apresentação de um exemplo real de uso da linguagem. Inicialmente descreve-se a estrutura geral de um programa usando a linguagem LEGAL. A seguir apresenta-se um procedimento metodológico¹ desenvolvido no INPE para elaboração de cartas temáticas de Vulnerabilidade Natural à Erosão. Na sequência mostra-se como é possível automatizar algumas etapas do procedimento metodológico apresentado anteriormente e apresenta os dados utilizados e resultados obtidos. Finalmente é feita uma comparação dos resultados obtidos através da linguagem com os resultados disponíveis, que foram obtidos através de manipulação manual dos dados.

7.1 - ESTRUTURA DE UM PROGRAMA EM LEGAL

Um programa em LEGAL é formado por uma sequência de comandos, sendo que cada comando determina uma ação a ser executada pelo sistema. As ações podem ser de três tipos: ações de declaração, ações de instanciação e ações de atribuição.

```
{  
    declarações  
    instanciações  
    atribuições.  
}
```

O interpretador de comandos da linguagem LEGAL, descrito no Capítulo 5, lê cada comando encontrado e executa a ação determinada pelo comando. Somente uma ação é executada a cada instante. A sequência de comandos de um programa em LEGAL deve estar em um arquivo no formato ASCII, seu início é determinado pela primeira ocorrência do caracter {, e o seu fim determinado pelo caracter }. Outras

¹Equipe do INPE responsável pelo desenvolvimento da metodologia: Edison Crepani, José Simeão de Medeiros, Pedro Hernandez Filho, Teresa Gallotti Florenzano e Valdete Duarte.

ocorrências do par { , } podem acontecer dentro da sequência de comandos do programa.

Ações de declaração

Cada ação de declaração define o nome de uma ou mais variáveis que poderão ser utilizadas no decorrer do programa. Toda variável deve ser declarada antes de ser usada por algum comando da linguagem. É através destes nomes de variáveis que o programa acessa os dados geográficos disponíveis no banco. Além de definir o nome de uma variável, a ação de declaração também determina que categoria de dados geográficos presentes no banco poderão posteriormente ser associados a este nome.

Sintaxe²:

Classe básica < nome da variável> ("categoria de dados da variável");

Exemplos:

Tematico solos ("pedologia");

Define o nome da variável solos, cuja classe do modelo conceitual do SPRING é temática, e que poderá ser associada a planos de informação da categoria pedologia.

Numerico solonumerico ("ponderacoes");

Define o nome da variável solonumerico, cuja classe do modelo conceitual do SPRING é numérica, e que poderá ser associada a planos de informação da categoria ponderações.

Imagem TM5 ("ancoras");

Tabela pesos (Ponderacao);

Maiores informações sobre a sintaxe dos comandos da linguagem podem ser encontradas no apêndice I e nos manuais do sistema SPRING.

Ações de instanciação

A ação de instanciação associa um nome de variável declarada anteriormente, através de uma ação de declaração, a um plano de informação presente

²Nos exemplos a seguir, as linhas de comandos a serem executadas pela linguagem estão escritas com o fonte tipográfico Courier New, e as palavras reservadas da linguagem em **negrito**.

no banco de dados, ou associa o nome de uma variável a um plano de informação que está sendo criado pela ação de instanciação.

Uma ação de instanciação é caracterizada pelos comandos **Recupere** e **Novo**. O comando **Recupere** associa o nome de uma variável a um plano de informação existente no banco de dados geográfico corrente; já o comando **Novo** cria um novo plano de informação no banco de dados e associa este novo plano ao nome de uma variável declarada anteriormente e presente antes do sinal de “=”.

Sintaxe:

nome da variável = Comando (parâmetros);

Exemplos:

```
solos = Recupere (Nome="solos_224");
```

Associa o nome da variável *solos* ao plano de informação *solos_224*, presente no banco de dados.

```
solonumerico = Novo (Nome = "soloponderado", ResX=60, ResY=60,  
Escala = 100000, Min=1, Max=3);
```

Cria no banco de dados o plano de informação *soloponderado* e associa este plano à variável do programa de nome *solonumerico*.

Ações de atribuição.

Uma ação de atribuição consiste em associar a uma variável declarada e instanciada o resultado de uma expressão envolvendo os operadores da linguagem e os dados recuperados do banco corrente.

Exemplos:

```
solonumerico = 2.35 * Pondere (solos,pesos);
```

Na versão 2.0.4, para a execução de um programa em LEGAL, é necessário estar rodando o SPRING, tendo um banco e um projeto ativos.

7.2 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para exemplificar a utilização da linguagem e validar os operadores zonais optou-se por usar uma aplicação cujos dados de entrada e resultados estavam disponíveis. Isso permitiu a comparação com os resultados obtidos através dos operadores da linguagem LEGAL.

O objetivo da aplicação usada como exemplo é fazer o mapeamento do grau de resistência ao processo natural à erosão de uma determinada região geográfica de estudo. A metodologia usada para elaborar este mapeamento foi desenvolvida no INPE para uso na primeira fase do Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) dos estados da Amazônia Legal e usa imagens orbitais como *âncora* na determinação das unidades homogêneas de paisagem (Crepani et al., 1996).

Para dar subsídios ao leitor no entendimento do exemplo de uso da linguagem, apresenta-se a seguir o roteiro metodológico para elaboração de cartas temáticas de Vulnerabilidade Natural à Erosão. Uma descrição completa da metodologia pode ser encontrada em (Crepani et al., 1996) e (Becker e Egler, 1996).

7.2.1 - ROTEIRO METODOLÓGICO PARA ELABORAÇÃO DE CARTAS TEMÁTICAS DE VULNERABILIDADE NATURAL À EROSÃO*

O procedimento metodológico desta aplicação, segundo a metodologia desenvolvida no INPE, pode ser dividido em 7 etapas, conforme ilustrado na figura 7.1.

* Transcrito de SAE - MMA. Detalhamento da Metodologia para execução do Zoneamento Ecológico-Econômico pelos estados da Amazônia Legal, 1996.

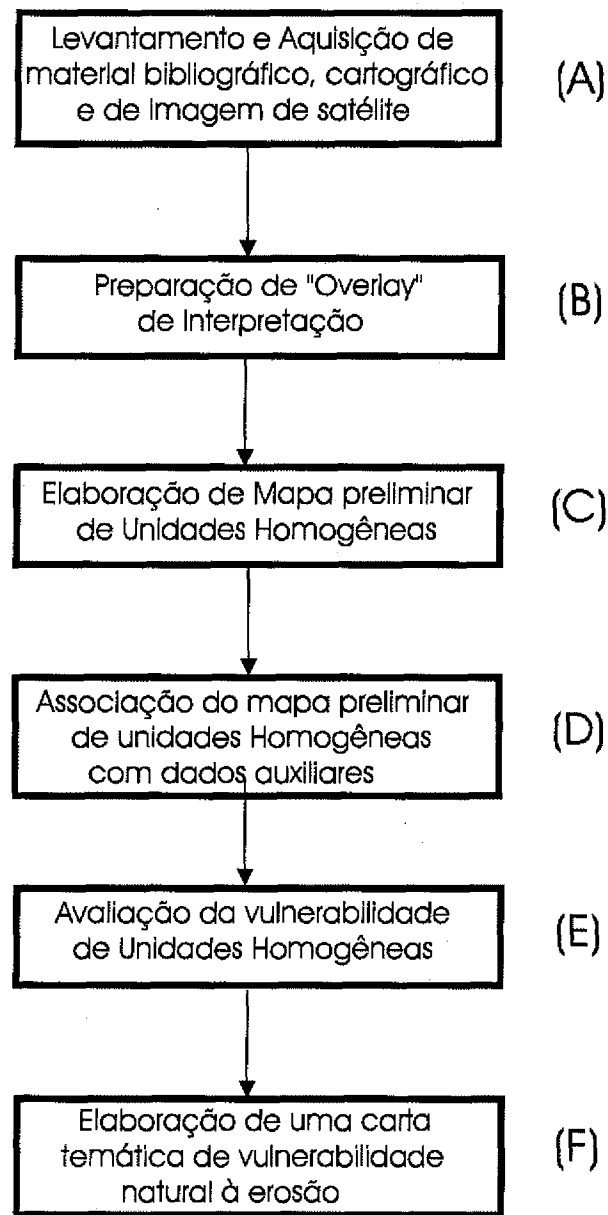


Fig. 7.1 - Fluxograma do roteiro metodológico usado na elaboração de cartas temáticas de vulnerabilidade à erosão.

A seguir descreve-se sucintamente cada etapa:

A - Levantamento e aquisição de material cartográfico e de imagens de satélite

- Adquirir imagens do sensor Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT, bandas 3,4,5;

- Levantar dados bibliográficos da região;
- Adquirir mapas temáticos do RADAMBRASIL (geológico, geomorfológico, solos, fitoecológico) na escala 1:1.000.000;
- Adquirir carta topográfica da área de estudo na escala 1:250.000.

B - Preparação de “overlay” de interpretação

- Consiste na compilação cartográfica de pontos de referência, tais como drenagem, estradas, cidades, etc., obtidos diretamente sobre a carta topográfica do IBGE, na escala 1:250.000.

C - Elaboração de mapa preliminar de Unidades Homogêneas

- Consiste na elaboração de um mapa preliminar de unidades homogêneas de paisagem obtidas a partir da análise e interpretação das imagens do sensor Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT, considerando os padrões fotográficos identificados pela variação dos matizes de cores, e pelos elementos texturais de relevo e drenagem. Estas unidades homogêneas são classificadas como *unidades territoriais básicas (utbs)*, e segundo Becker e Egler (1996), uma *unidade territorial básica* 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. As particularidades de cada *unidade territorial básica* permitem que seja elaborado um mapa de unidades homogêneas de paisagem da região geográfica de estudo.

D - Associação de mapa preliminar de Unidades Homogêneas com dados auxiliares

- Consiste na associação de dados auxiliares temáticos preexistentes tais como, mapas geológicos, geomorfológicos, mapas de solos e de cobertura vegetal, com o mapa preliminar de unidades homogêneas obtido na etapa “C”. Esta associação permite caracterizar tematicamente cada unidade homogênea.

E - Avaliação da vulnerabilidade de Unidades Homogêneas

- Estabelecer a vulnerabilidade natural de cada unidade homogênea considerando a relação entre os processos de morfogênese e pedogênese, a partir da análise integrada da rocha, do solo, do relevo e da vegetação. Informações complementares dos efeitos do clima e de uso da terra são também considerados.
- Expressar a vulnerabilidade natural pela atribuição de valores de estabilidade para cada unidade homogênea considerando o conceito de análise ecodinâmica de Tricart (1977, 1992). Assim, a estabilidade é classificada conforme o observado na Tabela 7.1.

TABELA 7.1 – VALORES DE ESTABILIDADE DE UNIDADES DE PAISAGEM

Unidade	Relação pedogênese /morfogênese	Valor
Estável	Prevalece a pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio entre pedogênese e morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a morfogênese	3,0

FONTE: Crepani et al., 1996, p. 7

- A estabilidade ou vulnerabilidade, resistência ao processo natural à erosão, das unidades de paisagem natural é definida pela análise integrada do conjunto rocha, solo, relevo, vegetação e clima. Os elementos considerados em cada componente físico da paisagem são descritos a seguir:
 - tipo de rocha (*comportamento quanto à erosão*)
 - ⇒ muito resistente
 - ⇒ moderado
 - ⇒ pouco resistente
 - tipo de solo (*comportamento quanto à erosão*)
 - ⇒ muito resistente
 - ⇒ moderado
 - ⇒ pouco resistente
 - forma de relevo (*influência da forma de relevo na erosão*)

⇒ não favorece

⇒ moderado

⇒ favorece

- tipo de vegetação e densidade de cobertura (*influência da vegetação*)

⇒ não favorece

⇒ moderado

⇒ favorece

O uso da terra e o clima (temperatura, intensidade de precipitação e distribuição de precipitação durante o ano) são parâmetros também considerados pela metodologia.

Os aspectos que são considerados para caracterizar uma unidade homogênea do ponto de vista da estabilidade e vulnerabilidade são os seguintes:

- Rocha

⇒ A resistência à erosão das rochas que compõem uma unidade de paisagem natural é consequência do grau de coesão destas rochas. Por grau de coesão das rochas entende-se a intensidade da ligação entre os minerais ou partículas que as constituem (Crepani et al., 1996).

- Solo

⇒ A resistência do solo ao processo de erosão é consequência do tipo de solo e de suas características físicas, tais como, textura, estrutura, porosidade, permeabilidade, profundidade, e pedregosidade.

- Relevo

⇒ A influência do relevo no processo de erosão é consequência da sua morfologia que se subdivide em morfografia, aspectos descritivos do terreno como sua aparência, e em morfometria, aspectos quantitativos do relevo como altitude, amplitude altimétrica, declividade e intensidade de dissecação pela drenagem.

- Vegetação

- Vegetação

⇒ A cobertura vegetal representa a defesa da unidade de paisagem contra os efeitos dos processos modificadores das formas de relevo. A ação da cobertura vegetal na proteção da paisagem se dá de diversas maneiras: 1) evita o impacto direto contra o terreno das gotas de chuva que promovem a desagregação das partículas; 2) impede a compactação do solo que diminui a capacidade de absorção de água; 3) aumenta a capacidade de infiltração do solo pela difusão do fluxo de água. A densidade de cobertura vegetal da unidade de paisagem determina o fator de proteção da unidade (Crepani et al., 1996).

A integração destes dados temáticos, que estão em escala de medida nominal, é feita segundo um modelo que estabelece 21 classes de vulnerabilidade à erosão, distribuídas entre as situações de predomínio dos processos de pedogênese (às quais se atribuem valores próximos de 1,0), passando por situações intermediárias (às quais se atribuem valores ao redor de 2,0) e situações de predomínio dos processos erosivos modificadores das formas de relevo, morfogênese (às quais se atribuem valores próximos de 3,0) (Crepani et al., 1996).

Este modelo de integração é aplicado individualmente a cada tema, dentro de cada unidade ambiental, atribuindo a cada unidade uma nota correspondente ao comportamento, em relação à erosão, da classe do tema presente na unidade.

Por exemplo, para o tema geologia, se o tipo de rocha presente na unidade apresenta alto grau de coesão, atribui-se à unidade nota próxima à estabilidade (1,0). Se o tipo de rocha presente na unidade apresenta valores intermediários no seu grau de coesão, atribui-se nota ao redor de 2,0 à unidade. E por fim, se o tipo de rocha presente na unidade apresenta baixa resistência à erosão, pequeno grau de coesão, atribue-se nota próximo à vulnerabilidade (3,0). O resultado desta integração é a vulnerabilidade de cada unidade ambiental devido as informações provenientes de cada tema avaliado, geologia, geomorfologia, vegetação e solos.

A Tabela 7.2 resume as 21 classes de vulnerabilidade/estabilidade usadas pelo modelo para integrar os dados temáticos. A representação destas classes em um mapa temático é feita por meio de cores, também mostradas na Tabela 7.2.

TABELA 7.2 – MODELO DE INTEGRAÇÃO E REPRESENTAÇÃO DE DADOS TEMÁTICOS

Classes de vulnerabilidade	Escala de Vulnerabilidade			Grau de Vulnerabilidade	GRAU DE SATURAÇÃO			
					VERM.	VERDE	AZUL	CORES
C1	↑	3,0	↑	VULNERÁVEL (Morfogênese)	255	0	0	
C2	↑	2,9	↑		255	51	0	
C3	↑	2,8	↑		255	102	0	
C4	↑	2,7	↑		255	153	0	
C5	↑	2,6	↑	MODERADAM. VULNERÁVEL	255	204	0	
C6	↑	2,5	↑		255	255	0	
C7	↑	2,4	↑		204	255	0	
C8	↑	2,3	↑		153	255	0	
C9	↑	2,2	↑	MEDIANAM. ESTÁVEL/ VULNERÁVEL (morfo/pedo)	102	255	0	
C10	↑	2,1	↑		51	255	0	
C11	↑	2,0	↑		0	255	0	
C12	↑	1,9	↑		0	255	51	
C13	↑	1,8	↑	MODERADAM. ESTÁVEL	0	255	102	
C14	↑	1,7	↑		0	255	153	
C15	↑	1,6	↑		0	255	204	
C16	↑	1,5	↑		0	255	255	
C17	↑	1,4	↑	(Pedogênese) ESTÁVEL	0	204	255	
C18	↑	1,3	↑		0	153	255	
C19	↑	1,2	↑		0	102	255	
C20	↑	1,1	↑		0	51	255	
C21	↑	1,0	↑		0	0	255	

FONTE: Crepani et al., 1996, p. 17

A determinação da classe de vulnerabilidade resultante de uma unidade territorial básica é obtida considerando-se simultaneamente a contribuição de todos os temas. Ou seja, a nota final de cada unidade pode ser obtida por uma média entre as notas individuais de cada tema para cada unidade ambiental. A Figura 7.2 ilustra a operação final para determinação da vulnerabilidade resultante.

