

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

OBTENÇÃO E MANIPULAÇÃO DOS PARÂMETROS DA
EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLOS ATRAVÉS DE
TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO

ALFONSO RISSO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre, janeiro de 1993.

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do Prof. Vitor Haertel e co-orientação do Prof. Marc Pierre Bordas, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este trabalho se insere nas linhas de pesquisa do IPH Aerofotogrametria e Sensoriamento Remoto aplicados a Recursos Hídricos e Erosão e Sedimentação.

Agradecimentos:

Aos professores Vitor Haertel e Marc Pierre Bordas, pela orientação, apoio e incentivo.

Aos funcionários e técnicos do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), principalmente ao Técnico José Carlos Nunes Rodrigues; pelo trabalho, dedicação e amizade proporcionados durante a confecção deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, em especial a dona Lígia e as bibliotecárias.

Aos meus colegas de mestrado, em especial Jorge Silva Centeno, pelas idéias, amizade e companheirismo.

Ao CNPq, pela bolsa concedida.

Aos meus pais, avó e irmã, pela confiança e permanente incentivo.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado.

A Cláudia e Luiz Alfonso, com carinho...

RESUMO

A erosão do solo devido ao uso intenso de práticas agrícolas tem se tornado um dos principais problemas de muitos países. A estimativa da perda de solos e o monitoramento de práticas de uso da terra que causam erosão do solo se tornam difíceis, especialmente para grandes áreas carentes de informações em países do terceiro mundo, como o Brasil. O trabalho desenvolvido nesta dissertação, propõe o uso de técnicas de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto, como auxílio na resolução deste problema.

Uma metodologia é proposta para estimar o potencial de erosão do solo em pequenas bacias. A Equação Universal de Perda de Solos - USLE (Wischmeier, 1958) e a sua versão modificada por Williams (1975), MUSLE, são implementadas em um SIG, usando como entrada de dados informações colhidas de diversas fontes, incluindo imagens digitais de satélite.

Duas abordagens são feitas. A primeira basicamente consiste em dividir uma bacia de aproximadamente 100 Km² em pequenas sub-bacias que apresentem características internas homogêneas. Inicialmente o modelo numérico do terreno (MNT) da área de interesse é gerado. Após, os limites das sub-bacias são identificados por computador. O comprimento e a declividade médios das vertentes de cada bacia, assim como o fator LS da MUSLE são também estimados. Mapas temáticos de levantamento de solos são gravados e manipulados pelo sistema de formato digital. Isso é seguido pela estimativa do fator erodibilidade do solo K de cada sub-bacia. O fator de cobertura do solo C e o de práticas conservacionistas P são estimados a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto. Finalmente estima-se a erosão potencial de cada bacia através da combinação dessas informações em um SIG.

Na segunda abordagem, é feita uma análise de fontes não-pontuais de produção de sedimentos. Os dados de entrada são os mesmos, porém a estimativa de produção de sedimentos é feita para os elementos de uma malha regular, isto é, sobre uma representação discreta da região de estudo. O resultado final é a localização de pontos críticos quanto ao seu potencial de perda de solos.

Os testes foram executados na bacia do arroio Taboão, localizada na região fisiográfica do planalto central, no Estado do Rio Grande do Sul, sul do Brasil. Esta região apresenta problemas de erosão devido ao uso intenso de práticas agrícolas. Mapas temáticos e tabelas numéricas, descrevendo a distribuição espacial dos parâmetros da USLE/MUSLE, assim como das áreas críticas quanto a erosão são gerados.

Os testes mostram que a metodologia proposta oferece uma eficiente ferramenta para a estimativa da produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

SUMMARY

Soil erosion due to intensive agricultural practices has become a major problem in many countries. Estimation of soil loss and monitoring the land use practices that cause soil erosion, is a difficult task, specially in large areas distitute of information in Third World countries, such as Brazil. This Work proposes the use of Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing techniques to help solve this problem.

A methodology is proposed to estimate the potential for soil erosion in small watersheds. The Universal Soil Loss Equation - USLE (*Wischmeier, 1958*), and the *Williams (1975)* modified version, MUSLE, are implemented in a GIS using as input data collected from distinct sources, including satellite digital imagery.

Two approaches are proposed. The first one implements concepts of dividing an entire watershed (100 square kilometres) into a number of smaller sub-watersheds which present a more homogeneous internal characteristics. Initially a digital terrain model (DTM) for the area of interest is generated. Next the boundaries of the sub-watersheds are detected by the computer. The slope lenght and gradient factor LS is then computed. Soil classification maps are then read into the system in a digital format. This is followed by the estimation of the soil-erodibility factor K for the sub-watersheds. The cropping management factor C and the erosion control factor P are estimated by making use of remote sensig techniques. Finally the potential for soil erosion in each sub-watershed is estimated by merging these data in a GIS.

The second approach, is a sediment yield, non-point sources analysis. The same input data are used, but the sediment yield estimative is carried out in a regular grid cells, i. e., in a discrete representation of the test area. Those method indicates the location of the most critical areas with respect to potential soil erosion.

Tests were performed at the Taboão Watershed, located in the State of Rio Grande do Sul in Southern Brazil. This area presents severe erosion problems due to intensive agricultural practices. Thematic maps depicting the spacial distribution of the parameters relevant to USLE/USLE are generated as well as numerical tables.

The tests have shown that the proposed methodology offers an efficient tool to estimate sediment yield in watersheds.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO

RESUMO

SUMMARY

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

I. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Relevância do Trabalho.....	5
1.4. Organização da Dissertação.....	7
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
III. ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS UTILIZANDO DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLOS.....	15
3.1. Equação Universal de Perda dos Solos.....	15
3.1.1. Fator de Erosividade da Chuva, (R)	18
3.1.2. Fator de Erodibilidade do Solo, (K)	19
3.1.3. Fator Topográfico, (LS)	21
3.1.4. Fator de Uso e Manejo do Solo, (C)	22
3.1.5. Fator de Práticas Conservacionistas, (P)	23
3.1.6. Tolerância de Perda de Solo.....	24
3.1.7. Potencial Natural a Erosão Laminar.....	25
3.2. Equação Universal de Perda dos Solos Modificada.....	25

IV. UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEOINFORMAÇÃO (SIG) EM MODELOS DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	31
4.1. Conceitos de Sistema de Informações Geográficas.....	31
4.1.1. Definições.....	31
4.1.2. Componentes de um Sistema de Informações Geográficas.....	33
4.1.2.1. Hardware Computacional.....	33
4.1.2.2. Módulos de Software de um SIG.....	34
4.1.3. Estrutura dos Dados em um SIG.....	36
4.1.3.1. Estrutura Hierárquica.....	38
4.1.3.2. Redes de Trabalho.....	39
4.1.3.3. Estrutura Relacional.....	40
4.1.4. Formato dos Dados em um SIG.....	41
4.2. Obtenção e Manipulação dos Parâmetros da MUSLE/USLE Utilizando Técnicas de Geoprocessamento.....	43
V. MODELAGEM NUMÉRICA DO TERRENO APLICADA A EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLOS.....	46
5.1. Modelagem Numérica do Terreno.....	46
5.1.1. Métodos para Representação de MNTs.....	46
5.2. Formas de Interpolação para a Geração de uma Matriz de Altitude.....	50
5.2.1. Interpoladores de Transição Abrupta.....	51
5.2.2. Interpoladores de Transição Gradual.....	51
5.2.2.1. Métodos de Média Móvel.....	52
5.2.2.2. Métodos de Interpolação Utilizando a Autocovariança Espacial (Kriging)...	58

5.3. Métodos para Definição de Estruturas de Drenagem....	59
5.3.1. Problemas de Pré-Processamento.....	59
5.3.2. Identificação de Estruturas de Drenagem.....	61
5.4. Utilização de MNT para a Obtenção do Fator LS da MUSLE.....	64

VI. UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO SOLO..... 66

6.1. Sensoriamento Remoto.....	66
6.1.1. Generalidades.....	66
6.1.2. Níveis de Aquisição de Dados.....	68
6.2. Sistema LANDSAT TM.....	71
6.2.1. Características do Sensor TM (Thematic Mapper).....	71
6.3. Comportamento Espectral de Alvos.....	73
6.3.1. Características Espectrais da Vegetação.....	74
6.3.2. Características Espectrais do Solo.....	77
6.4. Pré-Processamento de Imagens Digitais em Sensoriamento Remoto.....	80
6.4.1. Correção Radiométrica.....	80
6.4.2. Correção Geométrica.....	81
6.5. Processamento de Imagens Digitais em Sensoriamento Remoto.....	82
6.5.1. Manipulação de contraste.....	84
6.5.2. Filtragem espacial.....	85
6.5.2.1. Filtros Passa-Baixa (LFF).....	89
6.5.2.2. Filtros Passa-Alta (HFF).....	92

6.6. Classificação Temática de Imagens Digitais em Sensoriamento Remoto.....	93
6.6.1. Espaço Multiespectral.....	95
6.6.2. Classificação Supervisionada.....	98
6.6.2.1. Funções Discriminantes.....	98
6.6.2.2. Classificação por Máxima Verossimilhança (Maximum Likelihood Classification).....	101
6.6.2.3. Classificação por Mínima Distância.....	104
6.6.2.4. Considerações Sobre Treinamento.....	106
6.6.3. Classificação Não Supervisionada.....	106

VII. ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA BACIA DO ARROIO

TABOÃO E SUB-BACIAS.....	109
7.1. Descrição da Região de Estudo.....	109
7.2. Estimativa dos Parâmetros da USLE/MUSLE para a Região de Estudo.....	111
7.2.1. Estimativa do Fator de Erosividade da Chuva (R).....	111
7.2.2. Análise do Fator de Escoamento Superficial da MUSLE.....	113
7.2.3. Estimativa do Fator de Erodibilidade do Solo (K).....	114
7.2.3.1. Avaliação do Fator K para cada Classe de Solo.....	116
7.2.3.2. Geoprocessamento do Fator de Erodibilidade do Solo (K).....	119

7.2.4.	Estimativa do Fator Topográfico $\langle LS \rangle$	120
7.2.4.1.	Geração do Modelo Numérico do Terreno.....	121
7.2.4.2.	Extração das Estruturas de Drenagem.....	122
7.2.4.3.	Cálculo do Fator Topográfico $\langle LS \rangle$ de uma Bacia Utilizando MNT.....	126
7.2.4.4.	Cálculo do Fator Topográfico $\langle LS \rangle$ para cada Célula de um MNT (Abordagem Não Pontual).....	130
7.2.5.	Estimativa do Fator de Uso do Solo $\langle CP \rangle$	131
7.2.5.1.	Estimativa do Fator C Anual (USLE).....	132
7.2.5.2.	Estimativa dos Valores do Fator C para a MUSLE.....	136
7.2.5.3.	Estimativa do Fator de Práticas Conservacionistas P	137
7.2.5.4.	Mapeamento do Fator CP	138
7.3.	Análise da Produção de Sedimentos para um Modelo Distribuído por Bacia (Modelo Cacho de Uva).....	143
7.3.1.	Produção de Sedimentos nas Bacias Hidrográfica Elementares (1 a 2 Km ²).....	145
7.3.2.	Produção de Sedimentos em Bacias Hidrográficas entre 15 e 20 Km ²	149
7.3.3.	Produção de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Arroio Taboão (100 Km ²).....	151
7.4.	Análise da Produção de Sedimentos para um evento Evento de Chuva.....	152
7.5.	Análise da Produção de Sedimentos para um Modelo de Fontes Não Pontuais.....	154

7.6. Mapeamento de Áreas Críticas em Confronto com o Mapa de Tolerância de Perda dos Solos da Região.....	157
--	-----

VIII. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	159
---------------------------------------	-----

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	162
-------------------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

II.1 - Fluxograma de operações para estimativa do potencial do uso do solo para o cultivo do milho - Kissi-Quenia....	11
II.2 - Sequência para estimativa de erosão.....	13
III.1 - Nomograma de determinação do fator de erodibilidade K	20
IV.1 - Procedimento de análise da MUSLE utilizando dados geo-relacionados.....	33
IV.2 - Componentes básicos de Hardware de um SIG.....	34
IV.3 - Principais componetes de Software de um SIG.....	35
IV.4 - Um mapa é uma série de pontos (a), arcos (b) e área (c), definido em um contexto espacial e não-espacial (ex.: identificador [A]).....	37
IV.5 - Estrutura Hierárquica.....	38
IV.6 - Estrutura em Redes.....	39
IV.7 - Estrutura relacional do mapa M.....	40
IV.8 - Cadeira em (a) formato varredura ("raster") ou grade e (b) em formato vetorial.....	41
IV.9 - Estimativa da Erosão Potencial.....	44
V.1 - Representação por isolinhas.....	47
V.2 - Cortes verticais do terreno (perfís).....	48
V.3 - Matriz de altitude.....	49
V.4 - Rede Irregular Triangulada (TIN).....	50
V.5 - Método de procura normal, (a) pontos aleatoriamente distribuidos, (b) tendencioso.....	55

V.6 - (a) Procura por quadrante, (b) procura por octante.....	55
V.7 - Método de Yoeli.....	56
V.8 - Procura n vizinhos mais próximos por quadrante por cota.....	56
V.9 - Classes de orientação para cada célula do MNT.....	63
V.10 - Percurso da água sobre um MNT.....	65
VI.1 - Regiões do espectro óptico.....	67
VI.2 - Níveis de aquisição de dados por Sensoriamento Remoto	68
VI.3 - Curva de resposta espectral de diferentes objetos.....	70
VI.4 - Resposta espectral da vegetação verde.....	74
VI.5 - Esquema de reflectância de múltiplos níveis de folhas	77
VI.6 - Reflectância de três diferentes tipos de solo.....	78
VI.7 - Reflectância de um solo argiloso com diferentes teores de umidade.....	79
VI.8 - Histogramas característicos para diferentes cenas.....	83
VI.9 - Transformação de contadores digitais.....	84
VI.10 - Condição de máximo da expressão componente cosseno...	87
VI.11 - Etapas de filtragem de uma área de uma imagem no domínio de Fourier.....	88
VI.12 - (a) função $G(u)$ do filtro Passa-Baixa, no domínio das frequências, (b) função $g(x)$ no domínio espacial.....	91
VI.13 - (a) função $G(u)$ do filtro Passa-Alta, no domínio das frequências, (b) função $g(x)$ no domínio espacial.....	93
VI.14 - Espaço espectral bidimensional mostrando a sua relação com as características de reflectância espectral de diferentes tipos de cobertura do terreno.....	96
VI.15 - Representação das classes de cobertura por um conjunto de classes espectrais.....	97
VI.16 - Esquema de rotulação de pixels de uma imagem LANDSAT MSS	97
VI.17 - Regiões de decisão em um espaço bidimensional.....	99

VI.18 - Algoritmo de classificação definido em termos de função discriminante.....	100
VII.1 - Situação e localização da bacia do arroio Taboão.....	110
VII.2 - Valores médios mensais do índice de erosividade (R) - (Ijuí - Ipagro).....	112
VII.3 - Mapa da pedologia do arroio Taboão.....	115
VII.4 - Isolinhas de altitude da região do arroio Taboão.....	121
VII.5 - MNT da região de estudo (tridimensional).....	122
VII.6 - Plano de orientações (8 níveis) na região de estudo	124
VII.7 - Plano de acúmulos fatiado em cores (rede de drenagem)	125
VII.8 - Determinação automática das bacias e da rede de drenagem	125
VII.9 - Plano do Fator <i>LS</i> de <i>Wischmeier</i>	131
VII.10 - Porcentagem do índice de erosão anual das chuvas na bacia do arroio Taboão.....	134
VII.11 - Imagem do uso do solo da bacia do arroio Taboão na banda 3 do satélite LANDSAT TM.....	139
VII.12 - Foto aérea sobre a bacia do arroio Taboão.....	140
VII.13 - Foto aérea sobre a bacia do arroio Taboão, para a obtenção de amostras para classificação da cobertura do solo.....	141
VII.14 - Imagem temática da cobertura do solo da bacia do arroio Taboão.....	141
VII.15 - Imagem temática da cobertura do solo anual da bacia do arroio Taboão.....	142
VII.16 - Localização espacial das bacias elementares.....	147
VII.17 - Gráficos do comportamento de cada fator e da produção de sedimentos de cada bacia elementar.....	147
VII.18 - Localização das sub-bacias entre 15 e 20 Km ²	149
VII.19 - Malha da produção média anual de sedimentos na bacia do arroio Taboão.....	156