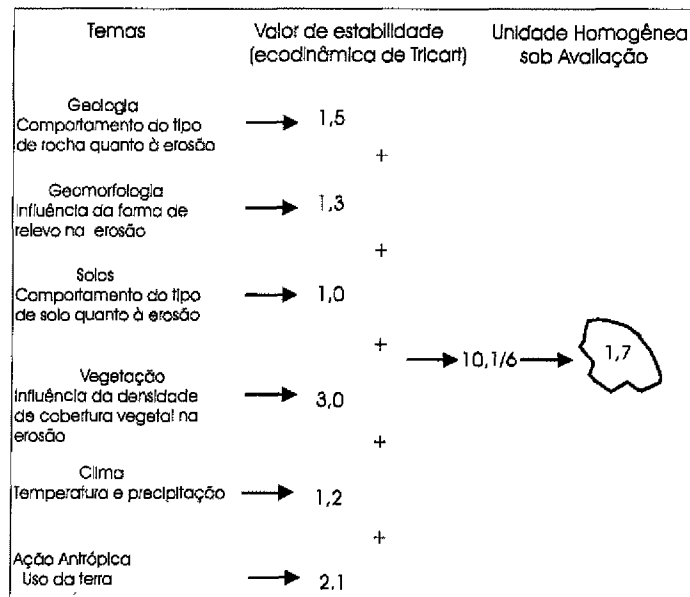


Fig. 7.2 - Modelo para estimar a Vulnerabilidade Natural à Erosão de uma Unidade Territorial Básica

As 21 classes de vulnerabilidades apresentadas na Tabela 7.2 foram nomeadas conforme a Tabela 7.3:

TABELA 7.3 – NOME DAS CLASSES DE VULNERABILIDADE / ESTABILIDADE

Classe	Nome
C21	Estável
C20	Estável 1
C19	Estável 2
C18	Estável 3
C17	Moderadamente Estável
C16	Moderadamente Estável 1
C15	Moderadamente Estável 2
C14	Moderadamente Estável 3
C13	Medianamente Estável
C12	Medianamente Estável-Vulnerável
C11	Medianamente Estável_e_ou_Vulnerável
C10	Medianamente Vulnerável-Estável
C9	Medianamente Vulnerável
C8	Moderadamente Vulnerável 1
C7	Moderadamente Vulnerável 2
C6	Moderadamente Vulnerável 3
C5	Moderadamente Vulnerável
C4	Vulnerável 1
C3	Vulnerável 2
C2	Vulnerável 3
C1	Vulnerável

7.2.2 - ELABORAÇÃO DE CARTA DE VULNERABILIDADE USANDO A LEGAL

O roteiro metodológico transcrito na seção anterior foi executado pela equipe responsável pelo projeto ZEE no INPE sobre uma área selecionada³, nas seguintes condições:

- todos os mapas foram usados no formato analógico, em papel;
- a etapa “C”, - *Elaboração de mapa preliminar de unidades homogêneas* foi executada a partir de uma imagem em papel.
- a etapa “D”- *Associação do mapa preliminar de unidades homogêneas com dados auxiliares*, foi executada pelo “overlay” dos dados analógicos.

Como o objetivo do presente trabalho nesta fase visa somente validar e exemplificar os operadores desenvolvidos e mostrar que através de uma linguagem de comandos é possível automatizar etapas repetitivas de manipulação, as etapas A, B e C do roteiro metodológico não foram aqui executadas.

Como na primeira fase do Zoneamento Ecológico Econômico(ZEE) dos estados da Amazônia Legal os parâmetros de uso da terra e de clima não estavam disponíveis e não foram utilizados pelo processo manual, eles também não serão considerados no exemplo aqui apresentado.

7.2.2.1- CONVERSÃO DOS DADOS

Para execução do roteiro metodológico no ambiente de manipulação da linguagem LEGAL foi necessário converter os dados para o formato digital e geo-referenciá-los.

O trabalho de digitalização dos mapas já havia sido iniciado no sistema SGI, desenvolvido pelo INPE. Estes dados foram importados para o sistema SPRING através de seu módulo de importação.

A partir de uma análise dos dados digitalizados e os dados em papel verificou-se a necessidade de se fazer uma série de correções nos dados digitais, devido

a erros de digitalização e a erros de associações temáticas aos polígonos digitalizados. Procurou-se, na medida do possível, manter fiel o padrão de cores usados nos mapas do projeto RADAMBRASIL.

7.2.2.2 - MANIPULAÇÃO DOS DADOS

A partir do cruzamento entre os mapas temáticos no formato digital com o mapa de unidades homogêneas, verificou-se a presença de mais de uma classe de cada tema em uma unidade ambiental, ou seja, em uma determinada unidade existia mais de um tipo de rocha para o tema geologia ou mais de um tipo de cobertura vegetal para o tema vegetação, por exemplo. Estas discrepâncias podem ser atribuídas às imprecisões presentes nos mapas temáticos utilizados, que apresentam-se em escala 4 vezes menor que a da imagem TM-LANDSAT e foram gerados a partir de imagens de radar (Projeto RADAM BRASIL). Outra possível causa destas discrepâncias pode ser os critérios de classificação aplicados pelo projeto RADAMBRASIL sobre imagens de radar.

Devido a estas discrepâncias, adotou-se neste trabalho a seguinte abordagem: consideram-se todas as classes presentes, a partir do cruzamento, em cada unidade ambiental. Para isto, ao invés de atribuir a nota de uma classe do tema para a unidade, atribuiu-se uma média das notas das classes presente na unidade ambiental. Por exemplo, se para o tema solos ocorrer em uma unidade a presença de 70% de Terra Roxa Estruturada, nota 2.0, e 30% de solos Hidromórficos, nota 3.0, o valor atribuído à unidade será 2.3 ($2.0 \cdot 0.7 + 3.0 \cdot 0.3$).

Assim, o cálculo do valor médio é ponderado pela área do componente do tema dentro da unidade ambiental, ou seja, componentes de áreas maiores terão maior participação na nota atribuída para a unidade. Esta abordagem pode ser vista como uma operação de média zonal, onde a unidade ambiental define a região, e as notas das classes do tema, os dados avaliados.

A figura 7.3 sintetiza as principais operações executadas sobre os dados para validar os operadores desenvolvidos neste trabalho.

³Ver no Capítulo 6 a localização da área teste.

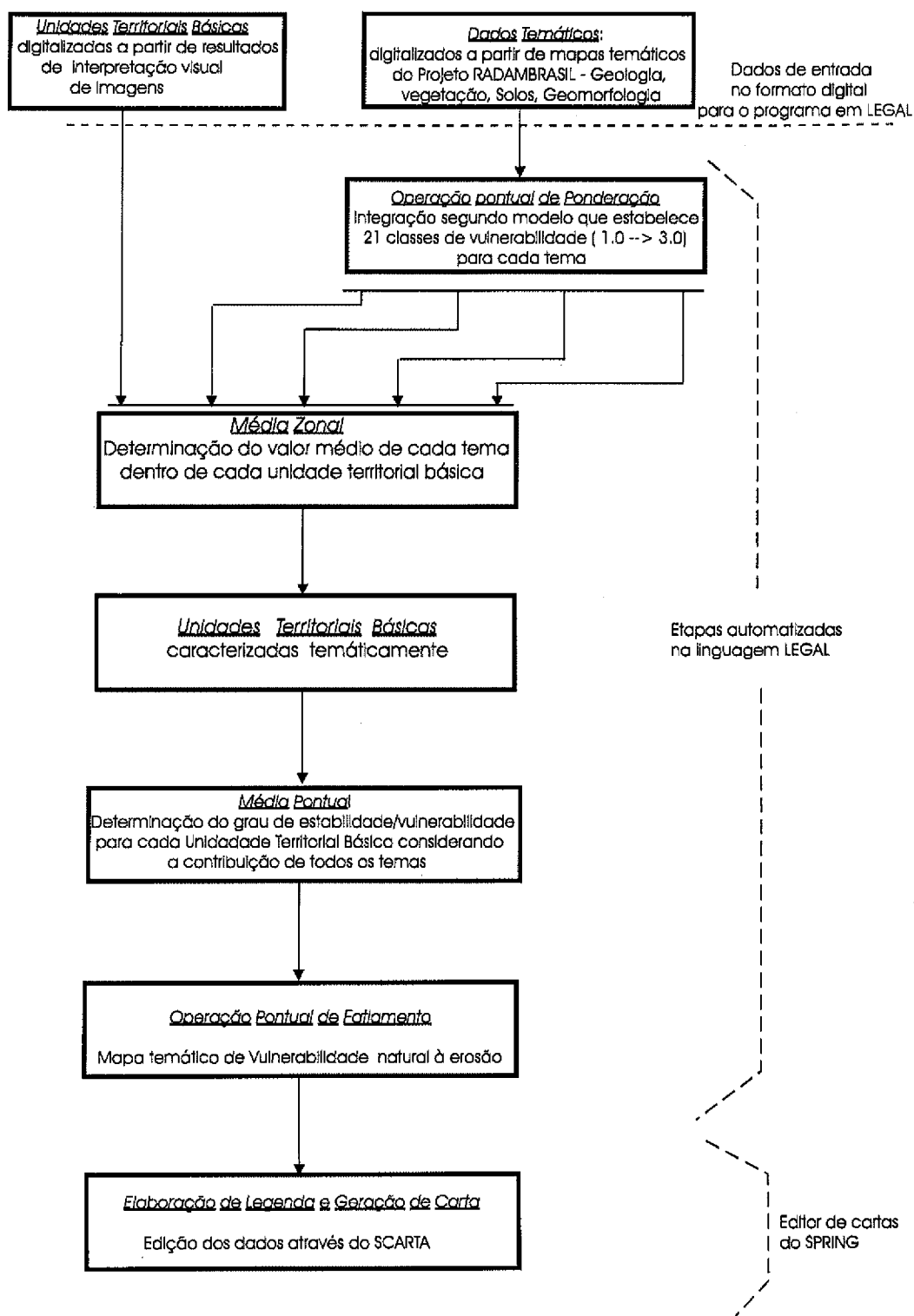


Fig. 7.3 - Operações executadas sobre o conjunto de dados

7.2.2.3. - APRESENTAÇÃO DOS DADOS E RESULTADOS OBTIDOS

A seguir apresenta-se uma série de figuras com os dados de entrada, resultados intermediários e produto final, obtidos a partir de manipulações no ambiente da linguagem LEGAL. Referências para os dados primários, a partir dos quais os dados digitais foram obtidos, podem ser encontradas na seção 6.2.

A Figura 7.4 mostra um mosaico da imagem do sensor TM/LANDSAT em composição colorida 3B4G5R de 24 e 31 de julho de 1992 da área de estudo. A figura 7.5 mostra as *unidades territoriais básicas (utbs)* obtidas a partir de análise e interpretação da imagem apresentada na Figura 7.4.



Fig. 7.4 - Mosaico em composição colorida das bandas 3(B),4(G),5(R) do sensor Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT associada as cores Azul, Verde e Vermelho respectivamente. Data: 24/07/1992 e 31/07/1992

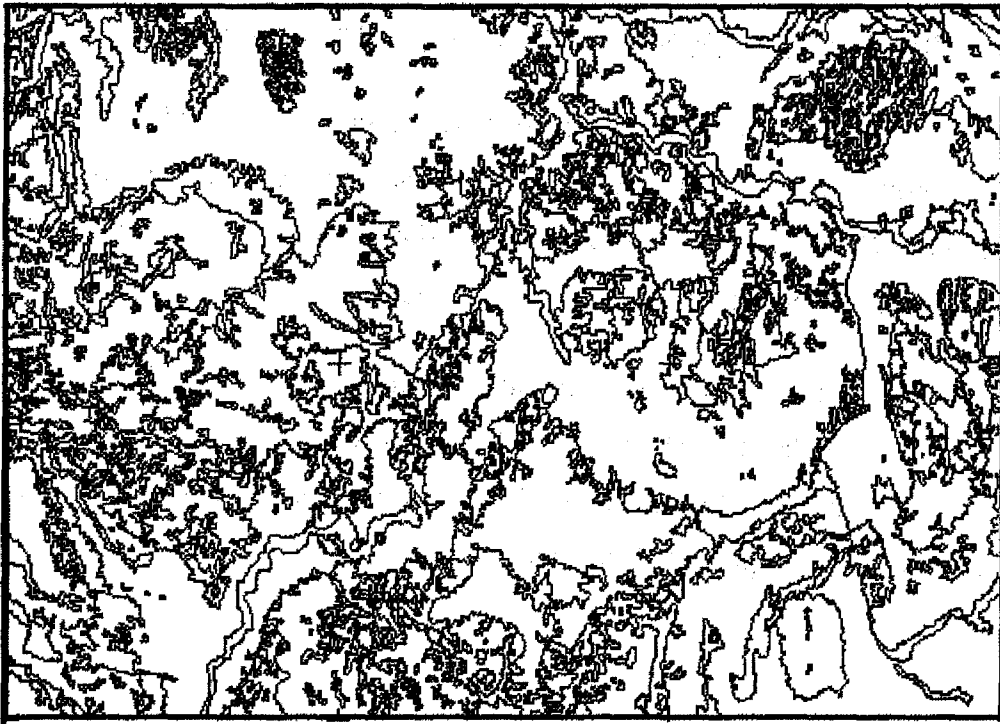


Fig. 7.5 - Compartimentação das Unidades Territoriais Básicas da área de estudo

As Figuras 7.6, 7.7, 7.8 e 7.9 são compostas de 3 partes. A parte (a) de cada figura mostra o mapeamento de cada tema para a região de estudo, obtido a partir do mapa temático correspondente gerado pelo projeto RADAMBRASIL na escala 1:1.000.000.

A parte (b) de cada figura ilustra uma pequena região da grade de valores médios calculados para as *unidades territoriais básicas*. Este cálculo envolve duas operações; a primeira é uma *operação pontual de ponderação*⁴, em que valores são atribuídos as classes do tema; e a segunda é uma *operação zonal de média*⁵, em que o valor médio para o tema dentro de cada *unidade territorial básica* é calculado.

A parte (c) de cada figura mostra o mapa temático de vulnerabilidade devido ao tema em questão. Este mapa foi gerado por uma *operação pontual de fatiamento*, feita sobre a grade de valores médios das *unidades territoriais básicas* para o tema em questão. O resultado desta operação de fatiamento de cada tema não é usado nas etapas seguintes da metodologia, mas pode ser útil em uma análise detalhada da contribuição de cada tema.

⁴Ver operações pontuais no Capítulo 4

⁵Ver operações zonais no Capítulo 4

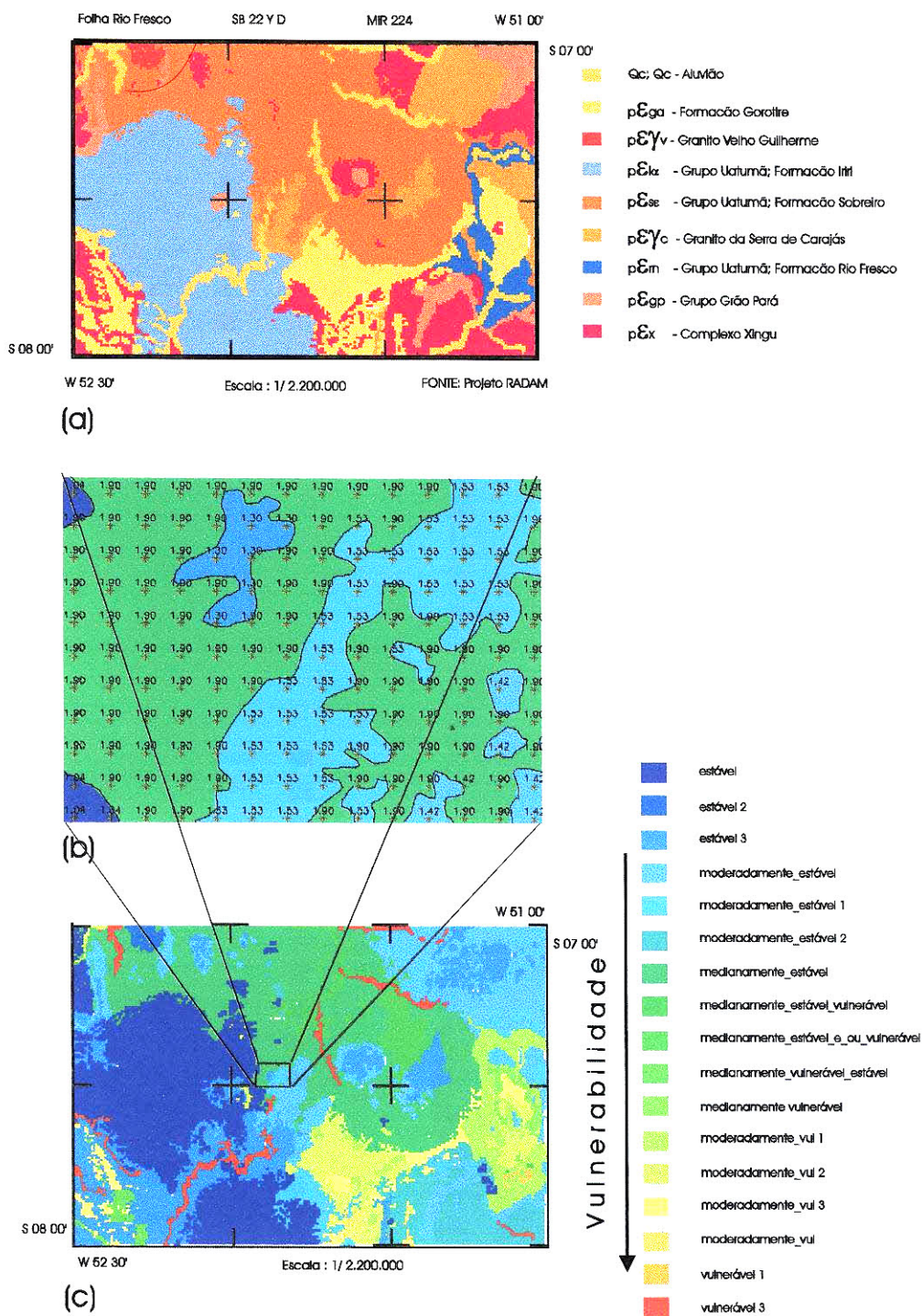


Fig. 7.6 - (a) Mapa temático de Geologia.
(b) Grade regular com os valores médios nas *utbs* para o tema geologia.
(c) Mapa temático de vulnerabilidade das *utbs* relativa ao tema geologia.