VII.20 - Malha da tolerância a perda de solos da bacia do arroio Taboão.....	157
VII.21 - Malha das áreas críticas quanto a perda de solo.....	158

LISTA DE TABELAS

III.1 - Valores de C , da USLE, para o Estado de São Paulo....	23
III.2 - Valores de F , da USLE, para algumas práticas conservacionistas.....	24
VI.1 - Características dos satélites da série LANDSAT.....	72
VI.2 - Características dos Sensores dos Satélites LANDSAT....	72
VI.3 - Esquema de Varredura do sensor TM.....	73
VI.4 - Comparação entre interpretação visual e análise quantitativa.....	94
VII.1 - Valores de R para diferentes tempos de retorno.....	113
VII.2 - Granulometria dos solos da bacia do arroio Taboão....	117
VII.3 - Estimativa do Índice K pelo Nomógrafo de <i>Wischmeier e Smith (1978)</i>	118
VII.4 - Dados topográficos obtidos a partir de MNT.....	129
VII.5 - Resultados obtidos manualmente a partir do método de <i>Williams e Brendt</i>	129
VII.6 - Avaliação do valor C anual para uso agrícola na bacia do arroio Taboão.....	135
VII.7 - Fator C anual para as diversas coberturas da bacia do arroio Taboão.....	136
VII.8 - Fator C para o período maio-junho do arroio Taboão...	137
VII.9 - Fator CP para o uso do solo na bacia do arroio Taboão no período maio-junho.....	138
VII.10 - Análise da produção de sedimentos (bacias de 1 a 2 Km^2)	145
VII.11 - Análise da produção de sedimentos (bacias de 15 a 20 Km^2)	150
VII.12 - Análise da produção de sedimentos (bacia do arroio Taboão - 100 Km^2).....	151

I. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

O interesse da hidrologia e das ciências afins tem-se voltado ultimamente para as pequenas bacias hidrográficas, ou para a assim chamada hidrologia de cabeceiras. Vários são os motivos desse interesse, sendo que o principal destes motivos enquadra-se dentro do ponto de vista hidrológico. Pode-se dizer que é nas pequenas bacias hidrográficas que se iniciam todos os processos hidrossedimentológicos. A avaliação e monitoramento destes processos, considerando estas pequenas bacias como unidades elementares, pode permitir a implementação de modelos para estudos de regionalização. No entanto, existe a carência de informações hidrológicas referentes a bacias com menos de 500 Km², geralmente não monitoradas pelas redes hidrométricas convencionais, e a necessidade de conhecer melhor os processos físicos que regem os ciclos hidrossedimentológicos e a formação de cargas poluidoras. Só assim poder-se-á melhor entender e alimentar os modelos matemáticos usados para planejar e gerir os recursos hídricos.

Por outro lado, trata-se de atender uma demanda importante, de significativo conteúdo social, ou seja a necessidade de pequenas obras hidráulicas de interesse imediato para os produtores rurais, os municípios e as comunidades interioranas de pequeno e médio porte. Existe a necessidade de se localizar adequadamente e dimensionar pequenas obras como açudes, pontes, bueiros, tomadas de água, canais de drenagem ou microcentrais para que as mesmas não sejam destruídas por enchentes, obstruídas por sedimentos ou contaminadas por poluentes.

Essa dupla necessidade tem despertado um novo interesse para o conceito de bacia representativa, definida durante o Decênio Hidrológico da UNESCO, ou, mais precisamente pelo que se chamaria hoje em dia de bacia piloto de estudo e pesquisa.

Uma bacia piloto tem que ser característica da região de interesse e do problema a ser estudado, e portanto, deve ser bem escolhida para que os investimentos exigidos pelos estudos a serem nela desenvolvidos tenham retorno mais amplo e rápido.

A nova tecnologia denominada de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aliada às técnicas de Sensoriamento Remoto (processamento digital e interpretação imagens de satélite) se constituem em ferramentas extremamente úteis e poderosas para a identificação rápida das características não mutáveis (morfologia do terreno e pedologia) e mutáveis (cobertura vegetal e uso do solo) de uma bacia contribuinte e que condicionam os aportes de água e sedimentos a um local de interesse.

Um SIG é uma tecnologia que permite a implemetação de sistemas de gerenciamento de banco de dados para todas as aplicações que façam uso de dados espacialmente localizados, isto é, que podem ser mapeados em uma base cartográfica. Todas as atividades que envolvem a coleta de dados sobre a superfície terrestre podem se beneficiar de sistemas desta natureza. Deste modo entre as principais características de um sistema desse tipo, estão:

- a capacidade de recuperar informações baseado em localizações específicas;
- a capacidade de integrar informações provenientes de fontes e em formatos variados;
- a disponibilidade de aplicativos gráficos para a edição de mapas e geração de símbolos.

Diversas técnicas de manipulação e combinação de dados geocodificados obtidos por diversos sistemas digitais (Sensoriamento Remoto, Cartografia Digital, Modelagem Numérica do Terreno e Bancos de Dados), também denominadas de geoprocessamento, são eficientemente gerenciadas dentro do ambiente de um SIG.

A Equação Universal de Perda do Solo Modificada ou "Modified Universal Soil Loss Equation - MUSLE" (Williams, 1975 e 1977), dimensionada para estimar a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica, apresenta entre os seus parâmetros todos os fatores, acima expostos, que permitem caracterizar uma bacia piloto. Este tipo de modelagem, devido a sua simplicidade matemática, se adapta eficientemente às técnicas de geoprocessamento.

Neste estudo é apresentada uma metodologia na qual, através das técnicas de SIG e Sensoriamento Remoto, são desenvolvidos processos de obtenção, transformação, manipulação, combinação e análise, dos dados relativos aos fatores fixos e mutáveis, presentes na MUSLE. A metodologia desenvolvida, foi então aplicada à bacia hidrográfica do arroio Taboão - RS (100 Km²) como bacia piloto característica de uma extensa área (28.100 Km²) típica da zona de planalto do derrame basáltico sulriograndense. Esta região encontra-se submetida a processos erosivos, devido a forte ação antrópica (principalmente monocultura da soja e trigo).

Uma importante modificação em relação as metodologias tradicionais, refere-se a forma de obtenção e análise dos fatores envolvidos na caracterização de uma bacia piloto. Esta metodologia consiste em localizar as microbacias com áreas entre 1 e 2 Km² que constituem as células elementares de um modelo distribuído do tipo "cacho de uva" e reagrupá-las de acordo com

as características que mais condicionam a produção de água e sedimento. Este procedimento tem a principal vantagem de poder explicar não só a média dos fatores da MUSLE, mas também permitir uma análise da sua variação espacial.

Este trabalho, insere-se num projeto integrado de pesquisa (Projeto Potiribu), que visa estudos de regionalização dos processos hidrossedimentológicos que ocorrem na região do derrame basáltico sul-brasileiro (*Bordas et al., 1990*). Neste projeto participam várias entidades (CEPSRM/IPH - UFRGS, UNIJUI, cooperativas e prefeituras locais) apoiadas em várias fontes de financiamento (CNPq, FINEP, FAPERGS, EMBRAPA).