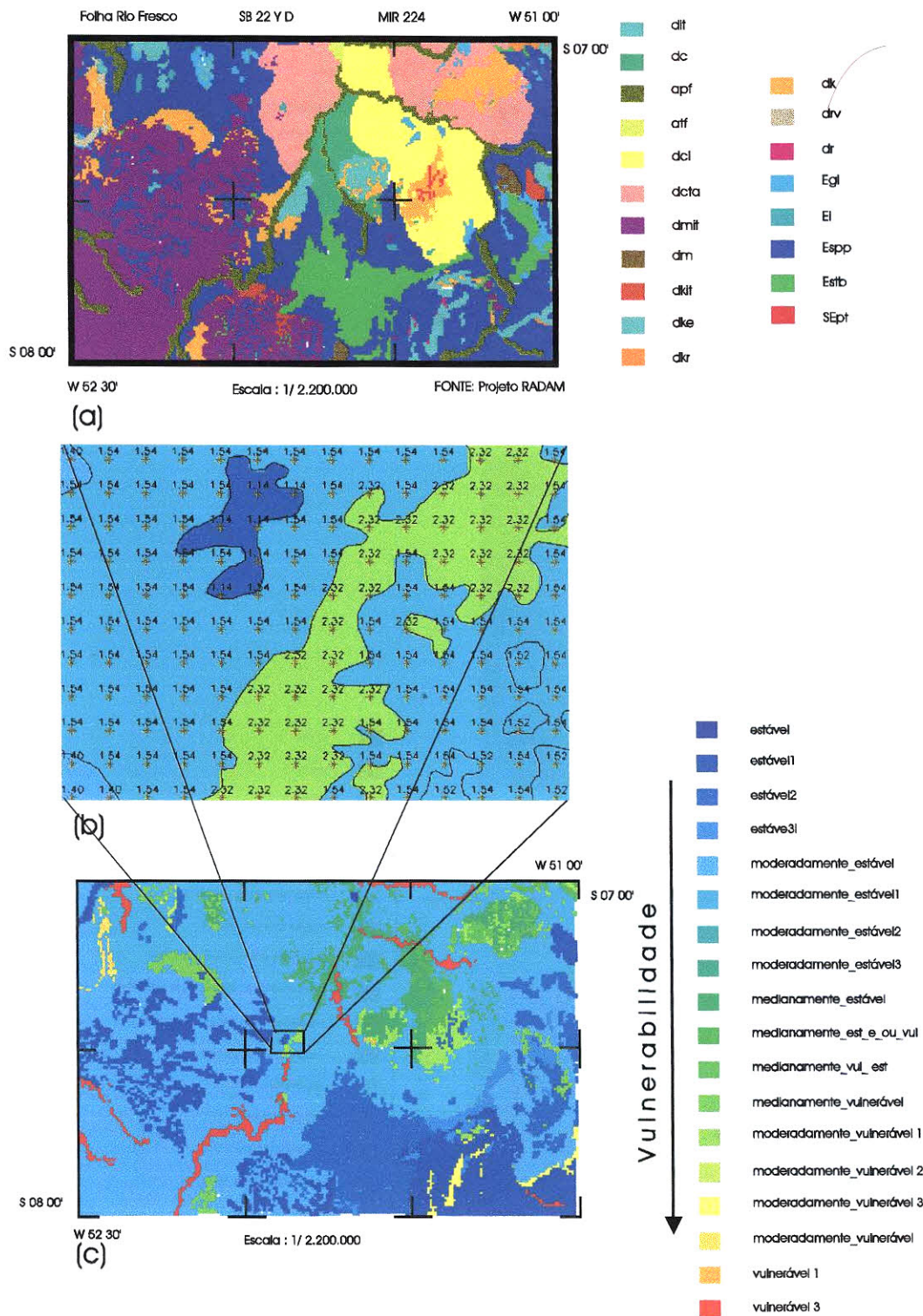
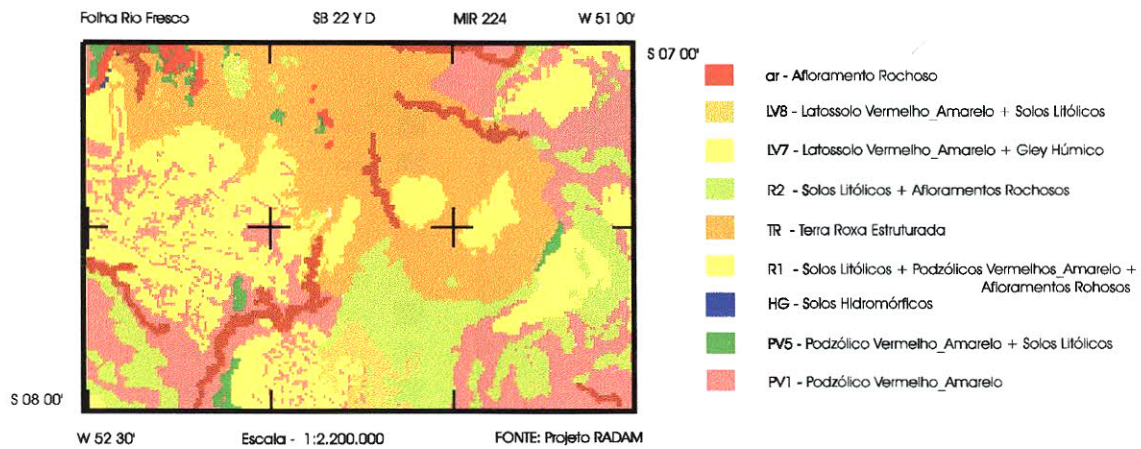
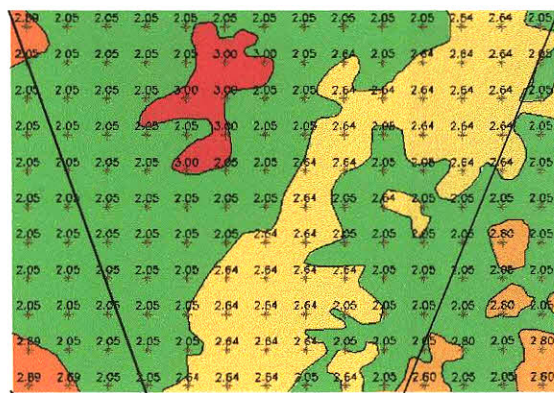


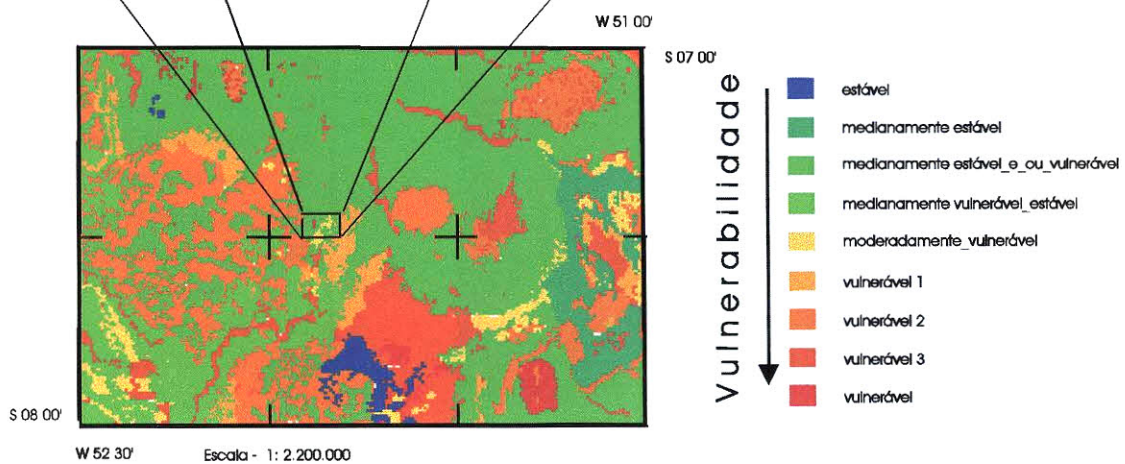
Fig. 7.7 - (a) Mapa temático de Geomorfologia.
 (b) Grade regular com os valores médios nas *utbs* para o tema Geomorfologia.
 (c) Mapa temático de vulnerabilidade das *utbs* relativa ao tema Geomorfologia.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7.8 - (a) Mapa temático de Solos.

(b) Grade regular com os valores médios nas *utbs* para o tema Solos.(c) Mapa temático de vulnerabilidade das *utbs* relativa ao tema Solos.

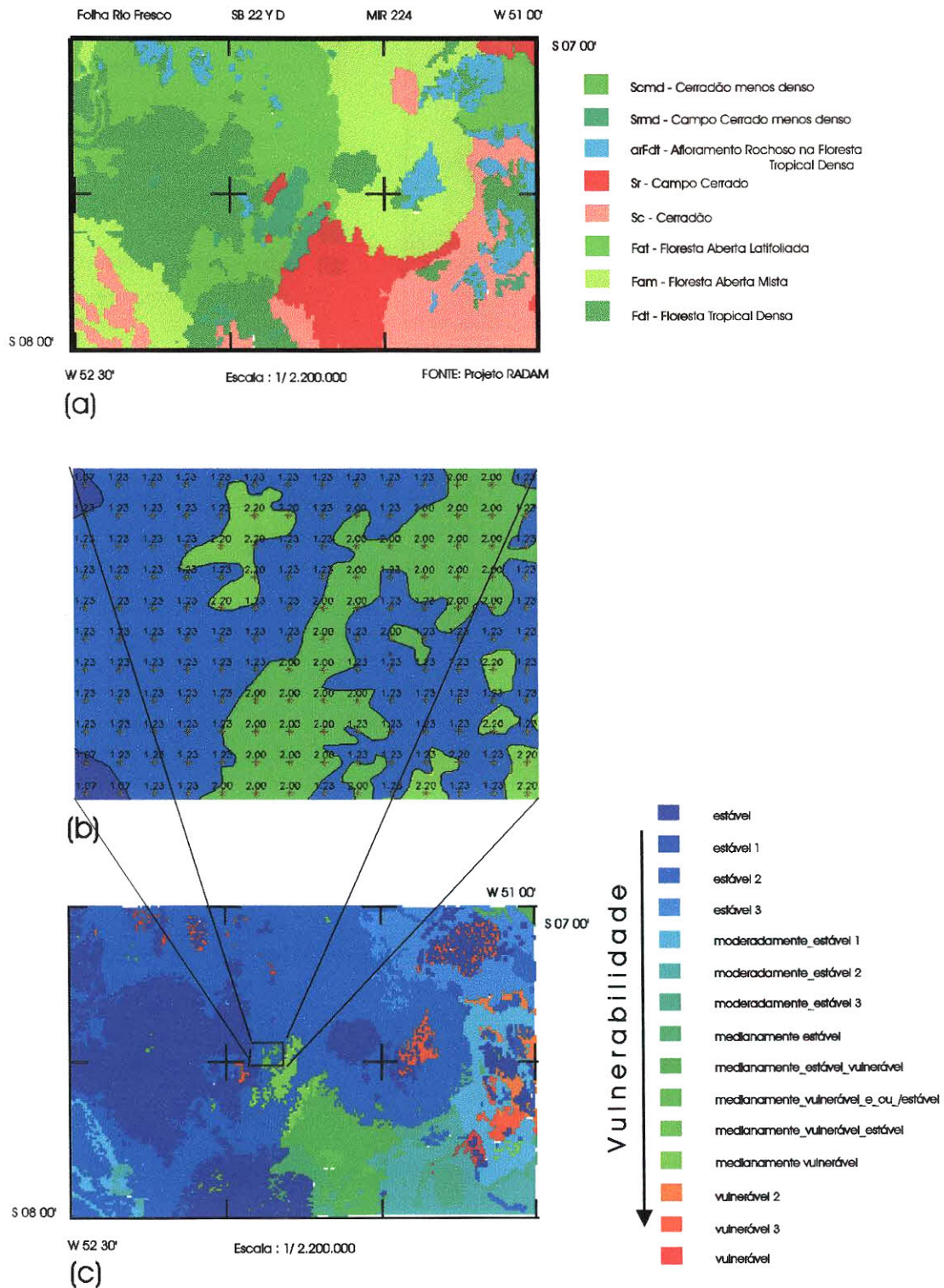


Fig. 7.9 - (a) Mapa temático de Vegetação.

(b) Grade regular com os valores médios nas *utbs* para o tema Vegetação.

(c) Mapa temático de vulnerabilidade das *utbs* relativa ao tema Vegetação.

Finalmente a Figura 7.11 mostra o mapa temático de vulnerabilidade natural à erosão obtido a partir de uma *operação pontual de fatiamento* efetuada sobre a grade de vulnerabilidade da Figura 7.10.

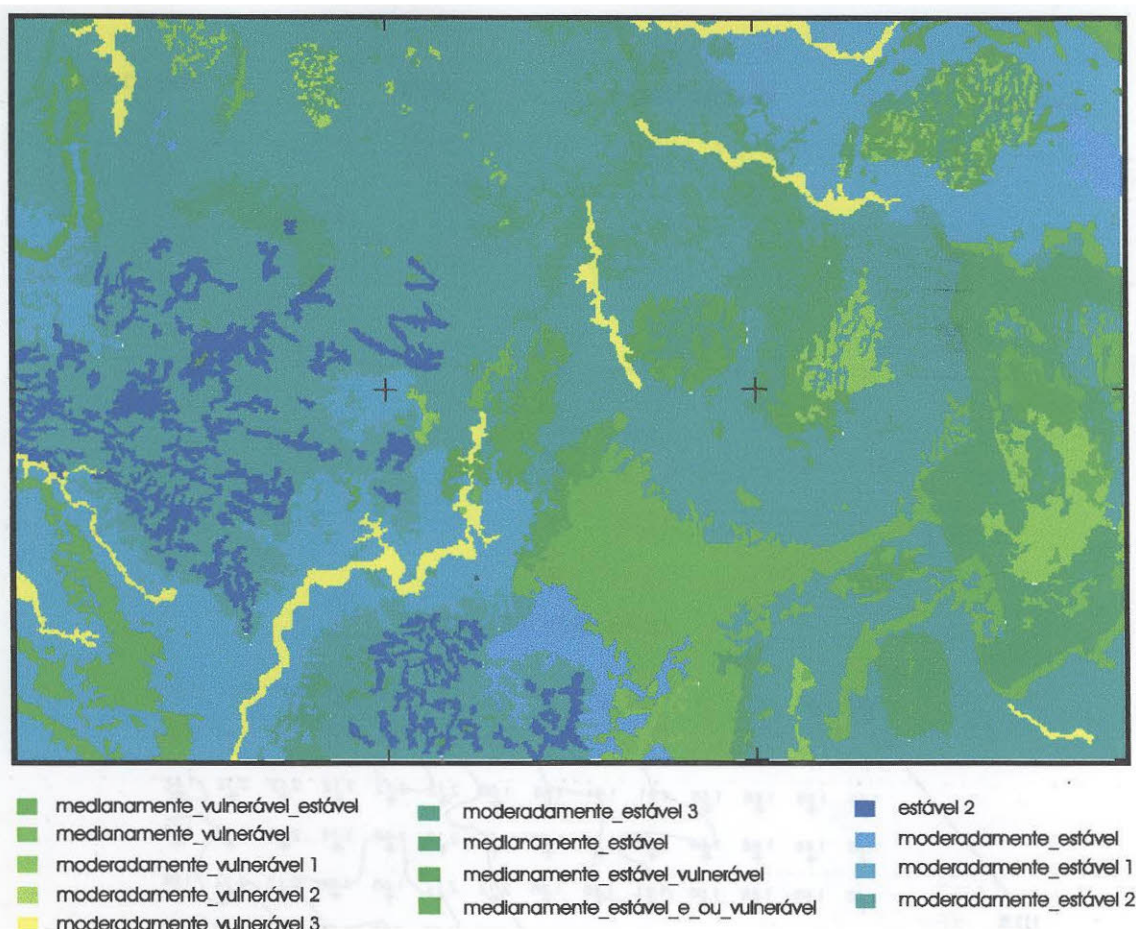


Fig. 7.11 - Mapa temático de Vulnerabilidade natural à erosão

A Tabela 7.4 a seguir mostra a caracterização temática das unidades territoriais básicas feitas pela equipe do projeto ZEE no INPE. Mostra também a nota atribuída a cada unidade em cada tema, tanto pelo processo manual quanto pela linguagem. A listagem completa do programa em LEGAL usado na geração do exemplo está no Apêndice 2.

TABELA 7.4 – VALORES DE VULNERABILIDADE DE CADA UNIDADE AMBIENTAL, PROCESSO MANUAL “M” E PELA LINGUAGEM “L”

Unid	Geologia	Valor		Solos	Valor		Relevo	Valor		Vegetação	Valor		Média	
		M	L		M	L		M	L		M	L	M	L
U1	Fm. Gorotire: Arenitos Conglomeráticos a Finos	2,6	2,42	Solos Litólicos Afloram. Rochosos	3,0	2,93	Superfície Tabular Dissecção Baixa	1,1	1,26	Campo Cerrado Menos Denso	2,2	1,96	2,2	2,14
U2	Fm. Gorotire: Arenitos Conglomeráticos a Finos	2,6	2,60	Solos Litólicos Afloram. Rochosos	3,0	3,00	Superfície Pediplanada Dissecção Baixa a Média	1,3	1,21	Campo Cerrado	2,0	1,99	2,2	2,20
U3	Fm. Gorotire: Arenitos Conglomeráticos a Finos	2,6	2,60	Solos Litólicos Afloram. Rochosos	3,0	2,67	Superfície Tabular Dissecção Baixa a Média	1,3	1,39	Campo Cerrado	2,0	1,74	2,2	2,10
U4	Granito da Serra do Carajas	1,3	1,30	Solos Litólicos Afloram. Rochosos	3,0	2,99	Ravinhas Dissecção Alta	2,3	2,21	Campo Cerrado - Menos Denso	2,2	1,92	2,2	1,86
U5	Fm. Iiriri: Riólitos, Ignimbritos, Piroclastos, Granofiros	1,0	1,42	Solos Litólicos	3,0	2,80	Tabuleiros Dissecção Média a Alta	1,4	1,52	Campo Cerrado - Menos Denso	2,2	2,20	1,9	1,99
U6	Fm. Gorotire: Arenitos Conglomeráticos a Finos	2,6	2,14	Afloramentos Rochosos	3,0	2,92	Superfície Tabular Dissecção Baixa a Média	1,3	1,40	Cerradão	1,7	1,62	2,2	2,02
U7	Fm. Sobreiro: Andesitos Pórfiros e Porfíritos	1,9	1,65	Afloramentos Rochosos	3,0	2,99	Colinas aplainadas Dissecção Baixa a Média	1,4	1,77	Afl. Rochoso Ecosistema Floresta tropical aberta	3,0	3,00	2,3	2,35
U8	Fm. Iiriri: Riólitos, Ignimbritos, Piroclastos, Granofiros	1,0	1,00	Afloramentos Rochosos	3,0	2,98	Tabuleiros Dissecção Média a Alta	1,4	1,49	Campo Cerrado - Menos Denso	2,2	2,13	1,9	1,90
U9	Fm. Gorotire: Arenitos Conglomeráticos a Finos	2,6	2,60	Solos Litólicos	3,0	2,68	Cristas e Ravinas Dissecção Alta	2,4	1,41	Cerradão - Menos Denso	1,8	1,51	2,4	2,05
U10	Grupo Grão - Pará: Quartzitos, Jaspelitos, Hematíticos	1,4	1,43	Podzólico Vermelho Amarelo	2,0	2,00	Cristas Estruturais Dissecção Alta	2,5	2,49	Floresta Tropical Densa	1,0	1,03	1,7	1,74
U11	Fm. Sobreiro: Andesitos Pórfiros e Porfíritos	1,9	1,30	Solos Litólicos	3,0	3,00	Colinas aplainadas Dissecção Média a Alta	1,2	1,14	Campo Cerrado - Menos Denso	2,2	2,2	2,0	1,91
U12	Fm. Sobreiro: Andesitos Pórfiros e Porfíritos	1,9	2,02	Terra roxa 60% Podzólico Verm. Am. 30% Latos. ver. Am. 10%	1,9	2,13	Terraço Fluvial	1,0	1,03	Campo Cerrado - Menos Denso	2,2	2,20	1,8	1,84
U13	Fm. Iiriri: Riólitos, Ignimbritos, Piroclastos, Granofiros	1,0	1,04	Solos Litólicos	3,0	2,89	Tabuleiros Dissecção Média a Alta	1,4	1,40	Floresta Tropical Densa	1,0	1,07	1,6	1,60
U14	Fm. Iiriri: Riólitos, Ignimbritos, Piroclastos, Granofiros	1,0	1,00	Podzólico Verm. Amarelo	2,0	2,00	Superfície Pediplanada Dissecção Baixa	1,1	1,10	Floresta Tropical Densa	1,0	1,06	1,3	1,29
U15	Fm. Gorotire: Arenitos Conglomeráticos a Finos	2,6	2,32	Solos Litólicos Afloram. Rochosos	3,0	2,97	Superfície Tabular Dissecção Abaixa	1,1	1,22	Campo Cerrado	2,0	1,96	2,2	2,11

TABELA 7.4 - Continuação

Unid	Geologia	Valor		Solos	Valor		Relevo	Valor		Vegetação	Valor		Média	
		M	L		M	L		M	L		M	L	M	L
U16	F.Gorotire: Arenitos, Conglomeráticos a Finos	2,6	2,50	Solos Litólicos	3,0	3,00	Superfície Tabular Dissecção Média a Alta	1,4	1,29	Campo Cerrado	2,0	2,00	2,3	2,20
U17	Aluvião	3,0	2,99	Solos Aluviais	3,0	2,94	Planície Aluvial	3,0	3,00	Floresta Tropical Densa	1,0	1,26	2,5	2,55
U18	C. Xingu: Gran., Gnaiss-Migmatitos	1,5	1,38	Podzólico Verm. Amarelo	2,0	2,17	Superfície Pediplanada Diss. Baixa	1,1	1,44	Floresta tropical aberta	1,3	1,24	1,5	1,56
U19	C. Xingu: Gran., Gnaiss. Migmatitos	1,5	1,50	Latosolo Verm. Amarelo	1,0	1,00	Superfície Pediplanada Dissecção Baixa a Média	1,3	1,25	Cerradão	1,7	1,90	1,3	1,41
U20	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,42	Solos Litólicos Afloram. Rochosos	3,0	2,87	Cristas Dissecção Média a Alta	2,4	2,40	Floresta Tropical Densa	1,0	1,05	1,9	1,93
U21	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,38	Podzólico Vermelho Amarelo	2,0	2,82	Tabuleiros Dissecção Baixa a Média	1,2	1,83	Floresta Tropical Densa	1,0	1,04	1,4	1,77
U22	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,49	Afloramento Rochoso	3,0	3,00	Inselbergs Dissecção Média a Alta	2,2	2,20	Afl. Roch. no Ecosistema Floresta trop. Densa	3,0	2,94	2,4	2,41
U23	F.Gorotire Arenitos Conglomeráticos a Finos	2,6	2,43	Afloramento Rochosos	3,0	2,89	Superfície Tabular Dissecção Média	1,3	1,22	Afl. Roc. no Ecosistema Floresta trop. Densa	3,0	2,96	2,5	2,38
U24	F. Rio Fresco Argilitos, Folhelhos, Arcosios	2,7	2,72	Solos Litólicos	3,0	3,00	Superfície Pediplanada Diss. Baixa	1,1	1,26	Campo Cerrado Menos Denso	2,2	2,20	2,3	2,30
U25	Fm. Sobreiro: Andesitos Pórfiros e Porfíricos	1,9	1,90	T. Roxa 60% Podzólico Verm. Am. 30% Latos. ver. Am. 10%	1,9	2,01	Colinas e Inselbergs Dissecção Baixa	1,7	1,90	Floresta tropical aberta, Influência de Água	1,5	1,27	1,8	1,77
U26	Fm. Sobreiro: Andesitos Pórfiros e Porfíricos	1,9	1,90	T. Roxa 60% Podzólico Verm. Am. 30% Latos. ver. Am. 10%	1,9	2,05	Colinas aplainadas Dissecção Baixa a Média	1,2	1,54	Floresta tropical aberta	1,3	1,23	1,6	1,68
U27	Fm. Sobreiro: Andesitos Pórfiros e Porfíricos	1,9	1,90	T. Roxa 60% Podzólico Verm. Am. 30% Latos. ver. Am. 10%	1,9	2,05	Colinas e Inselbergs Dissecção Baixa	1,7	2,05	Floresta tropical aberta	1,3	1,28	1,7	1,82
U28	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,70	Afloramento Rochoso	3,0	2,80	Superfície Tabular Dissecção Média a Alta	1,6	1,19	Afl. Roc. no Ecosistema Floresta trop. Densa	3,0	3,00	2,2	2,17
U29	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,30	Afloramento Rochoso	3,0	2,92	Cristas Dissecção Média a Alta	2,4	2,18	Afl. Roc. no Ecosistema Floresta trop. Densa	3,0	3,00	2,4	2,35
U30	Grupo Grão Pará Quartzitos, Jaspelitos, Hematíticos	1,4	1,40	Afloramento Rochoso	3,0	2,99	Cristas Dissecção Média	2,1	2,36	Campo Cerrado Menos Denso	2,2	1,94	2,2	2,17

TABELA 7.4 - Continuação

Unid	Geologia	Valor		Solos	Valor		Relevo	Valor		Vegetação	Valor		Média	
		M	L		M	L		M	L		M	L	M	L
U31	Grupo Grão Pará Quartzitos, Jaspelitos, Hematíticos	1,4	1,40	Solos Litólicos	3,0	2,85	Cristas Estruturais Dissecação Alta	2,3	2,02	Campo Cerrado	2,0	1,97	2,2	2,06
U32	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,31	Aflora- mento Rochoso	3,0	2,94	Cristas e Tabuleiros Dissecação Média a Alta	2,1	2,34	Afloram. Rochoso no Ecosistema Floresta trop. Densa	3,0	3,00	2,4	2,40
U33	Grupo Grão Pará Quartzitos, Jaspelitos, Hematíticos	1,4	1,33	Solos Litólicos	3,0	3,00	Inselbergs Dissecação Média a Alta	2,2	2,20	Floresta Tropical Densa	1,0	1,10	1,9	1,91
U34	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,30	Solos Litólicos	3,0	2,84	Inselbergs Dissecação Média a Alta	2,2	2,16	Floresta Tropical Densa	1,0	1,09	1,9	1,85
U35	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,48	Solos Litólicos	3,0	2,68	Superfície Pediplanada Dissecação Baixa	1,1	1,49	Floresta Tropical Densa	1,0	1,12	1,6	1,69
U36	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,59	Aflora- mento Rochoso	3,0	2,66	Mesas Dissecação Baixa a Média	1,2	1,27	Afloram. Rochoso no Ecosiste-ma Floresta trop. Densa	3,0	2,59	2,1	2,15
U37	Compl. Xingu: Gran., Gnaiss.- Migmatitos	1,5	1,63	Solos Litólicos	3,0	3,00	Superfície Pediplanada Diss. Baixa	1,1	1,15	Cerradão	1,7	1,70	1,8	1,87
U38	Fm. Gorotire; Arenitos Conglomerá- ticos a Finos	2,6	2,42	Aflora- mento Rochosos	3,0	2,90	Superfície Tabular Dissecação Média	1,3	1,28	Afloram. Rochoso no Ecosistema Floresta trop. Densa	3,0	2,86	2,5	2,37
U39	Compl. Xingu: Gran., Gnaiss.- Migmatitos	1,5	1,48	Podzolico Vermelho Amarelo	2,0	2,00	Superfície Pediplanada Diss. Média	1,3	1,11	Floresta Tropical Aberta	1,3	1,20	1,3	1,45
U40	Granito Velho Guilherme	1,2	1,20	Aflora- mento Rochosos	3,0	3,00	Cristas Estruturais Dissecação Alta	2,5	2,22	Afloram. Rochoso no Ecosistema Floresta trop. Densa	3,0	3,00	2,4	2,36
U41	Grupo GrãoPará Quartzitos, Jaspelitos, Hematíticos	1,4	1,51	Aflora- mento Rochoso	3,0	3,00	Cristas Estruturais Dissecação Alta	2,5	1,22	Afloram. Rochoso no Ecosistema Floresta trop. Densa	3,0	3,00	2,5	2,18
U42	Fm. Iriri: Riolitos, Ignim- britos, Piroclazi- -tos, Granofiros	1,0	1,53	Solos Litólicos	3,0	2,64	Cristas e Tabuleiros Dissecação Média a Alta	2,1	2,32	Campo Cerrado	2,0	2,00	2,0	2,12
U43	Granito Velho Guilherme	1,2	1,20	Podzolico Vermelho Amarelo	2,0	2,0	Cristas Estruturais Dissecação Alta	2,5	2,50	Floresta Tropical Densa	1,0	1,03	1,7	1,68
U44	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,51	Solos Litólicos	3,0	2,83	Cristas Dissecação Média a Alta	2,4	2,40	Floresta Tropical Densa	1,0	1,22	1,9	1,99
U45	Grupo Grão Pará Quartzitos, Jaspelitos, Hematíticos	1,4	1,47	Solos Litólicos	3,0	2,80	Ravinas Dissecação Alta	2,5	2,50	Cerradão	1,7	1,71	2,2	2,12
U46	Fm. Iriri: Riolitos, Ignim- britos, Piroclazi- -tos, Granofiros	1,0	1,03	Solos Litólicos	3,0	2,72	Colinas e Cristas Dissecação Média	1,9	2,25	Floresta Tropical Densa	1,0	1,02	1,7	1,75

TABELA 7.4 - Conclusão

Unid	Geologia	Valor		Solos	Valor		Relevo	Valor		Vegetação	Valor		Média	
		M	L		M	L		M	L		M	L	M	L
U47	F. Sobreiro: Andesitos Pórfiros e Porfíricos	1,9	1,45	Afloramento Rochosos	3,0	2,92	Superfície Tabular Dissecação Baixa a Média	1,3	1,31	Afloramento Rochoso no Ecosistema Floresta trop. Densa	3,0	3,00	2,2	2,17
U48	Fm. Gorotire: Arenitos Con- glomeráticos a Finos	2,6	2,60	Solos Litólicos	3,0	2,70	Ravinas Dissecação Alta	2,5	2,50	Cerradão	1,7	1,68	2,5	2,37
U49	Formação. Sobreiro: Andesitos Pórfiros e Porfíricos	1,9	1,90	Terra roxa 60% Podzólico Verm. Am. 30% Latos. ver. Am. 10%	1,9	2,00	Inselbergs Dissecação Alta	2,4	2,08	Floresta tropical aberta	1,3	1,30	1,9	1,82
U50	Grupo GrãoPará Quartzitos, Jaspelitos, Hematíticos	1,4	1,42	Solos Litólicos	3,0	2,73	Escarpa Dissecação Alta	2,7	2,7	Floresta Tropical Densa	1,0	1,06	2,0	1,98
U51	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,30	Solos Litólicos	3,0	3,00	Superfície pediplanada Dissecação Baixa a Média	1,2	1,20	Floresta Tropical Densa	1,0	1,00	1,6	1,63
U52	Fm. Gorotire: Arenitos Con- glomeráticos a Finos	2,6	2,54	Solos Litólicos	3,0	2,98	Superfície Tabular Dissecação Média	1,3	1,30	Floresta Tropical Densa	1,0	1,01	2,0	1,96
U53	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,60	Solos Litólicos	3,0	3,00	Escarpa Dissecação Alta	2,7	2,70	Floresta Tropical Densa	1,0	1,00	2,0	2,07
U54	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,30	Sol. Litólicos e Afloramentos Rochosos	3,0	3,00	Coíbas Dissecação Baixa a Média	1,8	1,80	Floresta Tropical Densa	1,0	1,00	1,8	1,80
U55	F. Rio Fresco Argilitos, Folhelhos, Arcosios	2,7	2,35	Latosolo Ver. Am. 60% Gley Pouco Humido 10%	1,8	1,86	Superfície pediplanada Dissecação Baixa	1,1	1,47	Cerradão	1,7	1,56	1,8	1,81
U56	Complexo Xingu: Gran., Gnaiss.- Migmatitos	1,5	1,60	Podzólico Vermelho Amarelo	2,0	2,07	Superfície Pediplanada Diss. Baixa	1,1	1,18	Cerradão	1,7	1,69	1,6	1,63
U57	Com. Xingu: Gran., Gnaiss.- Migmatitos	1,5	1,45	Podzólico Vermelho Amarelo	2,0	2,10	Superfície Pediplanada Diss. Baixa	1,1	1,52	Floresta Tropical Aberta	1,3	1,31	1,5	1,59
U58	Granito da Serra de Carajás	1,3	1,30	Afloramentos Rochosos	3,0	3,00	Inselbergs Dissecação Média a Alta	2,2	2,20	Afl. Rochoso no Ecosistema Floresta tropical	3,0	3,00	2,4	2,40
U59	F. Gorotire: Arenitos Con- glomeráticos a Finos	2,6	2,27	Solos Litólicos	3,0	2,80	Escarpa Dissecação Média a Alta	2,2	2,20	Floresta Tropical Densa	1,0	1,02	2,2	2,07
U60	Granito Velho Guilherme	1,2	1,20	Podzólico Vermelho Amarelo	2,0	2,00	Inselbergs Dissecação Média a Alta	2,2	2,20	Floresta Tropical Densa	1,0	1,12	1,5	1,63
U61	Grupo GrãoPará Quartzitos, Jaspelitos, Hematíticos	1,4	1,40	Afloramentos Rochosos	3,0	2,92	Cristas Dissecação Média	2,1	2,18	Afloramento Rochoso no Ecosistema Floresta tropical Densa	3,0	2,83	2,4	2,34

7.2.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na primeira comparação entre os resultados obtidos através da linguagem e os resultados disponíveis, percebeu-se que o número de unidades com valores discrepantes era significativo.