O Projeto Potiribu, também conta com a assessoria científica do ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Cooperation). Conta no currículo desta instituição, a sua enriquecedora participação em diversos projetos desta natureza em vários países.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste estudo se insere na proposta de desenvolver uma metodologia que permita identificar as características de uma bacia piloto, através da análise qualitativa e quantitativa de fatores hidrológicos (naturais e antrópicos) presentes em um modelo de produção de sedimentos, a MUSLE, utilizando-se para isso técnicas de SIG e de Sensoriamento Remoto.

Entre os objetivos específicos podemos ressaltar as seguintes etapas deste trabalho:

- desenvolvimento de programas que utilizam dados de um Modelo Numérico do Terreno (MNT) para identificação automática das bacias elementares dentro do ambiente de um SIG;

- uso de dados de MNT para a estimativa dos fatores topográficos envolvidos na MUSLE nas bacias elementares;
- análise e classificação da cobertura e uso do solo através de técnicas de Sensoriamento Remoto utilizando imagens orbitais LANDSAT TM;
- uso de um SIG como suporte de um banco de dados para as informações acima referidas, mais os dados obtidos pela digitalização complementar de mapas pedológicos;
- análise estatística da variação espacial das características da bacia piloto utilizando-se para isso os dados obtidos para cada bacia elementar;
- comparação de resultados utilizando-se bacias elementares de várias dimensões (1 a 2 Km², 15 a 20 Km² e 100 Km²);
- demonstração das possibilidades de quantificação da produção de sedimentos utilizando a base de dados residente no SIG e
- aproveitar e melhorar os "softwares" do sistema de informações geográficas (SGI) e do sistema de tratamento de imagens digitais (SITIM 150), desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e disponíveis no CEPSRM, através dos algoritmos implementados no decorrer desta pesquisa.

1.3. Relevância do Trabalho

A manipulação dos parâmetros naturais e antrópicos presentes em modelos para a caracterização de sistemas hidrológicos, é facilitada quando implementada no ambiente de um SIG.

O benefício mais evidente deste trabalho é introduzir uma metodologia, a partir da MUSLE, que permitirá abrir caminho à implementação de modelos hidrossedimentológicos mais complexos dentro de um banco de dados geocodificados, como os utilizados em um SIG.

As técnicas de geoprocessamento permitem que se trabalhe com uma quantidade de informações muito grande em um curto espaço de tempo, capacitando o pesquisador ao uso de modelos que necessitem, por exemplo: de uma grande resolução espacial e/ou temporal, assim como aqueles que possuam uma grande quantidade de parâmetros.

Este trabalho permite demonstrar alguns das vantagens que podem ser obtidas através do uso conjunto de dados de MNT, de imagens digitais obtidas por Sensoriamento Remoto e de mapas temáticos em formato digital, para obtenção de parâmetros para modelagens.

Tendo em vista a facilidade que um SIG oferece à manipulação e análise dos dados de interesse, sob forma digital, os resultados obtidos permitirão avaliar o comportamento hidrossedimentológico de uma determinada região com rapidez, precisão e relativo baixo custo.

Com as informações resultantes na área de teste, também pretende-se obter dados que possam ser estendidos a toda, ou boa parte da região fisiográfica do planalto médio do Rio Grande do Sul, assim como e que permitam determinar e dimensionar mecanismos preventivos (alteração de práticas conservacionistas, construção de obras de contenção e limitação do uso do solo).

1.4. Organização da Dissertação

O desenvolvimento deste estudo deu-se no Centro Estadual de Sensoriamento Remoto e Meteorologia - CEPSRM e no Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

No Capítulo II é apresentada a revisão de alguns trabalhos que utilizaram técnicas de geoprocessamento como suporte de modelos hidrossedimentológicos, enfatizando-se as vantagens referentes a flexibilidade dos sistemas de informação geográficas como ambiente para o manejo dos parâmetros dos referidos modelos.

As definições relativas ao modelo implementado neste estudo (USLE e MUSLE) são apresentadas no Capítulo III, onde são descritos os fundamentos de cada um dos parâmetros envolvidos na sua formulação assim como alguns dos diversos encaminhamentos para sua obtenção.

A conceituação de um sistema de informações geográficas, assim como a sua aplicação em modelos de produção de sedimentos (USLE e MUSLE) e hidrologia é abordada no Capítulo IV.

O Capítulo V refere-se a uma das ferramentas normalmente presente em um SIG destinado a estudos de recursos naturais: a modelagem numérica do terreno - MNT que é aqui enfocada tanto na sua forma de obtenção, através de processos de interpolação, como também nas suas diversas maneiras de apresentação. Neste capítulo também é feita menção às informações possíveis de serem obtidas de um MNT, na forma de uma matriz digital de altitudes, enfatizando-se àquelas associadas aos fatores topográficos da MUSLE.

No Capítulo VI é apresentada uma revisão sobre as técnicas de Sensoriamento Remoto, sistemas sensores e processamento de imagens digitais. Entre as técnicas de processamento de imagens é dado destaque aos métodos de classificação da cobertura do solo, através de processos determinísticos e estatísticos e que se constituem na principal aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto neste estudo.

No Capítulo VII é feita a análise da produção de sedimentos utilizando-se a MUSLE com dados manipulados e gerenciados em um SIG e de imagens LANDSAT TM classificadas, cobrindo a bacia hidrográfica do arroio Taboão e subacias. Neste capítulo é descrita fisicamente a região de estudo, assim como algumas características antrópicas de uso do solo. Posteriormente são descritos os materiais utilizados (cartas topográficas e pedológicas, imagens orbitais, sistemas sensores e dados de campo). O desenvolvimento lógico dos algoritmos implementados para a determinação de alguns dos parâmetros estudados, assim como as operações de cruzamento e superposição das informações relativas as características da bacia, são também descritos neste capítulo.

Os resultados deste trabalho são apresentados ainda no Capítulo VII, sob a forma de tabelas e mapas. Também são feitas algumas comparações entre os métodos tradicionais e a metodologia proposta nessa dissertação. Pode-se afirmar que as informações obtidas através de técnicas de geoprocessamento apresentaram um potencial de manipulação maior, visto que estas já residem no ambiente flexível de um banco de dados.

O Capítulo VIII apresenta algumas conclusões e recomendações referentes as formas de obtenção e manipulação dos dados, de forma a otimizar a metodologia proposta.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um SIG possui uma grande capacidade de análise de informações, o que lhe permite executar diversas operações nos aspectos topológicos ou espaciais de dados geográficos, assim como nos atributos descritivos ou não-espaciais desses dados ou nos aspectos espaciais e descritivos conjuntamente. Segundo *Burrough* (1986), esta capacidade de análise inclui operações de transformação de dados, que vão desde simples métodos de acesso ou pesquisa em um banco de dados, até métodos de análise estatística univariada ou multivariada utilizando funções de contexto ou técnicas de interpolação. Um conjunto significativo destas operações e suas aplicações é explicado nos capítulos seguintes.

As capacidades operacionais presentes na maioria dos SIG's, tornou possível uma manipulação e controle mais eficientes de diversos modelos espaciais no campo dos recursos hídricos, permitindo a estimativa de parâmetros e a simulação de eventos através da sobreposição de planos de informação por meio de operações lógicas ou matemáticas.

O uso de SIG's no gerenciamento de modelos fundamentados na Equação Universal de Perda dos Solos ou "Universal Soil Loss Equation - USLE" (*Wischmeier, 1958*), são alguns dos melhores exemplos da aplicação das técnicas de geoprocessamento na Hidrologia. Neste capítulo serão identificados alguns destes trabalhos.

É conveniente enfatizar, que o gerenciamento de modelos do tipo USLE através de geoprocessamento, normalmente envolve a necessidade de conhecimento de técnicas de Sensoriamento Remoto, e de Modelagem Numérica do Terreno, técnicas de amostragem e de processamento de dados. Também é importante ter uma noção bastante clara do funcionamento do modelo em questão, percebendo as suas limitações, de forma a obter dados significativos.