Após uma análise das unidades com maiores discrepâncias absolutas (até 100%), e de informações fornecidas pela equipe responsável pelo projeto ZEE no INPE, chegou-se à conclusão de que as principais causas das discrepâncias eram:

- Falta de atualização dos dados temáticos no formato digital. Durante a elaboração da carta de vulnerabilidade pelo processo manual foram feitas atualizações dos dados temáticos a partir da análise e interpretação das imagens multi-espectrais do sensor TM/LANDSAT.
- Alterações no valor da nota atribuída a algumas classes dos temas. Por exemplo, a classe *campo cerrado* do tema vegetação recebeu nota 2,0 no processo manual realizado em 1995, mas com o refinamento do modelo este valor foi alterado para 2,3. Já a classe *Grupo Grão-Pará* do tema geologia teve sua nota alterada de 1,4 para 1,6.

Para que a comparação tivesse como base um mesmo referencial, optou-se por fazer uma atualização dos dados temáticos para as unidades que apresentaram maiores discrepâncias e por utilizar as mesmas notas do processo manual.

Efetuada as alterações comentadas no parágrafo anterior e considerando o processo manual como referência chegou-se aos percentuais de discrepâncias apresentados e comentados a seguir.

A Tabela 7.5 mostra o percentual de discrepância entre as notas de cada tema para cada unidade territorial básica. Mostra também a discrepância entre as notas médias atribuídas a cada unidade. Por exemplo, para a unidade U1 têm-se a seguinte situação:

- Tema geologia 7% notas \Rightarrow manual = 2,6, linguagem = 2,42
- Tema Solos 2% notas \Rightarrow manual = 3,0 linguagem = 2,93
- Tema Relevo -15% notas \Rightarrow manual = 1,1 linguagem = 1,26
- Tema Vegetação 11% nota \Rightarrow manual = 2,2 linguagem = 1,96

Discrepância final \Rightarrow 4%

Média manual \Rightarrow 2,2 (medianamente vulnerável)

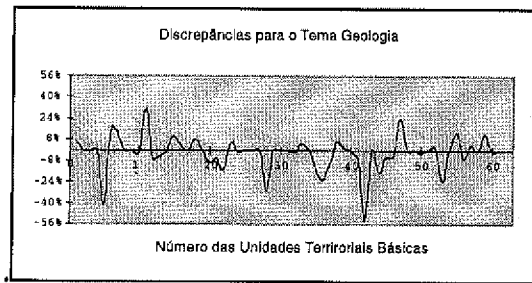
Média linguagem \Rightarrow 2,14 (medianamente vulnerável-estável)

TABELA 7.5 - PERCENTUAIS DE DISCREPÂNCIAS ENTRE PROCESSO MANUAL E LINGUAGEM

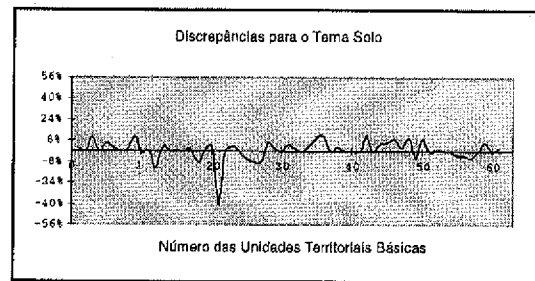
Unidades	Geologia	Solos	Relevo	Vegetação	Vulnerabilidade
U1	7%	2%	-15%	11%	4%
U2	0%	0%	7%	1%	1%
U3	0%	11%	-7%	13%	6%
U4	0%	0%	4%	13%	15%
U5	-42%	7%	-9%	0%	-5%
U6	18%	3%	-8%	5%	6%
U7	13%	0%	-26%	0%	-1%
U8	0%	1%	-6%	3%	0%
U9	0%	11%	41%	16%	16%
U10	-2%	0%	0%	-3%	-1%
U11	32%	0%	5%	0%	8%
U12	-6%	-12%	-3%	0%	-5%
U13	-4%	4%	0%	-7%	0%
U14	0%	0%	0%	-6%	-1%
U15	11%	1%	-11%	2%	3%
U16	4%	0%	8%	0%	2%
U17	0%	2%	0%	-26%	-2%
U18	8%	-9%	-31%	5%	-6%
U19	0%	0%	4%	-12%	-3%
U20	-9%	4%	0%	-5%	0%
U21	-6%	-41%	-53%	-4%	-29%
U22	-15%	0%	0%	2%	-1%
U23	7%	4%	6%	1%	4%
U24	-1%	0%	-15%	0%	-2%
U25	0%	-6%	-12%	15%	-1%
U26	0%	-8%	-28%	5%	-7%
U27	0%	-8%	-21%	2%	-7%
U28	-31%	7%	26%	0%	2%
U29	0%	3%	9%	0%	3%
U30	0%	0%	-12%	12%	0%
U31	0%	5%	12%	2%	5%

U32	-1%	2%	-11%	0%	-2%
U33	5%	0%	0%	-10%	-1%
U34	0%	5%	2%	-9%	1%
U35	-14%	11%	-35%	-12%	-6%
U36	-22%	11%	-6%	14%	-1%
U37	-9%	0%	-5%	0%	-2%
U38	7%	3%	2%	5%	4%
U39	1%	0%	15%	8%	5%
U40	0%	0%	11%	0%	3%
U41	-8%	0%	51%	0%	12%
U42	-53%	12%	-10%	0%	-5%
U43	0%	0%	0%	-3%	0%
U44	-16%	6%	0%	-22%	-3%
U45	-5%	7%	0%	-1%	1%
U46	-3%	9%	-18%	-2%	-1%
U47	24%	3%	-1%	0%	6%
U48	0%	10%	0%	1%	3%
U49	0%	-5%	13%	0%	3%
U50	-1%	9%	0%	-6%	2%
U51	0%	0%	0%	0%	0%
U52	2%	1%	0%	-1%	1%
U53	-23%	0%	0%	0%	-3%
U54	0%	0%	0%	0%	-1%
U55	13%	-3%	-34%	8%	1%
U56	-7%	-3%	-7%	1%	-3%
U57	3%	-5%	-38%	-1%	-8%
U58	0%	0%	0%	0%	-1%
U59	13%	7%	0%	-2%	6%
U60	0%	0%	0%	-12%	-2%
U61	0%	3%	-4%	6%	1%

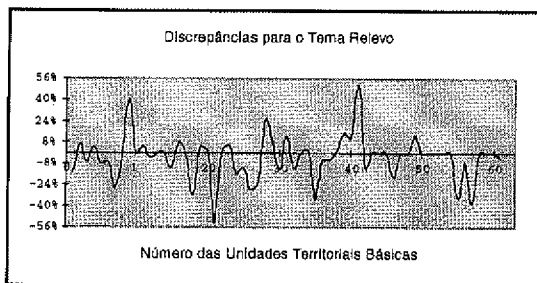
A Figura 7.12 apresenta de forma gráfica os dados da Tabela 7.5.



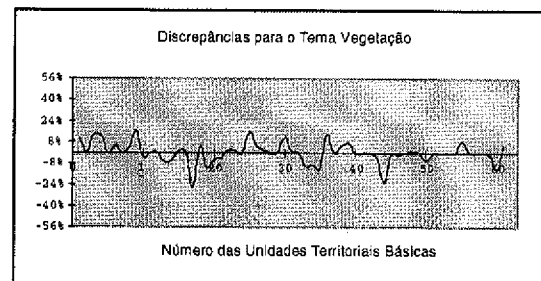
(a)



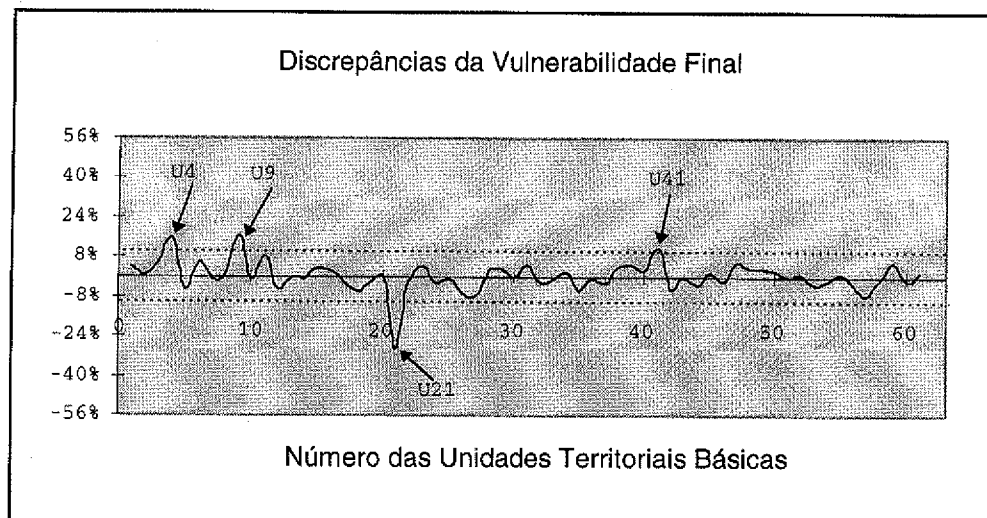
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 7.12 - Representação Gráfica das Discrepâncias entre o Processo Manual e a Linguagem

Pelo gráfico da Figura 7.10 (e) verifica-se que apenas quatro (U4,U9,U21,U41) das sessenta e uma unidades apresentaram um índice de discrepância maior do que 10%.

• U4

Discrepância	⇒	15%
Média manual	⇒	2,2 (medianamente vulnerável)
Média linguagem	⇒	1,86 (medianamente estável)

• U9

Discrepância	⇒	16%
Média manual	⇒	2,4 (moderadamente vulnerável 2)
Média linguagem	⇒	2,05 (medianamente estável_e_ou_vulnerável)

• U21

Discrepância	⇒	-29%
Média manual	⇒	1,4 (moderadamente estável)
Média linguagem	⇒	1,77 (moderadamente estável 3)

• U41

Discrepância	⇒	12%
Média manual	⇒	2,5 (moderadamente vulnerável 3)
Média linguagem	⇒	2,18 (medianamente vulnerável-estável)

Se fizermos uma reclassificação das 21 classes de vulnerabilidade definidas pela metodologia em 5 grupos; *Vulnerável*, *Moderadamente Vulnerável*, *Medianamente Estável/Vulnerável*; *Moderadamente Estável* e *Estável*, somente as unidade U9 e U41 tiveram suas posições alteradas de grupo. Apesar de a unidade U21 apresentar a maior discrepância, ela manteve-se no mesmo grupo, devido ao fato da média pelo processo manual estar no início do intervalo do grupo *Moderadamente Vulnerável* e a discrepância ocorrer em direção ao centro do intervalo.

As contagens das discrepâncias maiores que 10% e 25 % em cada tema são apresentadas nos gráficos a seguir.

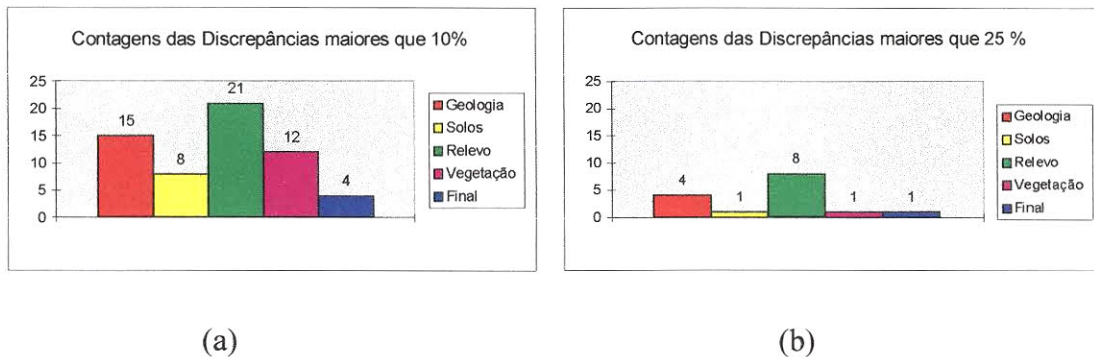


Fig. 7.13 - Contagens das Discrepâncias absolutas em cada tema

As seguintes considerações podem ser feitas a partir da Figura 7.13:

- Em função de neste trabalho a nota de cada unidade em cada tema resultar de uma média ponderada pela área das classes presentes na unidade, discrepâncias eram esperadas.
- A utilização direta dos dados digitalizados a partir de cartas temáticas do projeto RADAMBRASIL não se mostrou confiável, e a atualização feita neste trabalho para teste, foi insuficiente.

⇒**Obs:** A consideração de que a utilização direta dos dados do Projeto RADAMBRASIL não se mostrou confiável neste trabalho, e de que estes dados devem ser atualizados a partir das imagens multi-espectrais do sensor TM/LANDSAT, baseia-se no fato da maior resolução espectral, espacial e temporal do sensor TM em relação ao sensor radar banda “X” do projeto RADAMBRASIL.

Uma análise das unidades com discrepâncias absolutas maiores do que 25% em cada tema, permite afirmar, que neste caso, a causa está na diferença de caracterização temática entre a interpretação visual e os dados do RADAMBRASIL. Este problema é mais acentuado para o tema geomorfologia, onde não existe critérios padronizados de classificação.

Uma análise da unidade com maior discrepância em cada tema, mostra claramente este fato.

⇒ Tema <u>Geologia</u>	Maior discrepância	Unidade 42
Processo manual	pEia	nota = 1,0
RADAM digitalizado	pEγc + Qa,Qc	nota = 1,3 e 3,0
⇒ Tema <u>Solos</u>	Maior discrepância	Unidade 21
Processo manual	PB1	nota = 2,0
RADAM digitalizado	R1	nota = 3,0
⇒ Tema <u>Relevo</u>	Maior discrepância	Unidade 21
Processo manual	Sept	nota = 1,2
RADAM digitalizado	dk	nota = 2,4
⇒ Tema <u>Vegetação</u>	Maior discrepância	Unidade 17
Processo manual	Fdt	nota = 1,0
RADAM digitalizado	Fam+Fal	notas = 1,2 e 1,3

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho discutiu os aspectos de concepção, implementação e uso dos operadores da Álgebra de Mapas, e abordou três etapas do fluxo¹ dos dados no processo de conversão de dados geográficos em informações geográficas: a modelagem, a manipulação e a extração de informações através de uma aplicação. Com esta abordagem, esperamos ter contribuído para apresentar uma visão integrada do problema.

8.1 - CONCLUSÕES

Com relação as questões de modelagem, os seguintes aspectos são importantes:

- A continuidade espacial presente na maioria das variáveis ambientais permite a definição da entidade conceitual *geo-campo*, a qual é definida em todas as posições da área de estudo e cujas propriedades são funções de suas coordenadas espaciais.
- A *espacialização* do conjunto de amostras de uma variável ambiental para fins de análise dá uma descrição mais realista de seu comportamento espacial, revelando características que dificilmente seriam percebidas pelo usuário quando estas amostras são apresentadas na forma tabular.
- A *autocorrelação* espacial presente entre os valores de uma variável ambiental, e a *correlação cruzada* existente entre as diferentes grandezas relativas a uma mesma área geográfica engendram a definição de um conjunto de operadores de manipulação de geo-campos, associados ao termo “Álgebra de Mapas”.

¹A Figura 2.2, página 15 ilustra as etapas deste fluxo.

- Na visão apresentada neste trabalho, a Álgebra de Mapas foi definida como um conjunto de operadores associados ao processamento da entidade conceitual *geo-campo*.
- A natureza discreta da representação de dados em computadores permite considerar seis representações geométricas para geo-campo: *grade regular de células, regiões contíguas, grade triangular, isolinhas, grade regular de pontos e amostras irregulares*. Cada representação geométrica incorpora características próprias, que a torna mais adequada para descrever um determinado tipo de processo ambiental.