Burrough (1986) descreve, em um capítulo dedicado à modelagem espacial, a utilização de SIG para a avaliação do potencial de uso da terra em uma área de 1406 ha no Distrito de Kisii no Quênia. Entre os indicadores do potencial de uso da terra, está a suscetibilidade a erosão hídrica.

Para este projeto foi utilizado um conjunto bastante detalhado de informações digitalizadas, incluindo mapas de levantamento detalhado dos solos da região (escala 1:12500 incluindo dados sobre nutrientes, oxigenação e profundidade), um modelo numérico do terreno (obtido através da interpolação da isolinhas presentes em mapas topográficos) para a obtenção de parâmetros topográficos como declividade e comprimento de vertente, mapas da distribuição de mananciais e mais um conjunto de dados sobre a infraestrutura da região. Com estas informações foi feito um estudo sobre a qual a técnica conservacionista mais adequada para o cultivo do milho na região. Isto foi possível por meio de simulações feitas sobre dois modelos : a USLE e o Modelo de Estimativa de Perda de Solo para o Sul da África - MEPSSA desenvolvido por *Stocking* (1981), conforme citado por *Burrough* (1986).

Desta forma foi possível estimar por exemplo : qual a profundidade que o solo deveria ter para reduzir a erosão, as taxas de erosão absoluta e os benefícios de diferentes práticas conservacionistas. A figura II.1 descreve a sequência de operações desta modelagem.

Uma metodologia para localização de fontes de sedimentos, bem como a estimativa da quantidade de solo perdida em uma bacia hidrográfica de aproximadamente 130 km² em Illinois -EUA, utilizando um SIG e modelo espacialmente distribuído foi apresentado por *Lee et al* (1986). A extensa base de dados, incluindo planos de informação referentes a tipo de solo, uso do

solo, topografia, rede de drenagem e os divisores de água foram compilados sob formato digital, a partir de diversas fontes. O SIG utilizado para o gerenciamento destas informações foi o ARC/INFO. As fontes de produção de sedimentos foram localizadas através operações de cruzamento dos fatores da USLE. A quantidade de solo perdida pelo processo de erosão foi estimado utilizando o Modelo Agrícola de Fontes de Poluição Não-Pontual (AGNPS)⁴. Duas malhas com células de aproximadamente 60 e 240 m² serviram de base para o modelo.

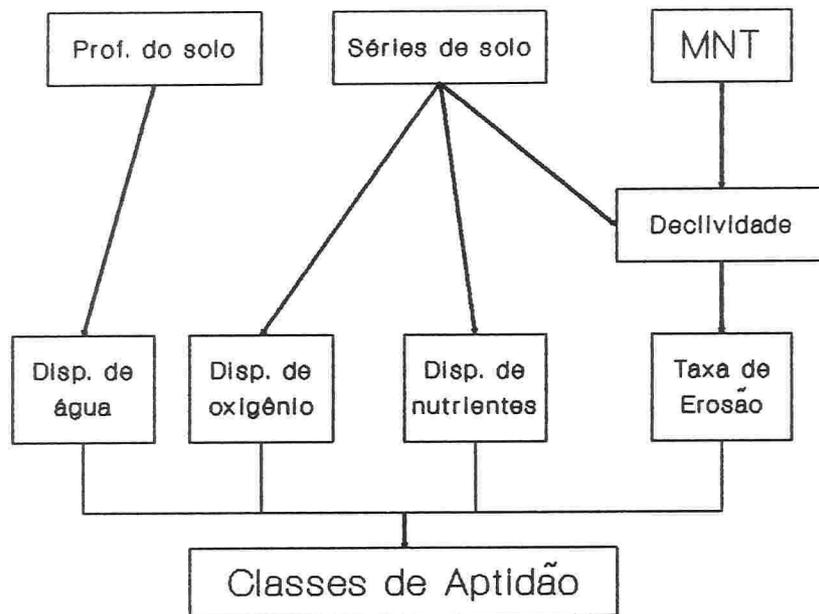


Fig. II.1 - Fluxograma de operações para a estimativa do potencial uso do solo para o cultivo do milho Kisii - Quênia.

Neimann et al. (1987), desenvolveram um projeto no Condado de Dane - EUA para, entre outros objetivos, planejar o controle da erosão do solo na região. O modelo utilizado, é o recomendado pela legislação do Estado de Wisconsin (USLE). Dados relativos aos parâmetros deste modelo foram obtidas através de imagens digitais obtidas por Sensoriamento Remoto, cartas temáticas,

⁴ AGRICULTURAL NONPOINT SOURCE POLLUTION MODEL

posteriormente digitalizados e o uso de geoposicionamento por satélites (GPS) para localização de dados de campo. Todas as informações, inclusive as referentes a USLE, foram armazenadas e monitoradas no ambiente do banco de dados de um SIG.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), estimou em 1987 os valores da erosão potencial e erosão atual da Bacia do Peixe-Paranapanema - SP, através do tratamento numérico dos parâmetros presentes na USLE, utilizando o sistema gráfico SURFACE II. Os valores relativos aos parâmetros do modelo, foram obtidos através da interpretação de imagens de satélite, cartas temáticas e topográficas, e de uma grade regular de declividades e comprimento de vertentes. O padrão desta rede se adaptou a uma escala de projeto igual a 1:250000. O resultado final desse relatório apresentou um mapa temático da distribuição da erosão laminar na área da bacia.

Um outro exemplo de utilização de um SIG para a modelagem do uso do solo, é apresentado por *Meijere et al (1988)*. Neste trabalho o cenário é bacia superior do Rio Komering, no sul da Sumatra. Foram combinados dados físicos, sociais e econômicos para planejar o uso futuro do solo da região. Trata-se de uma projeção hipotética, mas serve para ilustrar o processo.

Entre os dados físicos estão os parâmetros da USLE, que foram usados para construir um mapa de erosão potencial da bacia, como é descrito na Figura II.2. O SIG utilizado neste trabalho foi o ILWIS (Integrated Land and Watershed Management Information System), desenvolvido pelo Instituto Internacional de Levantamento Aero-Espacial e Ciências da Terra (ITC), Holanda.

Sivertum et al (1988), descreve o uso de técnicas de Sensoriamento Remoto, processamento de imagens, cartografia digital e sua sobreposição em um SIG, com o objetivo de fazer

um inventário do uso do solo e o gerenciamento de recursos hídricos. Neste trabalho, o SIG foi utilizado para facilitar a identificação das áreas fontes de sedimentos não-pontuais críticas na bacia hidrográfica do Rio Motala na Suécia. O modelo utilizado para esse fim foi uma variação da USLE. Esse estudo mostra perfeitamente o potencial do SIG para identificar áreas com prováveis problemas associados a produção de sedimentos e de qualidade da água.

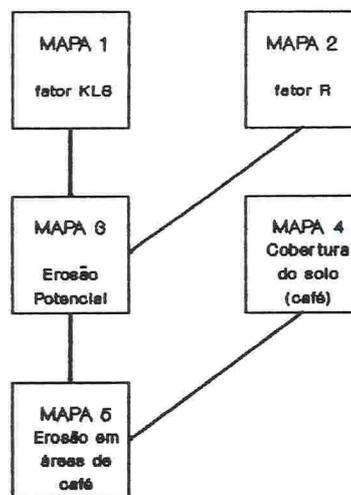


Fig. II.2 - Seqüência para estimativa de erosão potencial.
(segundo *Meijere et al. (1988)*)

Por último, *Stuebe (1990)* apresenta a possibilidade de estimar o volume do escoamento superficial produzido em uma bacia, utilizando técnicas de geoprocessamento. Os escoamentos superficiais de seis bacias foram modelados de duas formas : pelo modelo da Curva Número do "Soil Conservation Service" e no ambiente de um SIG. Os dados de entrada (topografia, solos e cobertura do solo) foram apresentados sob formato digital no SIG. Contrastando com estudos prévios, o SIG foi utilizado em todas as fases do processo de modelagem, incluindo a delimitação das

bacias e a definição dos caminhos percorridos pela água. A comparação entre os dois métodos foi consistente, indicando o uso de SIG como uma alternativa aceitável sobre as técnicas tradicionais de modelagem de escoamento superficial.

III. ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS ATRAVÉS DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLOS

3.1. Equação Universal de Perda dos Solos

Os especialistas em conservação do solo há muitos anos vêm estudando modelos para estimar a produção de sedimentos em áreas agrícolas.

As primeiras estimativas de produção de sedimentos eram de natureza qualitativa e ilustravam como uma determinada prática agrícola diferia de outra no controle da erosão do solo. Inicialmente, os modelos foram desenvolvidos de maneira a descrever a perda de solos usando uma única variável. Este tipo de modelo só podia funcionar em um determinado sítio, onde outros fatores contribuintes no processo de produção de sedimentos, se mantivessem relativamente constantes. Na medida em que os estudos na área da conservação dos solos passaram a permitir um melhor entendimento dos diversos processos envolvidos na produção de sedimentos, equações com múltiplos fatores foram sendo desenvolvidas, utilizando uma abordagem empírica. Estas análises culminaram em um dos modelos mais usados hoje em dia para estimar a perda de solos, a Equação Universal de Perda dos Solos (Universa Soil Loss Equation - USLE) desenvolvida por *Wischmeier e Smith* na década de 50, no Departamento de Agricultura dos EUA.

É importante resaltar que a USLE foi desenvolvida a partir de parcelas padronizadas de 22,13 m de comprimento e 9% de declividade, somente em áreas cultivadas dos EUA. Esta observação é importantíssima, visto as características climáticas, pedológicas, morfológicas e das práticas de cultivo no Brasil, costumam ser bastante diferentes das presentes nos EUA. Isto poderá em alguns casos representar condições de não-validez para a aplicação da USLE.

A USLE caracteriza-se, como ocorre com a maioria dos modelos empíricos de produção de sedimentos, por apresentar duas famílias de fatores : a que inclui os fatores naturais e aquela que agrupa os fatores antrópicos.

A primeira família de fatores, pode ser agrupada em três grupos :

- a) fatores ligadas à natureza do solo, envolvendo a sua textura, estrutura e permeabilidade. Estes fatores podem ser englobados no conceito de erodibilidade.
- b) fatores referentes à morfologia do terreno, os quais dizem respeito à conformação das vertentes e podem ser expressos através da declividade e comprimento de cada vertente.
- c) fatores ligados ao clima : abrangendo essencialmente a quantidade de água que atinge a superfície do terreno, causando remoção do solo, através de chuvas. Este componente pode ser expresso através do conceito de erosividade da chuvas.

O segundo grupo de fatores, enfoca o estudo da ocupação da terra, compreendendo o conhecimento de toda a sua utilização isto é, a ação antrópica, ou quando não utilizada pelo homem, a caracterização dos tipos e categorias de coberturas naturais, bem como suas respectivas concentrações.

O conhecimento das formas de ocupação da terra, é um fator imprescindível ao estudo dos processos erosivos em desenvolvimento dentro de uma determinada região.

Podemos então definir dois aspectos da influência antrópica, condicionantes da produção de sedimentos, são eles :

- a) Uso e manejo dos solos, que caracteriza a capacidade que uma determinada cobertura tem de evitar o arraste das partículas do solo pela água.
- b) Práticas conservacionistas, ou seja, as diferentes formas de tratar um terreno, considerando um determinado tipo de cultivo, de maneira a criar obstáculos, para que não ocorra a erosão laminar.

Desta forma, podemos expressar matematicamente a USLE da seguinte maneira:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (III.1)$$

onde :

- A = perda de solo em unidade de massa por unidade de área e unidade de tempo;
- R = fator referente ao escoamento superficial;
- K = fator de erodibilidade dos solos;
- LS = fator topográfico;
- C = fator de manejo e
- P = fator de práticas conservacionistas.

A USLE foi desenvolvida como um método para estimar a média anual de perda de solo decorrente da erosão hídrica. Através da avaliação dos parâmetros constituintes da equação tornou-se possível escolher técnicas e cultivos que permitam reduzir as taxas de produção de sedimentos e sugerir valores de tolerância para um determinado tipo de solo.

3.1.1. Fator de Erosividade da Chuva (R)

O fator de erosividade da chuva (R) é um índice numérico que expressa a capacidade esperada de uma chuva causar erosão em uma área sem proteção em uma dada localidade (Bertoni e Lombardi, 1985).

A partir de análises feitas utilizando dados de perdas de solo medidas sobre parcelas experimentais, associados com as características de chuva (intensidade, duração e energia cinética) mostrou-se que quando outros fatores, à exceção da chuva, são mantidos constantes, as perdas de solo ocasionadas pelas chuvas nos terrenos cultivados são diretamente proporcionais ao valor do produto de duas grandezas: a energia cinética total de um evento de chuva e sua intensidade máxima em 30 minutos (Wischmeier e Smith, 1958).

$$EI_{30} = E_c \times I_{30} \quad (\text{III.2})$$

onde:

$$\begin{aligned} EI_{30} &= \text{índice de erosão (m}^2 \text{ mm/ha.h);} \\ E_c &= \text{energia cinética da chuva em kg.m/ha.mm) e} \\ I_{30} &= \text{intensidade máxima em 30 minutos, em mm/h.} \end{aligned}$$

Esse produto é considerado por Wischmeier (1959), citado por Leprun (1981), como a melhor expressão da potencialidade erosiva da chuva.

E_c deve ser calculado para cada evento de chuva através da seguinte equação:

$$E_c = 1,213 + 0,890 \log_{10} I \quad (\text{III.3})$$

onde: E_c = energia cinética em kg m/m² mm de chuva e
 I = intensidade em mm/h.

Para calcular EI_{90} , é necessário dividir o diagrama de pluviógrafo de cada evento de chuva em *intervalos de intensidade uniformes* e determinar a energia cinética de cada seção, somar os valores das energias de todas as seções e multiplicar essa energia total pela maior intensidade de chuva registrada durante um período de tempo de 30 minutos consecutivos. A soma dos resultados de todas as chuvas de um ano permite a obtenção do valor do fator R anual.

De acordo a *Wischmeier (1959)* deve-se:

- computar o valor de R para eventos com 12,7mm ou mais de altura de chuva;
- computar o valor de R para eventos com menos de 12,7 mm de chuva se a quantidade de chuva em 15 minutos for igual ou maior a 6,4 mm,
- separar as chuvas, considerando que um período de 6 horas ou de menos de 1,27 mm, marcam o limite entre duas chuvas.

Pode-se simplificar os valores o procedimento acima expresso, simplificando ordinariamente os valores (12,7; 6,4; 1,27) pelos seguintes valores: 10,0; 6,0 e 1,0 mm respectivamente.

3.1.2. Fator de Erodibilidade do Solo (K)

O fator, de erodibilidade do solo, K , na USLE é uma descrição quantitativa inerente a erodibilidade de um solo em particular. Este fator reflete o fato de que diferentes solos possuem diferentes taxas de erosão quando os outros fatores envolvidos nesse processo são mantidos constantes. As propriedades do solo que regem as taxas de infiltração, permeabilidade, capacidade de armazenamento de água, dispersão, salpico, abrasão e força de transporte também afetam a erodibilidade (*Mitchell et al. 1980*).

O fator (K) tem seu valor quantitativo determinado experimentalmente em parcelas unitárias, sendo expresso, como a perda de solo (A), por unidade de índice de erodibilidade da chuva (R). Uma parcela unitária possui 22,13 m de comprimento e uma declividade uniforme de 9%, em alqueive, preparada no sentido do declive. Alqueive nesse caso significa um terreno que foi preparado e deixado livre de vegetação por um mínimo de dois anos, ou até que os resíduos da cultura anterior estejam decompostos (Bertoni e Lombardi, 1985).

Na impossibilidade de elaborar um estudo sobre parcelas padrões, Wischmeier e Smith (1978) aconselha o uso do nomograma Fig. III. 1. O nomograma de erodibilidade do solo pode ser usado para obter o fator K , para o caso de solos que não tenham tido esse valor previamente determinado. Cinco parâmetros são necessários para a utilização do nomograma: porcentagem de silte (0,002 - 0,05 mm) mais a porcentagem de areia fina (0,05 - 0,10 mm), porcentagem de areia (0,10 - 2,0 mm), conteúdo de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade do solo.

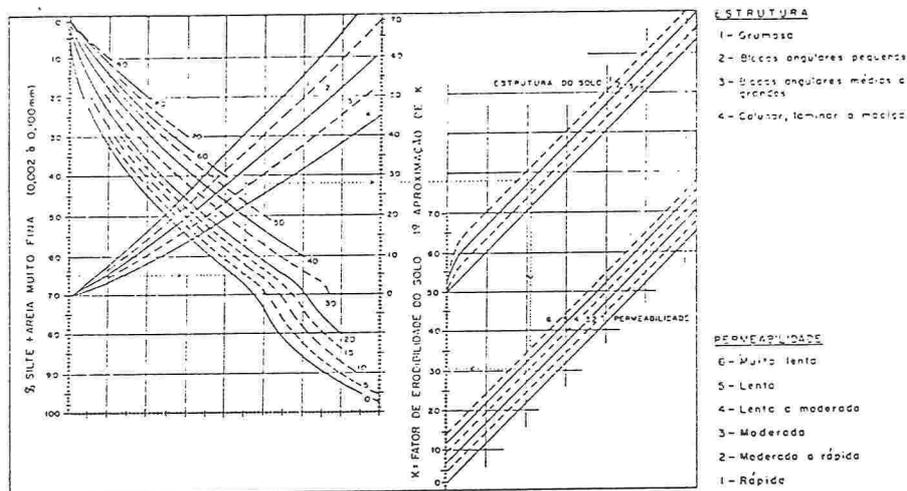


Fig. III.1 - Nomograma para a determinação do fator de erodibilidade do solo K .

3.1.3. Fator Topográfico (LS)

Os efeitos do comprimento das vertentes e do gradiente de declividade são caracterizados na USLE pelos fatores L e S respectivamente. Entretanto, para fins de aplicação prática desta equação são considerados conjuntamente como um fator topográfico único, LS . O comprimento de vertente, L , é definido como sendo a distância entre o ponto onde se origina o escoamento superficial até o ponto onde a declividade decresce o suficiente para que ocorra a deposição de sedimentos ou onde a água entra no sistema de canais de drenagem (naturais ou artificiais). O gradiente de declividade representa a variação da declividade em intervalos da vertente e é expresso em porcentagem. O desenvolvimento da USLE foi elaborado sobre parcelas padronizadas de 22,13 metros de (*Wischmeier et al., 1978*), desta forma, o fator de comprimento de vertente foi definido como:

$$L = \left(\frac{x}{22,13} \right)^m \quad (III.5)$$

onde L é o fator de comprimento de vertente, x é o comprimento de vertente em metros e m , um expoente.

Os experimentos desenvolvidos por *Wischmeier e Smith (1978)*, sugerem os valores seguintes para o expoente m :

- $m = 0,5$ se a declividade ≥ 5 por cento,
- $m = 0,4$ se a declividade < 5 por cento e > 3 por cento,
- $m = 0,3$ se a declividade ≤ 3 por cento e ≥ 1 por cento, e
- $m = 0,2$ se a declividade < 1 por cento.

Wischmeier e Smith (1958) propõe ainda uma equação quadrática relacionando perda de solo (A) com o gradiente de declividade (S). A padronização desta equação para uma declividade de 9%, resultou na seguinte função:

$$S = \frac{0,43 + 0,30 s + 0,043 s^2}{6,613} \quad (III.6)$$

onde S é o fator do gradiente de declividade, e s o gradiente em porcentagem.

A definição matemática do fator topográfico LS , passa a ser a combinação das equações III.5 e III.6, resultando:

$$LS = \left(\frac{x}{22,13} \right)^m (0,065 + 0,045s + 0,0065 s^2) \quad (III.7)$$

onde todos os termos já foram previamente definidos.

3.1.4. Fator de Uso e Manejo do Solo (C)

O fator de uso e manejo do solo, C , representa a razão da perda de solo que ocorre em uma área com uma dada cobertura, e a que ocorre em uma área mantida continuamente descoberta. Ambas as situações consideradas em parcelas de solo padronizadas de acordo com a USLE. Se uma determinada área estiver cultivada, as perdas de solo serão menores do que se esta estiver descoberta. Essa redução depende das combinações da cobertura vegetal, seqüência de culturas e práticas de manejo. Depende também do estágio de crescimento e desenvolvimento da cultura durante o período de chuvas (Bertoni e Lombardi, 1985).

O fator C deve portanto ser determinado experimentalmente. Na impossibilidade de se elaborar um número suficiente de ensaios, e/ou na expectativa de se obter apenas uma estimativa primária da produção de sedimentos de um determinado lugar, pode-se estimar o valor do fator C , utilizando as análises dos diversos efeitos do uso e manejo dos solos apresentadas por

Wischnmeier e Smith (1958, 1978) nos Estados Unidos e por Bertoni e Lombardi (1985) para o Estado de São Paulo - Brasil, na forma de tabelas com razões de perda de solo (tabela III.1).

Tabela III.1 - Valores de C, da USLE, para o Estado de São Paulo.

Cobertura seqüência e manejo	Produtividade	Razão de perdas de solo por período de estágio de cultura (%)				
		D	1	2	3	4
Milho, contínuo, palha queimada	Média	37	30	21	6	1
Milho, contínuo, palha enterrada	Média	23	19	17	4	2
Milho contínuo, palha superfície	Média	-	5	2	1	1
Algodão, contínuo, convencional	Média	40	60	40	50	20
Soja, contínuo, convencional	Média	35	30	20	20	5
Pasto (1º ano) rotação	-	-	-	40	-	-
Pasto (2º ano) rotação	-	-	-	0,4	-	-
Milho, rotação após pasto	Média	10	11	8	4	1
Milho, rotação, plantio direto após pasto	Média	-	8	5	3	1
Soja, rotação após milho	Média	15	12	20	4	3
Soja, rotação plantio direto após milho	Média	-	8	10	4	3
Algodão, rotação após soja	Média	20	20	30	15	13
Cana-de-açúcar (1º ano) convencional	Média	-	-	15	-	-
Cana-de-açúcar (2º ano)	Média	-	-	0,15	-	-

período D - preparo do solo: desse preparo ao plantio;

período 1 - plantio: do plantio a um mês após o plantio;

período 2 - estabelecimento: do fim do período 1 até dois meses após o plantio;

período 3 - crescimento e maturação: de dois meses após o plantio até a colheita;

período 4 - resíduo: da colheita até o preparo do solo;

3.1.5. Fator de Práticas Conservacionistas (P)

O fator P da USLE representa a razão entre a perda de solo que ocorre para uma dada prática conservacionista e aquela que ocorre para cultivos no sentido do declive máximo do terreno (plantio morro abaixo).

As práticas mais comuns para culturas anuais são: plantio em contorno, plantio em faixas de contorno, terraceamento e alternância de campinas.

O fator P só é aplicado em áreas cuja cobertura sejam cultivos. Em outras palavras, o fator P é um ponderador do fator C em situações especiais de uso e manejo do solo.

A tabela III.2 apresenta alguns valores do fator de P da USLE, para as práticas conservacionistas de proteção do solo contra a erosão, obtidos pela Seção de conservação do Solo do Instituto Agronômico de Campinas - SP, segundo *Bertoni e Lombardi (1985)*.

Tabela III.2 - Valores de P , da USLE, para algumas práticas conservacionistas.