Com relação aos processos de manipulação de dados geográficos, as seguintes questões merecem destaque:

- Ao programar as operações conceituais da Álgebra de Mapas em computadores, é necessário considerar as características das diferentes representações geométricas associadas aos geo-campos e os interpoladores usados para conversão entre estas representações.
- Para implementar a Álgebra de Mapas, é imprescindível dispor de uma linguagem de comandos com sintaxe e semântica apropriadas para o tratamento de dados geográficos, e que permita automatizar roteiros de manipulação.

Da extração de informações, através do exemplo de manipulação em LEGAL apresentado no Capítulo 7, pode-se tirar as seguintes conclusões.

- É viável a utilização da linguagem LEGAL não só para automatizar as etapas de manipulação de dados geográficos no ambiente do sistema SPRING, mas também para documentar estas etapas, pois, a listagem com a sequência de operações é de fácil leitura.
- A execução do roteiro metodológico exigiu a manipulação de todos os dados, tanto na forma analógica (papel), para conversão para o formato digital,

quando na forma digital, para utilização na linguagem LEGAL. A organização dos dados e o acesso às informações são extremamente facilitados no formato digital.

- Os resultados obtidos em manipulações automatizadas, são a princípio mais sensíveis à qualidade dos dados de entrada, devido a menor interação do usuário durante o processo de manipulação. Em função disto, a possibilidade de se gerar resultados intermediários durante uma manipulação automatizada, é importante para permitir a avaliação de eventuais erros.
- A utilização direta de dados digitalizados a partir de cartas temáticas do projeto RADAMBRASIL, não se mostrou confiável, devido a pequena acurácia destes dados provenientes de um sistema sensor de baixa resolução espectral, espacial e temporal. A atualização destes dados, a partir de sistemas sensores de tecnologia mais recente, é essencial para uma melhor qualidade dos dados.

8.2 - SUGESTÕES

Para que a linguagem LEGAL venha a satisfazer os objetivos de sua proposta, ou seja, tornar-se um ambiente geral para análise geográfica, é necessário, entre outras coisas, que as limitações discutidas no Capítulo 5, e que não foram resolvidas por este trabalho, sejam eliminadas.

Adicionalmente sugere-se que as seguintes extensões na linguagem sejam avaliadas:

- Conversão automática entre as representações geométricas dos dados, com o objetivo de torná-las transparentes para o usuário.
- Possibilidade de interação, quando desejado, para definir o tipo de interpolação a ser utilizado na conversão, em função das necessidades do usuário.

- Definição genérica de um conjunto de regiões, onde por exemplo um plano de informação defina todas as regiões usadas em um operador zonal. Esta implementação evitaria a necessidade de especificação explícita de cada região, como no caso do operador de média zonal das unidades territoriais básicas usadas no exemplo de manipulação em LEGAL do Capítulo 7.
- Com o objetivo de refinar a sintaxe e a semântica da linguagem, sugere-se a execução de outros roteiros de manipulação, com domínios diferentes usando a linguagem LEGAL. Por exemplo, modelos hidrológicos, modelos ecológicos, etc.
- Para facilitar a curva de aprendizado de novos usuários, seria extremamente útil dispor de uma interface de manipulação direta para a construção interativa de um programa em LEGAL. Esta interface ofereceria mecanismos de seleção e arrasto (*drag-and-drop*) e permitiria construir os programas da LEGAL através de um diagrama de fluxo de dados.
- Numa etapa seguinte, vale a pena considerar a extensão da linguagem no sentido de tratar campos vetoriais, como por exemplo, campos de vento com magnitude e direção associados a cada posição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abler, R.; Adams, J; Gould, P. **Spatial organization: the geographer's view of the world**. 2.ed. London, Prentice-Hall International, 1972, 587p.
- Aronoff, S. **Geographic information systems: A management perspective**. Ottawa, WDL, 1989, 295p.
- Becker, B.K.; Egler, C.A.G. **Detalhamento da metodologia para execução do zoneamento ecológico-econômico pelos Estados da Amazônia Legal**. Rio de Janeiro/Brasília, (SAE-MMA), 1996.
- Berry, J.K. Fundamental operations in computer-assisted map analysis. **International journal of geographical information systems**, 1 (2): 119-136, 1987.
- Berry, J.K. Gis in Island Resource Planning: A case study in map analysis. In: Maguire, D.; Goodchild, M.; Rhind, D. ed. **Geographical information systems: Principles and applications**. New York, John Wiley and Sons, 1991, p. 285-295.
- Berry, J.K. Cartographic modeling: The analytical capabilities of GIS. In: Goodchild, M.; Parks, B.O., Steyaert, L.T. **Environmental modeling with GIS**. Oxford, Oxford University Press, 1993, p. 58-74.
- Bonham-Carter, G.F. **Geographical information systems for geoscientists: Modelling with GIS**. New York, 1996 398p. (Computer methods in the geosciences, V. 13)
- Burrough, P.A. **Principles of geographical information systems for land resources assesment**. Oxford, Clarendon Press, 1987.
- Câmara Neto, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos**. (Tese de Doutorado em computação aplicada). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.
- Casti, P.L. **Alternate Realities: mathematical models of nature and man**. New York, John Wiley & Sons, 1989.
- Cliff, A. D.; Ord, J.K. **Spatial processes: models and applications**. London, Pion, 1981, 266p

- Crepani, E.; Medeiros, J.S.; Azevedo, L.G.; Duarte, V.; Hernandez, P.; Florenzano, T.
Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico.
São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- Cross, M.; Moscardini, A.O. **Learning the art of mathematical modeling.** New York, Halsted Press, 1985.
- Crósta, A.P.; **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Campinas, UNICAMP, 1992. 170p.
- Environmental Systems Research Institute(ESRI). **ARC/INFO 6.0 - GRID Command Reference.** Redlands, CA, 1991.
- Fedra, K. GIS and environmental modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyart, L.T. ed. **Environmental modelling with GIS.** Oxford, Oxford University Press, 1993. , cap. 5, p. 35-50.
- Felgueiras, C. A. e Goodchild M. F. **Two papers on triangulated surface modeling.** Santa Barbara, CA, University of California, NCGIA, 1995. (Relatório Técnico 95-2)
- Gerald, C.F.; Wheatley, P.O. **Applied numerical analysis.** 4.ed. Reading, Ma, Addison Wesley, 1989.
- Gomes, J.M.; Velho, L. **Computação visual: imagens.** Rio, SBM, 1994.
- Goodchild, M. F.; Parks B. O. ; Steyaert L.T. **Environmental modeling with GIS.** New York, Oxford University Press ,1993.
- Goodchild, M. Geographical data modeling. **Computers & geosciences**, 18 (4): 401-408, 1992.
- Guptill, S. C. Spatial data exchange and standardization. In: Maguire,D.; Goodchild, M.; Rhind,D. ed. **Geographical information systems: principles and applications.** New York, John Wiley and Sons, 1991, cap. 34, p. 515-530.
- Kemp, K. **Environmental modelling with GIS: A strategy for dealing with spatial Continuity.** (NCGIA Technical Report, 93-3) (Ph.D. thesis in Geography) - University of California, Santa Barbara, CA,1992.
- Kumler, M. P. **An intensive comparison of TINs and DEMs.** (NCGIA Technical Report 93-3) (Ph.D. thesis in Geography) - University of California, Santa Barbara, CA, 1992.

- Laurini, R.; Thompson D. **Fundamentals of spatial information systems**. San Diego, CA, Academic Press. 1992. 680p.
- Maidment, D. R. GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyart, L.T. ed. **Environmental modelling with GIS**, Oxford, Oxford University Press, 1993. , cap. 14, p. 147-167.
- NetGis **SPRING**: Manual do usuário. Versão 2.0, São José dos Campos, junho 1997 4 v.
- Peuquet, D.J.; A conceptual framework and comparison os spatial data model. **Cartografica** 21: 66-113, 1984 .
- Projeto RADAMBRASIL. **Levantamento de recursos naturais**. Rio de Janeiro, DNPM, 1977.
- Richards, J.A. **Remote sensing digital image analysis**. an Introduction. Berlin, Springer-Verlag, 1986. 281 p.
- Smith, T.R.; Bretherton, F.P. Stability and conservation of mass in drainage basin evolution, **Water Resources Research** 8 (6): 1506-1529, 1972.
- Star, J.; Estes, J. **Geographic information systems: na introduction**. New York, Prentice-Hall, 1990.
- Tomlin, D. **Geographic information systems and Cartographic Modeling**. New York, Prentice Hall, 1990.
- Tomlin, D. **Cartographic modelling**. In: Maguire,D.; Goodchild, M.; Rhind,D. eds. **Geographical Information Systems: principles and applications**. New York, John Wiley and Sons, 1991. cap. 23, p. 361-374.
- Tricart, J.; **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro, IBGE-SUPREN, 1977. 91 p. (Recursos Naturais e Meio Ambiente).
- Tricart, J.; Keiwietdejonge, C. **Ecogeography and rural managment**. Essex, U.K. Longman Scientific & Technical. 1992.
- Turc, L. Evaluation des besoins en Eau d'Irrigation Evapotranspiration Potentielle, **Annales. Agronomiques**. **12(1):13-49, 1961**. referenciado em Hydrologic Modeling of Small Watersheds, American Society of Agriculktural Engineers, Monograph 5, pp 229-273.

Weibel, R.; Heller, M. Digital Terrain Modelling. In: Maguire,D.; Goodchild, M.; Rhind,D. eds. **Geographical information systems:** principles and applications. New York, John Wiley and Sons, 1991, p. 269-297.

Worboys, M. **Gis:** A Computing perspective. London, Taylor and Francis, 1995.

APÊNDICE A

SINTAXE DOS COMANDOS UTILIZADOS DA LEGAL

CONSIDERAÇÕES:

- Este apêndice descreve a sintaxe dos comandos implementados neste trabalho e também de alguns comandos da linguagem que não foram implementados, mas que foram utilizados no exemplo do capítulo 7. A descrição refere-se somente à sintaxe para uso dos comandos com dados da classe geo-campo. Uma descrição completa da sintaxe da linguagem LEGAL pode ser encontrada no Volume III do manual do usuário do sistema SPRING.
- A linguagem LEGAL disponível na versão 2.0.3 do SPRING trata geo-campos somente nas representações grade regular de células e grade regular de pontos. As variáveis do tipo **Imagem** e do tipo **Temático** em um programa em LEGAL estão sempre associadas à representação grade regular de células; já uma variável do tipo **Numerico** está sempre associada à representação grade regular de pontos.

Recupere

Associa um *plano de informação* existente no projeto corrente com uma variável declarada previamente .

Sintaxe:

```
variavel = Recupere (Nome = "nome_do_plano_de_informacao")
```

Considerações:

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:

```
// Declarações ( Ver capítulo 7, ações de declaração)
Tematico Solos ("TIPOS_SOLOS");
Numerico topo ("ALTIMETRIA"),
Imagem banda3 ("LANDSAT"),

//Instanciações ( Ver capítulo 7, ações de instanciação)
Solos = Recupere(Nome = "solos_vale_paraiba");
topo = Recupere(Nome = "altimetria_sjc");
banda3 = Recupere(Nome = "TM3_SJC");
```

Novo

Quando usado com variáveis do tipo **Temático**, **Imagem** ou **Numerico**, cria um *plano de informação* do mesmo tipo e associa este plano à variável do lado esquerdo do sinal de atribuição “=”. Quando usado com variáveis do tipo **Tabela**, o comando **Novo** cria uma tabela no contexto do programa em execução. Esta tabela pode ser usada nos processamentos baseados em tabelas.

Sintaxe:

Para tipo **Imagem**:

```
variavel = Novo (Nome = "nome_do_plano_de_informacao",
                 ResX = valor , ResY = valor);
```

Para tipo **Temático**:

```
variavel = Novo (Nome = "nome_do_plano_de_informacao",
                 ResX = valor , ResY = valor,
                 Escala = valor);
```

Para tipo **Numerico**:

```
variavel = Novo (Nome = "nome_do_plano_de_informacao",
                 ResX = valor , ResY = valor,
                 Escala = valor,
                 Min = valor, Max = valor);
```

Para tipo **Tabela** de ponderação:

```
variavel = Novo (CategoriaIni = "nome_da_categoria",
                 "geoclasse" : valor,
                 "geoclasse" : valor, ... );
```

Para tipo **Tabela** de fatiamento:

```
variavel = Novo (CategoriaFim = "nome_da_categoria",
                 [valorI,valorF] : "geoclasse",
                 [valorI,valorF] : "geoclasse",...);
```

Para tipo **Tabela** de reclassificação:

```
variavel = Novo (CategoriaIni = "nome_da_categoria",
                 CategoriaFim = "nome_da_categoria",
                 "geoclasse" : "geoclasse",
                 "geoclasse" : "geoclasse", ... );
```

Considerações:

O plano criado pode ser usado para armazenar o resultado de uma operação geográfica.

Para a criação de uma tabela de fatiamento o termo [valorI,valorF] significa a faixa de valores do geo-campo numérico de entrada a ser associado a uma classe do geo-campo temático resultante da operação de fatiamento. A faixa vai de valorI até valorF; inclusive.

Parâmetros:

Nome - nome do plano de informação criado.

ResX - resolução horizontal.

ResY - resolução vertical.

Escala - escala do plano criado.

Min - valor mínimo permitido na grade criada.

Max - valor máximo permitido na grade criada.

CategoriaIni - categoria de entrada.

CategoriaFim - categoria de saída.

Exemplos:

// Criar um PI do tipo Imagem:

```
ima = Novo (Nome = "ImagemResultante", ResX=30, ResY=30);
```

// Criar um PI do tipo Temático:

```
solo = Novo (Nome = "Solos", ResX=50, ResY=50, Escala = 100000);
```

// Criar um PI do tipo Numérico:

```
alti = Novo (Nome = "Altimetria_sjc", ResX=50, ResY=50, Escala = 1000, Min=0, Max=2000);
```

Tabela Ponderação:

```
pond = Novo (CategoriaIni = "Tipos_de_solos",
             Le : 0.60,
             Li : 0.20,
             Ls : 0.35,
             Aq : 0.10);
```

Tabela de fatiamento:

```
fatia = Novo (CategoriaFim = "Faixas_de_Declividade",
             [0.0, 5.0] : "baixa",
             [5.0, 15.0] : "media",
             [15.0, 45.0] : "alta");
```

Tabela de reclassificação:

```
reclass = Novo (CategoriaIni = "Floresta",
                CategoriaFim = "Desmatamento",
                "Floresta_Densa" : "Floresta",
                "Floresta_Varzea" : "Floresta",
                "Rebrota" : "Desmatamento",
                "Area_Desmatada" : "Desmatamento");
```

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 comando usando o 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 **Numerico**. O parâmetro **tabfat** deve ser uma tabela do tipo **Fatiamento**.

Exemplo:

```
// Início de programa
// Declarações (Ver capítulo 7, ações de declaração)

Temático classes_decl ("Faixas_de_Declividade");
Numerico decli ("Declividade");
Tabela fatia(Fatiamento);

// Instanciações (Ver capítulo 7, ações de instanciação)

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 (Ver capítulo 7, ações de atribuição)
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:

```
{
    // Declarações(Ver capítulo 7, ações de declaração)

    Tematico geom      ("Geomorfologia");
    Numerico fragil    ("fragilidade");
    Tabela   tab_geo  (ponderacao);

    // Instanciações(Ver capítulo 7, ações de instanciação)

    fragil = Novo (Nome = "fragilidade_solo", ResX = 50,
                  ResY = 50, Escala = 100000);

    tab_geo = Novo (CategoriaIni = "Geomorfologia",
                   "SEpt" : 1.2,
                   "Espp" : 1.1,
                   "Estb" : 1.3,
                   "dk"   : 2.4);

    geom = recupere(Nome = "Geomorf_RADAM");

    // Operação(Ver capítulo 7, ações de atribuição)

    fragil = 0.5 * Pondere(geom, tab_geo);

    // Final de programa
```

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 identificadas, uma a uma, pela *lista_de_zonas*.

Sintaxe:

Resultado tipo **Numerico** (geo-campo).
`pis = MediaZonal(pie, lista_de_zonas)`
 Resultado em um único valor numérico
`vr = MediaZonal(pie, zona)`

Considerações:

pie plano de informação de entrada que define os valores dentro da região geográfica avaliada. O plano de informação *pie* deve ser do tipo **Imagem** ou do tipo **Numerico**.

Na implementação corrente, uma zona é definida por uma expressão booleana. Por exemplo, cada uma das expressões abaixo define uma zona.

- `zonas.Classe == "terra_roxa"`

Onde *zonas* é um plano de informação temático que contém uma classe denominada *terra_roxa*.

- `reg.Classe == "SJC" && reg.Classe == "Jacarei"`

Onde *reg* é um plano de informação temático que contém as classes *SJC* e *Jacarei*.

lista_de_zonas identifica as zonas sobre as quais serão calculados os valores médios. A separação entre zonas de uma lista é feita por vírgula ','. Todas as zonas presentes na *lista_de_zonas* devem estar localizadas sobre a região geográfica do *pie*.

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.

Exemplo:

```
{
// Inicio de um programa
// Declarando os nomes das variáveis usadas
// (Ver capítulo 7, ações de declaração)

Tematico      zonas      ("Solos_vale_paraiba");
Numerico      ph         ("ph_solos_vale_paraiba");
Numerico      ph_medio   ("grade_media_zonais_10x10");
Float         ph_terra_roxa;

// Instanciações (Ver capítulo 7, ações de instanciação)
// 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 (Ver capítulo 7, ações de atribuição)

// Resultado em campo Numérico
ph_medio = MediaZonal(ph,zonas.Classe == "terra_roxa",
                      zonas.Classe    == "latosolo_vermelho",
                      zonas.Classe    == "solos_hidromorficos");

// Resultado em um único valor numérico
ph_terra_roxa = MediaZonal(ph,zonas.Classe == "terra_roxa");

```

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*)

Considerações:

pie plano de informação de entrada que define os valores ou os temas dentro da região geográfica avaliada. O plano de informação *pie* deve ser do tipo **Imagem** ou do tipo **Temático**.

Na implementação corrente, uma região é definida por uma expressão booleana (Ver **MediaZonal**).

lista_de_zonas identifica as zonas sobre as quais serão calculadas as diversidades. Todas as zonas presentes na *lista_de_zonas* devem estar localizadas sobre a região geográfica do *pie* (Ver **MediaZonal**).

pis plano de informação de saída que deve ser do tipo **Numerico**.

vr variável do tipo float que recebe o valor da diversidade de uma única região.

Exemplo:

```
// Declarando os nomes das variáveis usadas
Temático    regioes    {"municipios_vale_paraiba"};
Temático    uso        {"uso_solos_vale_paraiba"};
Numerico    div_uso     {"diversidades"};
Float       diversidade_uso_sjc;

// Instanciações
//Dados de entrada
uso          = Recupere(Nome = "uso_do_solo");
regioes      = Recupere(Nome = "municipios");
div_uso      = Novo(Nome= "diver_uso_da_terra", ResX= 10, ResY= 10,
                   Escala = 100000, Min = 0, Max = 20);

// Resultado em campo Numérico
div_uso = VariedadeZonal(uso, regioes.Classe == "SJC",
                        regioes.Classe == "Jacarei",
                        regioes.Classe == "Taubate",
                        regioes.Classe == "Pinda");

// Resultado em um único valor numérico
diversidade_uso_sjc = VariedadeZonal(uso, regioes.Classe == "SJC");
```

FaixaZonal(*pie*, *lista_de_zonas*)

Calcula a faixa de variação de valores (max - min) 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 = **FaixaZonal**(*pie*, *lista_de_zonas*)
 Resultado em um único valor numérico
 vr = **FaixaZonal**(*pie*, *zona*)

Considerações:

pie plano de informação de entrada que define os valores dentro da 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 calculadas as faixas. Todas as zonas presentes na *lista_de_zonas* devem estar localizadas sobre a região geográfica do *pie*.

pis plano de informação de saída que deve ser do tipo **Numerico**.

vr variável do tipo float que recebe a faixa de valores resultante de uma única região.

Na implementação corrente, uma região é definida por uma expressão booleana.

Exemplo:

```
// Início de programa
// Declarando os nomes das variáveis usadas
Tematico    regioes    ("municipios_vale_paraiba");
Numerico    altim      ("altimetria");
Numerico    faixa      ("altimetria");
Float       variacao_altimetrica_SJC_jacarei;

// Instanciações
// Dados de entrada
altim        = Recupere(Nome = "altimetria_vale_paraiba");
regioes      = Recupere(Nome = "municipios");
faixa = Novo(Nome= "faixa_alt_municipios", ResX= 10, ResY= 10,
            Escala = 100000, Min = 0, Max = 5000);

// Resultado em campo Numérico
faixa = FaixaZonal(altim, regioes.Classe == "SJC",
                    regioes.Classe == "Jacarei",
                    regioes.Classe == "Taubate",
                    regioes.Classe == "Pinda");

Resultado em um único valor numérico
variacao_altimetrica_SJC_Jacarei = FaixaZonal(altim, (regioes.
Classe == "SJC" && regioes.Classe == "Jacarei));
```

While (condição) { sequência de ações }

Este comando repete uma determinada sequência de ações, enquanto a expressão de condição for verdadeira. Quando uma expressão envolvendo geo-campo faz parte da condição, a mesma é testada automaticamente a cada célula, no caso dos tipos **Imagem** e **Temático** ou a cada ponto no caso do tipo **Numerico**.

Sintaxe:

```
While(condição)
{
    sequência de ações a ser executada enquanto
a condição for verdadeira ;
};
```

Considerações:

Uma condição é qualquer expressão booleana ou relacional válida. A condição é verdadeira quando o resultado da expressão for diferente de zero.

Uma sequência de ações é formada por um ou mais comandos válidos da linguagem.

```
If (condição) { sequência1 de ações }
Else { sequência2 de ações }
```

Este comando possibilita escolher entre duas sequência de *ações*, qual executar. Quando uma expressão envolvendo geo-campo faz parte da condição, a mesma é testada automaticamente a cada célula da grade regular, no caso dos tipos **Imagem** e **Temático** ou a cada ponto da grade regular no caso do tipo **Numerico**.

Sintaxe:

```
If(condição)
{
    Se a condição for verdadeira, a sequência de
    ações entre {} a seguir é executada.
}
else
{
    Se a condição for falsa, a sequência de
    ações entre {} a seguir é executada.
};
```

Considerações:

Uma condição é qualquer expressão booleana ou relacional válida. A condição é verdadeira quando o resultado da expressão for diferente de zero.

Uma sequência de ações é formada por um ou mais comandos válidos da linguagem.

Por se tratar de um texto bastante repetitivo, não serão colocados os demais operadores. O manual da versão 2.0.5 do SPRING conterà também os operadores zonais listados a seguir:

MaxZonal(*pie, lista_de_zonas*)

MinZonal(*pie, lista_de_zonas*)

MaioriaZonal(*pie, lista_de_zonas*)

MinoriaZonal(*pie, lista_de_zonas*)

SomaZonal(*pie, lista_de_zonas*)

AreaZonal(*pie, lista_de_zonas*)

DesvPadraoZonal(*pie, lista_de_zonas*)

PorcentagemZonal(*pie, lista_de_zonas*)

EstatisticaZonal(*pie, lista_de_zonas*)

APÊNDICE B

LISTAGEM DO EXEMPLO DE MANIPULAÇÃO EM LEGAL

```

// Programa em LEGAL que automatiza algumas etapas do roteiro
// metodológico apresentado na seção 7.2

{      // Início do programa

//      Ações de declaração de variáveis auxiliares

//      Variáveis usadas para receber os planos de informação com dados
//      temáticos de entrada, usados durante a manipulação.

Tematico PIentradasolo ("pedologia");
Tematico PIentradageologia ("geologia");
Tematico PIentradavegetacao ("vegetacao");
Tematico PIentradageomorfologia ("geomorfologia");
Tematico PIentradautbasicas ("utbasica");

//      Variáveis numéricas usadas para integração de dados Temáticos

Digital PIsoloponderado ("Numerico");
Digital PIgeologiaponderado ("Numerico");
Digital PTvegetacaoponderado ("Numerico");
Digital PIgeomorfologiaponderado ("Numerico");

//      Variáveis tabela usadas para integração de dados Temáticos

Tabela      TBnotassolos (Ponderacao);
Tabela      TBnotasgeologia (Ponderacao);
Tabela      TBnotasvegetacao (Ponderacao);
Tabela      TBnotasgeomorfologia (Ponderacao);

//      Variáveis Numéricas usadas para receber os planos de informação
//      com o valor médio do tema em cada unidade territorial básica.
//      (representação grade regular de pontos)

Digital PImediautbasicasolo ("Numerico");
Digital PImediautbasicageologia ("Numerico");
Digital PImediautbasicavegetacao ("Numerico");
Digital PImediautbasicageomorfologia ("Numerico");
Digital PIVulnerabilidadenumérica ("Numerico");

//      Variável usada para receber o plano de informação temático com
//      as classes de vulnerabilidade estimadas.
//      "Mapa temático de vulnerabilidade", resultante da aplicação da
//      metodologia sobre os dados de entrada.

Tematico PIVulnerabilidadetematica ("vulnerabilidade");

//      variável tabela usada na operação pontual de fatiamento da grade
//      regular de pontos com valores médios de vulnerabilidade.

Tabela TBvulnerabilidade (Fatiamento);

//      Ações de instânciação dos dados

```

```
// Associação dos dados de entrada com as variáveis declaradas
// Os dados de entradas são mostrados nas figuras: 7.5, 7.6 (a),
// 7.7 (a), 7.8 (a) e 7.9 (a).

PIentradasolo = Recupere (Nome= "solo_atualizado");
PIentradageologia = Recupere (Nome= "go_atualizado");
PIentradavegetacao = Recupere (Nome= "veg_atualizado");
PIentradageomorfologia = Recupere (Nome= "gm_atualizado");
PIentradautbasicas = Recupere (Nome= "utbas");

// Criação no banco de dados dos planos de informação usados para
// integrar os dados temáticos segundo um modelo que estabelece 21
// classes de vulnerabilidade (valores de 1.0 a 3.0)

Pisoloponderado = Novo(Nome="solo_ponderado_60", ResX=60,
    ResY=60, Escala=100000, Min=0, Max=3);

PIgeologiaponderado = Novo(Nome="geo_ponderado_60", ResX=60,
    ResY=60, Escala=100000, Min=0, Max=3);

PIvegetacaoponderado = Novo(Nome="veget_ponderado_60", ResX=60,
    ResY=60, Escala=100000, Min=0, Max=3);

PIgeomorfologiaponderado = Novo(Nome="geomorf_ponderado_60", ResX=60,
    ResY=60, Escala=100000, Min=0, Max=3);

// Criação no banco de dados dos planos de informação usados para
// receber os valores médios de cada tema para cada utb

Pimediautbasicasolo = Novo(Nome="mediautbasicasolo_60", ResX = 60,
    ResY=60, Escala=100000, Min=0, Max=3);

Pimediautbasicageologia = Novo(Nome="mediautbasicageologia_60",
    ResX=60, ResY=60, Escala=100000, Min=0,
    Max=3);

Pimediautbasicavegetacao = Novo(Nome="mediautbasicavegetacao_60",
    ResX=60, ResY=60, Escala=100000,
    Min=0, Max=3);

Pimediautbasicageomorfologia = Novo( Nome =
    "mediautbasicageomorfologia_60",
    ResX=60, ResY=60, Escala=100000,
    Min=0, Max=3);

// Criação no banco de dados do plano de informação usado para
// receber o valor médio final de cada utb

PIvulnerabilidadenumerica = Novo(Nome="vulnerabilidade224_60",
    ResX=60, ResY=60, Escala=100000,
    Min=0, Max=3);

// Criação no banco de dados do plano de informação a ser usado
```

```
// para receber o resultado da operação pontual de fatiamento da
// grade regular de pontos que contém as notas médias estimadas
// de vulnerabilidade em cada unidade territorial básica.
```

```
PIvulnerabilidade_tematica = Novo(Nome="vulnerabilidade_tematica_60",
                                   ResX=60, ResY=60, Escala=100000);
```

```
// Criação da tabela a ser usada para integração das informações
// provenientes do tema solo.
```

```
TBnotas_solos = Novo ( CategoriaIni="pedologia",
                      "PB1"      : 2.0,
                      "PB5"      : 2.0,
                      "HG"       : 3.0,
                      "R1"       : 3.0,
                      "TR"       : 2.0,
                      "R2"       : 3.0,
                      "LV7"      : 1.0,
                      "LV8"      : 1.0,
                      "ar"       : 3.0,
                      "A"        : 3.0 );
```

```
// Criação da tabela a ser usada para integração das informações
// provenientes do tema geologia
```

```
TBnotas_geologia = Novo ( CategoriaIni="geologia",
                         "pEx_c_xingu"      : 1.5,
                         "pEgp_g_grao_para" : 1.4,
                         "pErn_f_rio_fresco" : 2.7,
                         "pEac_gran_s_carajas" : 1.3,
                         "pEse_f_sobrei"     : 1.9,
                         "pEia_form_Iriri"    : 1.0,
                         "pEav_gran_v_guilher" : 1.2,
                         "pEgo_f_gorotire"   : 2.6,
                         "Qa_Qc_aluviao"     : 3.0 );
```

```
// Criação da tabela a ser usada para integração das informações
// provenientes do tema vegetação
```

```
TBnotas_vegetacao = Novo ( CategoriaIni="vegetacao",
                          "Fdt"      : 1.0,
                          "arFdt"    : 3.0,
                          "Fam"      : 1.3,
                          "Fal"      : 1.2,
                          "Sc"       : 1.7,
                          "Scmd"     : 1.8,
                          "Srmd"     : 2.2,
                          "Sr"       : 2.0 );
```

```
// Criação da tabela a ser usada para integração das informações
// provenientes do tema geomorfologia
```

```
TBnotas_geomorfologia = Novo ( CategoriaIni="geomorfologia",
                              "SEpt"    : 1.2,
                              "Estb"    : 1.3,
                              "Espp"    : 1.1,
```

```

"Ei"      : 1.9,
"Egi"     : 2.2,
"dr"      : 2.3,
"drv"     : 2.7,
"dk"      : 2.4,
"dkr"     : 2.6,
"dke"     : 2.5,
"drt"     : 2.1,
"dkit"    : 2.0,
"dm"      : 1.2,
"dmit"    : 1.4,
"dcta"    : 1.6,
"dci"     : 2.0,
"atf"     : 1.0,
"apf"     : 3.0,
"dit"     : 1.4,
"dc"      : 1.6 );

```

```

// Criação da tabela a ser usada na operação de fatiamento da
// grade
// regular de pontos com as notas médias de vulnerabilidade.

```

```

TBvulnerabilidade = Novo (CategoriaFim = "vulnerabilidade",
[1.0,1.0999]      : "estavel",
[1.0999,1.1999]   : "estavel1",
[1.1999,1.2999]   : "estavel2",
[1.2999,1.3999]   : "estavel3",
[1.3999,1.4999]   : "moderadamente_estavel",
[1.4999,1.5999]   : "moderadamente_estavel1",
[1.5999,1.6999]   : "moderadamente_estavel2",
[1.6999,1.7999]   : "moderadamente_estavel3",
[1.7999,1.8999]   : "medianamente_estavel",
[1.8999,1.9999]   : "medianamente_est_vul",
[1.9999,2.0999]   : "medianamente_est_e_ou_vul",
[2.0999,2.1999]   : "medianamente_vul_est",
[2.1999,2.2999]   : "medianamente_vulneravel",
[2.2999,2.3999]   : "moderadamente_vul1",
[2.3999,2.4999]   : "moderadamente_vul2",
[2.4999,2.5999]   : "moderadamente_vul3",
[2.5999,2.6999]   : "moderadamente_vul",
[2.6999,2.7999]   : "vulneravel1",
[2.7999,2.8999]   : "vulneravel2",
[2.8999,2.9999]   : "vulneravel3",
[2.9999,3.0]      : "vulneravel" );

```

```

// Operação de ponderação pontual das classes dos temas solo,
// geologia, geomorfologia e vegetação.

```

```

PIgeologiaponderado = Pondere (PIentradageologia,
                                TNotasgeologia);

```

```

PIgeomorfologiaponderado = Pondere (PIentradageomorfologia,
                                      TNotasgeomorfologia);

```

```

PIsoloponderado = Pondere (PIentradasolo, TNotassolos);

```

```
PIvegetacaoponderado = Pondere (PIentradavegetacao,
                                TBnotasvegetacao);
```

```
// Determinação do valor médio em cada unidade territorial básica
// para o tema geologia (Operação de média zonal).
// A figura 7.6 (b) mostra o resultado desta operação
```

```

PImediautbasicageologia = MedZ (PIgeologiaponderado,
    PIentradautbasicas.Classe == "u1",
    PIentradautbasicas.Classe == "u2",
    PIentradautbasicas.Classe == "u3",
    PIentradautbasicas.Classe == "u4",
    PIentradautbasicas.Classe == "u5",
    PIentradautbasicas.Classe == "u6",
    PIentradautbasicas.Classe == "u7",
    PIentradautbasicas.Classe == "u8",
    PIentradautbasicas.Classe == "u9",
    PIentradautbasicas.Classe == "u10",
    PIentradautbasicas.Classe == "u11",
    PIentradautbasicas.Classe == "u12",
    PIentradautbasicas.Classe == "u13",
    PIentradautbasicas.Classe == "u14",
    PIentradautbasicas.Classe == "u15",
    PIentradautbasicas.Classe == "u16",
    PIentradautbasicas.Classe == "u17",
    PIentradautbasicas.Classe == "u18",
    PIentradautbasicas.Classe == "u19",
    PIentradautbasicas.Classe == "u20",
    PIentradautbasicas.Classe == "u21",
    PIentradautbasicas.Classe == "u22",
    PIentradautbasicas.Classe == "u23",
    PIentradautbasicas.Classe == "u24",
    PIentradautbasicas.Classe == "u25",
    PIentradautbasicas.Classe == "u26",
    PIentradautbasicas.Classe == "u27",
    PIentradautbasicas.Classe == "u28",
    PIentradautbasicas.Classe == "u29",
    PIentradautbasicas.Classe == "u30",
    PIentradautbasicas.Classe == "u31",
    PIentradautbasicas.Classe == "u32",
    PIentradautbasicas.Classe == "u33",
    PIentradautbasicas.Classe == "u34",
    PIentradautbasicas.Classe == "u35",
    PIentradautbasicas.Classe == "u36",
    PIentradautbasicas.Classe == "u37",
    PIentradautbasicas.Classe == "u38",
    PIentradautbasicas.Classe == "u39",
    PIentradautbasicas.Classe == "u40",
    PIentradautbasicas.Classe == "u41",
    PIentradautbasicas.Classe == "u42",
    PIentradautbasicas.Classe == "u43",
    PIentradautbasicas.Classe == "u44",
    PIentradautbasicas.Classe == "u45",
    PIentradautbasicas.Classe == "u46",
    PIentradautbasicas.Classe == "u47",
    PIentradautbasicas.Classe == "u48",
    PIentradautbasicas.Classe == "u49",
    PIentradautbasicas.Classe == "u50")

```

```

PIentradautbasicas.Classe == "u51",
PIentradautbasicas.Classe == "u52",
PIentradautbasicas.Classe == "u53",
PIentradautbasicas.Classe == "u54",
PIentradautbasicas.Classe == "u55",
PIentradautbasicas.Classe == "u56",
PIentradautbasicas.Classe == "u57",
PIentradautbasicas.Classe == "u58",
PIentradautbasicas.Classe == "u59",
PIentradautbasicas.Classe == "u60",
PIentradautbasicas.Classe == "u61",
PIentradautbasicas.Classe == "u62",
PIentradautbasicas.Classe == "u63",
PIentradautbasicas.Classe == "u64",
PIentradautbasicas.Classe == "u65" );

//      Determinação do valor médio em cada unidade territorial básica
//      para o tema geomorfologia(Operação de média zonal).
//      A figura 7.7 (b) mostra o resultado desta operação

PImediautbasicageomorfologia = MedZ (PIgeomorfologiaponderado,
    PIentradautbasicas.Classe == "u1",
    PIentradautbasicas.Classe == "u2",
    PIentradautbasicas.Classe == "u3",
    PIentradautbasicas.Classe == "u4",
    PIentradautbasicas.Classe == "u5",
    PIentradautbasicas.Classe == "u6",
    PIentradautbasicas.Classe == "u7",
    PIentradautbasicas.Classe == "u8",
    PIentradautbasicas.Classe == "u9",
    PIentradautbasicas.Classe == "u10",
    PIentradautbasicas.Classe == "u11",
    PIentradautbasicas.Classe == "u12",
    PIentradautbasicas.Classe == "u13",
    PIentradautbasicas.Classe == "u14",
    PIentradautbasicas.Classe == "u15",
    PIentradautbasicas.Classe == "u16",
    PIentradautbasicas.Classe == "u17",
    PIentradautbasicas.Classe == "u18",
    PIentradautbasicas.Classe == "u19",
    PIentradautbasicas.Classe == "u20",
    PIentradautbasicas.Classe == "u21",
    PIentradautbasicas.Classe == "u22",
    PIentradautbasicas.Classe == "u23",
    PIentradautbasicas.Classe == "u24",
    PIentradautbasicas.Classe == "u25",
    PIentradautbasicas.Classe == "u26",
    PIentradautbasicas.Classe == "u27",
    PIentradautbasicas.Classe == "u28",
    PIentradautbasicas.Classe == "u29",
    PIentradautbasicas.Classe == "u30",
    PIentradautbasicas.Classe == "u31",
    PIentradautbasicas.Classe == "u32",
    PIentradautbasicas.Classe == "u33",
    PIentradautbasicas.Classe == "u34",
    PIentradautbasicas.Classe == "u35",
    PIentradautbasicas.Classe == "u36",
    PIentradautbasicas.Classe == "u37",
    PIentradautbasicas.Classe == "u38",
    PIentradautbasicas.Classe == "u39",

```

```

PIentradautbasicas.Classe == "u40",
PIentradautbasicas.Classe == "u41",
PIentradautbasicas.Classe == "u42",
PIentradautbasicas.Classe == "u43",
PIentradautbasicas.Classe == "u44",
PIentradautbasicas.Classe == "u45",
PIentradautbasicas.Classe == "u46",
PIentradautbasicas.Classe == "u47",
PIentradautbasicas.Classe == "u48",
PIentradautbasicas.Classe == "u49",
PIentradautbasicas.Classe == "u50",
PIentradautbasicas.Classe == "u51",
PIentradautbasicas.Classe == "u52",
PIentradautbasicas.Classe == "u53",
PIentradautbasicas.Classe == "u54",
PIentradautbasicas.Classe == "u55",
PIentradautbasicas.Classe == "u56",
PIentradautbasicas.Classe == "u57",
PIentradautbasicas.Classe == "u58",
PIentradautbasicas.Classe == "u59",
PIentradautbasicas.Classe == "u60",
PIentradautbasicas.Classe == "u61",
PIentradautbasicas.Classe == "u62",
PIentradautbasicas.Classe == "u63",
PIentradautbasicas.Classe == "u64",
PIentradautbasicas.Classe == "u65" );

// Determinação do valor médio em cada unidade territorial básica
// para o tema solo(Operação de média zonal).
// A figura 7.8 (b) mostra o resultado desta operação

PImediautbasicasolo = MedZ (PIsoloponderado,
PIentradautbasicas.Classe == "u1",
PIentradautbasicas.Classe == "u2",
PIentradautbasicas.Classe == "u3",
PIentradautbasicas.Classe == "u4",
PIentradautbasicas.Classe == "u5",
PIentradautbasicas.Classe == "u6",
PIentradautbasicas.Classe == "u7",
PIentradautbasicas.Classe == "u8",
PIentradautbasicas.Classe == "u9",
PIentradautbasicas.Classe == "u10",
PIentradautbasicas.Classe == "u11",
PIentradautbasicas.Classe == "u12",
PIentradautbasicas.Classe == "u13",
PIentradautbasicas.Classe == "u14",
PIentradautbasicas.Classe == "u15",
PIentradautbasicas.Classe == "u16",
PIentradautbasicas.Classe == "u17",
PIentradautbasicas.Classe == "u18",
PIentradautbasicas.Classe == "u19",
PIentradautbasicas.Classe == "u20",
PIentradautbasicas.Classe == "u21",
PIentradautbasicas.Classe == "u22",
PIentradautbasicas.Classe == "u23",
PIentradautbasicas.Classe == "u24",
PIentradautbasicas.Classe == "u25",
PIentradautbasicas.Classe == "u26",

```



```

PIentradautbasicas.Classe == "u27",
PIentradautbasicas.Classe == "u28",
PIentradautbasicas.Classe == "u29",
PIentradautbasicas.Classe == "u30",
PIentradautbasicas.Classe == "u31",
PIentradautbasicas.Classe == "u32",
PIentradautbasicas.Classe == "u33",
PIentradautbasicas.Classe == "u34",
PIentradautbasicas.Classe == "u35",
PIentradautbasicas.Classe == "u36",
PIentradautbasicas.Classe == "u37",
PIentradautbasicas.Classe == "u38",
PIentradautbasicas.Classe == "u39",
PIentradautbasicas.Classe == "u40",
PIentradautbasicas.Classe == "u41",
PIentradautbasicas.Classe == "u42",
PIentradautbasicas.Classe == "u43",
PIentradautbasicas.Classe == "u44",
PIentradautbasicas.Classe == "u45",
PIentradautbasicas.Classe == "u46",
PIentradautbasicas.Classe == "u47",
PIentradautbasicas.Classe == "u48",
PIentradautbasicas.Classe == "u49",
PIentradautbasicas.Classe == "u50",
PIentradautbasicas.Classe == "u51",
PIentradautbasicas.Classe == "u52",
PIentradautbasicas.Classe == "u53",
PIentradautbasicas.Classe == "u54",
PIentradautbasicas.Classe == "u55",
PIentradautbasicas.Classe == "u56",
PIentradautbasicas.Classe == "u57",
PIentradautbasicas.Classe == "u58",
PIentradautbasicas.Classe == "u59",
PIentradautbasicas.Classe == "u60",
PIentradautbasicas.Classe == "u61",
PIentradautbasicas.Classe == "u62",
PIentradautbasicas.Classe == "u63",
PIentradautbasicas.Classe == "u64",
PIentradautbasicas.Classe == "u65" );

```

```

// Determinação do valor médio em cada unidade territorial básica
// para o tema vegetação (Operação de média zonal).
// A figura 7.9 (b) mostra o resultado desta operação

```

```

PImediautbasicavegetacao = MedZ (PIvegetacaoponderado,
PIentradautbasicas.Classe == "u1",
PIentradautbasicas.Classe == "u2",
PIentradautbasicas.Classe == "u3",
PIentradautbasicas.Classe == "u4",
PIentradautbasicas.Classe == "u5",
PIentradautbasicas.Classe == "u6",
PIentradautbasicas.Classe == "u7",
PIentradautbasicas.Classe == "u8",
PIentradautbasicas.Classe == "u9",
PIentradautbasicas.Classe == "u10",
PIentradautbasicas.Classe == "u11",
PIentradautbasicas.Classe == "u12",
PIentradautbasicas.Classe == "u13",

```

```

PIentradautbasicas.Classe == "u14",
PIentradautbasicas.Classe == "u15",
PIentradautbasicas.Classe == "u16",
PIentradautbasicas.Classe == "u17",
PIentradautbasicas.Classe == "u18",
PIentradautbasicas.Classe == "u19",
PIentradautbasicas.Classe == "u20",
PIentradautbasicas.Classe == "u21",
PIentradautbasicas.Classe == "u22",
PIentradautbasicas.Classe == "u23",
PIentradautbasicas.Classe == "u24",
PIentradautbasicas.Classe == "u25",
PIentradautbasicas.Classe == "u26",
PIentradautbasicas.Classe == "u27",
PIentradautbasicas.Classe == "u28",
PIentradautbasicas.Classe == "u29",
PIentradautbasicas.Classe == "u30",
PIentradautbasicas.Classe == "u31",
PIentradautbasicas.Classe == "u32",
PIentradautbasicas.Classe == "u33",
PIentradautbasicas.Classe == "u34",
PIentradautbasicas.Classe == "u35",
PIentradautbasicas.Classe == "u36",
PIentradautbasicas.Classe == "u37",
PIentradautbasicas.Classe == "u38",
PIentradautbasicas.Classe == "u39",
PIentradautbasicas.Classe == "u40",
PIentradautbasicas.Classe == "u41",
PIentradautbasicas.Classe == "u42",
PIentradautbasicas.Classe == "u43",
PIentradautbasicas.Classe == "u44",
PIentradautbasicas.Classe == "u45",
PIentradautbasicas.Classe == "u46",
PIentradautbasicas.Classe == "u47",
PIentradautbasicas.Classe == "u48",
PIentradautbasicas.Classe == "u49",
PIentradautbasicas.Classe == "u50",
PIentradautbasicas.Classe == "u51",
PIentradautbasicas.Classe == "u52",
PIentradautbasicas.Classe == "u53",
PIentradautbasicas.Classe == "u54",
PIentradautbasicas.Classe == "u55",
PIentradautbasicas.Classe == "u56",
PIentradautbasicas.Classe == "u57",
PIentradautbasicas.Classe == "u58",
PIentradautbasicas.Classe == "u59",
PIentradautbasicas.Classe == "u60",
PIentradautbasicas.Classe == "u61",
PIentradautbasicas.Classe == "u62",
PIentradautbasicas.Classe == "u63",
PIentradautbasicas.Classe == "u64",
PIentradautbasicas.Classe == "u65" );

```

```

// Determinação da nota média final de vulnerabilidade de cada
// unidade territorial básica
// Esta operação está ilustrada na figura 7.10

```

```

PIvulnerabilidadenumérica = (PImediautbasicageologia
                             Pimediautbasicageomorfologia +
                             Pimediautbasicasolo +
                             Pimediautbasicavegetacao)/4;

/   Operação de fatiamento da grade regular de pontos com as notas
//   médias de vulnerabilidade.

PIvulnerabilidade temática = Fatie (PIvulnerabilidadenumérica,
                                     Tbvulnerabilidade);
}   // Fim do programa

```

```

// Programa em LEGAL para transformação da representação grade
// regular de pontos para a representação regiões contiguas da
// grade de vulnerabilidade do tema solo.
// Resultado na figura 7.8. (c)

{ // Início do programa

  Digital PImediautbasicasolo ("Numerico");

  Tematico PIVulnerabilidadesolo ("vulnerabilidade");

  Tabela TBvulnerabilidade (Fatiamento);

  PIVulnerabilidadesolo = Novo(Nome="vulnerabilidadesolo_60",
                                ResX=60, ResY=60, Escala=100000);

  Pimediautbasicasolo = Recupere (Nome= "mediautbasicasolo_60");

  TBvulnerabilidade = Novo (CategoriaFim="vulnerabilidade",
    [1.0,1.0999] : "estavel",
    [1.0999,1.1999] : "estavel1",
    [1.1999,1.2999] : "estavel2",
    [1.2999,1.3999] : "estavel3",
    [1.3999,1.4999] : "moderadamente_estavel",
    [1.4999,1.5999] : "moderadamente_estavel1",
    [1.5999,1.6999] : "moderadamente_estavel2",
    [1.6999,1.7999] : "moderadamente_estavel3",
    [1.7999,1.8999] : "medianamente_estavel",
    [1.8999,1.9999] : "medianamente_est_vul",
    [1.9999,2.0999] : "medianamente_est_e_ou_vul",
    [2.0999,2.1999] : "medianamente_vul_est",
    [2.1999,2.2999] : "medianamente_vulneravel",
    [2.2999,2.3999] : "moderadamente_vul1",
    [2.3999,2.4999] : "moderadamente_vul2",
    [2.4999,2.5999] : "moderadamente_vul3",
    [2.5999,2.6999] : "moderadamente_vul",
    [2.6999,2.7999] : "vulneravel1",
    [2.7999,2.8999] : "vulneravel2",
    [2.8999,2.9999] : "vulneravel3",
    [2.9999,3.0] : "vulneravel" );

  PIVulnerabilidadesolo = Fatie (PImediautbasicasolo,
                                TBvulnerabilidade);

} // Fim do programa

```

APÊNDICE C

CLASSES PRESENTES NOS DADOS TEMÁTICOS

Classes de Geomorfologia

Sept	Patamares estruturais submetidos a processos de pedimentação
Estb	Superfície tabular erosiva
Espp	Superfície pediplanadas. Aplainamento em retomada de erosão recente
Ei	Inselbergs - Relevos residuais
Egi	Grupamentos de Inselbergs
dr	Dissecados em ravinas
drv	Dissecados em ravinas e vales encaixados
dk	Dissecados em cristas
dkr	Dissecados em cristas com ravinamentos
dke	Dissecados em cristas com controle estrutural
drt	Dissecados em ravinas e interflúvios tabulares
dkit	Dissecados em cristas e interflúvios tabulares
dm	Dissecados em mesa
dmit	Dissecados em mesa e interflúvios tabulares
dcta	Dissecado em colinas de topo aplainado
dci	Dissecado em colinas, com inselbergs
atf	Terraços fluviais
apf	Planícies fluviais
dit	Dissecado em interflúvios tabulares
dc	Dissecado em colinas

Classes de Solos

LV8	Latossolo Vermelho Amarelo + Solos Litólicos
LV7	Latossolo Vermelho Amarelo + Gley Húmico
R2	Solos Litólicos + Afloramento Rochoso
TR	Terra Roxa Estruturada
R1	Solos Litólicos + Podzólicos Vermelho Amarelo + Afloramento Rochoso
HG	Solos Hidromórficos
PB5	Podzólico Vermelho Amarelo + Solos Litólicos
PB1	Podzólico Vermelho Amarelo

Classes de Vegetação

Fdt	Floresta Tropical Densa
Fam	Floresta Aberta Mista
Fat	Floresta Aberta Latifoliada
Sc	Cerradão
Sr	Campo Cerrado
arFdt	Afloramento Rochoso na Floresta Tropical Densa
Srmd	Campo Cerrado menos denso
Scmd	Cerradão menos denso

Classes de Geologia

Qc;Qa	Aluvião
pEga	Formação Gorotire
pEγv	Granito Velho Guilherme
pEia	Grupo Uatumã, Formação Iriti
pEsa	Grupo Uatumã, Formação Sobreiro
pEγc	Granito da Serra de Carajás
pEm	Grupo Uatumã, Formação Rio Fresco
pEpg	Grupo Grão Pará
pEx	Complexo Xingu