Práticas conservacionistas	Valor de P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Alternância de campinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

3.1.6. Tolerância de Perdas de Solo

A tolerância de perda de solo representa a taxa máxima de erosão do solo aceitável para que a produtividade seja mantida a um nível alto. Esse valor é dado normalmente em toneladas de perda de solo por hectare por ano.

A intensidade esperada de produção de sedimentos para cada uma das alternativas de cultivo e manejo para uma área qualquer pode ser obtido pela equação de perdas de solo.

O confronto entre as previsões obtidas através da USLE e os valores considerados de tolerância, permite decidir qual ou quais as combinações de cultivo e manejo que devem ser adotadas. Nas previsões em que as estimativas de perda de solo são menores do que os valores de tolerância, verifica-se um controle satisfatório da erosão.

O estabelecimento de tolerância para solos e topografia tem sido geralmente uma questão de julgamento coletivo, em que fatores físicos e econômicos são levados em consideração. A tolerância dessas perdas depende das propriedades do solo, quais sejam : profundidade, topografia e erosão antecedente (Bertoni e Lombardi, 1985).

3.1.7. Potencial Natural a Erosão Laminar

A combinação dos fatores naturais do meio físico da USLE, nos permitem obter o que se denomina *potencial natural à erosão*. Os valores alcançados correspondem às perdas de solo em áreas continuamente destituídas de cobertura vegetal e sem qualquer intervenção antrópica, sendo expressos pelo produto dos fatores erosividade das chuvas, erodibilidade do solo e fator topográfico.

O estudo do potencial natural à erosão permite identificar quais as melhores combinações de uso e manejo do solo a serem aplicados em um determinado sítio, para que as perdas de solo não ultrapassem os valores de tolerância.

3.2. Equação Universal de Perda dos Solos Modificada

Os métodos para estimar a perda de solos variam bastante quanto a forma e extensão. A USLE foi desenvolvida a princípio para calcular a produção de sedimentos em pequenos campos de cultivo e cada um dos seus fatores foi desenvolvido para este propósito. Por outro lado, métodos empíricos, como a equação universal, permitem também relacionar a produção de sedimentos com parâmetros hidrológicos (ex. : escoamento superficial).

Atendendo a este enfoque, a USLE foi submetida por *Williams e Brendt (1972)* a algumas alterações, com a finalidade de estimar a produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Estas modificações facilitaram a modelagem da USLE permitindo a obtenção dos seus fatores através de técnicas de Geoprocessamento, como Sensoriamento Remoto e análise da modelagem numérica do terreno, entre outras.

As alterações efetuadas na USLE (para a sua aplicação em bacias hidrográficas), tem por princípio a ponderação dos fatores da equação de acordo com as suas variações nas diferentes áreas da bacia e o cálculo de razões de transferência (valor medido da produção de sedimentos em um dado ponto ao longo do canal de uma bacia, dividido pelo valor estimado, através da USLE, da produção de sedimentos a montante deste ponto) para as diferentes áreas da bacia, em função de suas características fisiográficas, afim de poder estimar a produção de sedimentos da bacia em uma só solução da equação.

Em outras palavras a razão de transferência é uma forma de ajustar a equação universal ao comportamento individual de cada bacia. Correlacionado os valores de razão de transferência, obtidos em diferentes bacias de uma região, com alguma característica fisiográfica (ex.: declividade do canal principal), pode-se estimar a razão de transferência de outras bacias da região e por consequência corrigir o valor estimado da produção de sedimentos nesta bacia.

O cálculo da razão de transferência torna-se desnecessário se o fator de erosividade da chuva (R) for substituído por um fator de escoamento superficial.

A USLE foi desenvolvida para estimar a produção anual de sedimentos. Esta abordagem não se adequa a modelagem de qualidade de água, pois esse tipo de estudo requer um intervalo de tempo mais curto. Com as modificações impostas à USLE, torna-se possível estimar a produção de sedimentos para um evento de chuva, aumentando a precisão da equação.

Esta última versão da USLE, resultou no que denominou-se Equação Universal de Perda dos Solos Modificada - MUSLE, a qual passou a ser expressa da seguinte forma:

$$Y = 11,8 (Q \times q_p)^{0,56} K LS C P \quad (III.8)$$

onde: Y = produção de sedimentos em toneladas para um evento de chuva;

Q = o volume de escoamento superficial em m^3 ;

q_p = o pico do hidrograma de cheia em m^3/s ;

e K , LS , C e P são os mesmos fatores presentes na USLE.

Os valores de Q e q_p podem ser obtidos, sobretudo, a partir de observações. No entanto na impossibilidade de efetuar-se campanhas para medição destes valores em campo, pode-se estima-los a partir de modelos de escoamento superficial como por exemplo os modelos Standford, USDAHL-70, HYMO ou Soil Conservation Service (Williams, 1975), entre outros tantos.

A simplicidade matemática da MUSLE se adequa perfeitamente à natureza de um SIG. O Fator de Erodibilidade do Solo (K) para uma bacia, passou a ser estimado, na MUSLE, pela ponderação dos valores de K , para cada tipo de solo presente na bacia, em função da área coberta pela mancha de solo, através da seguinte equação:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \times DA_i}{DA} \quad (\text{III.9})$$

onde: K = fator de erodibilidade médio para a bacia;
 K_i = fator de erodibilidade do solo i ;
 DA_i = área coberta pela mancha de solo i dentro da bacia;
 DA = superfície de drenagem da bacia e
 n = o número total de solos presentes na bacia.

O fator K_i do solo i , é calculado conforme a metodologia definida por *Wischmeier e Smith (1958)* para a USLE (ver item 3.1.2).

Para estimar o Comprimento de Vertente Médio da bacia (x), ou seja, a distância média percorrida pela água sobre a superfície da bacia, *Williams e Brendt (1972)* considerou-a como sendo retangular, com um único canal de drenagem no centro, segundo a direção longitudinal. A largura da bacia é igual a razão da área do retângulo pelo comprimento do canal. Como o canal está localizado no centro da bacia, a distância percorrida pela água corresponde à metade da largura do retângulo. Desta forma o fator x pode ser assim calculado:

$$x = \frac{0,5 DA}{LCH} \quad (\text{III.10})$$

onde: DA = a área de drenagem da bacia e
 LCH = comprimento total dos canais da bacia.

Embora esta equação tenha sido derivada para uma bacia retangular de um só canal, pode-se dizer que é uma aproximação realística do valor de x para bacias de maior complexidade (*Williams e Berndt, 1972*).

Para estimar o Gradiente Médio de Declividade da Vertente, (s), deve-se proceder ao cálculo da declividade média, s_i , entre cada curva de nível determinada a partir de um mapa topográfico pela expressão :

$$s_i = \left[\frac{H_i (LC_i + LC_{i+1})}{2 DA_i} \right] 100 \% \quad (\text{III.11})$$

onde: s_i = declividade média em porcentagem para a área i entre as isolinhas i e $i+1$;
 H = diferença de altura entre as isolinhas e
 DA_i = área entre as isolinhas i e $i+1$.

O valor de s é então calculado pela ponderação do incremento das declividades entre as isolinhas segundo a área entre elas, podendo então ser expresso da seguinte forma :

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n s_i DA_i}{DA} \quad (\text{III.12})$$

onde n é o número de áreas entre isolinhas dentro da bacia.

O fator topográfico LS médio da USLE é então estimado pela equação (III.9), utilizando para x e s respectivamente as equações (III.10) e (III.12).

Como se pode, ver a estimativa do valor s apresentada nesta metodologia é bastante trabalhosa para bacias com declividades acentuadas, visto que nesses casos o número de isolinhas é elevado e estas encontram-se muito próximas, dificultando o cálculo das áreas entre elas. Também é difícil medir o comprimento de todos os canais de uma bacia com uma densidade de drenagem elevada, necessário para estimar o valor do comprimento

médio da vertente x . No capítulo V desta dissertação, são apresentadas técnicas que permitem estimar estes valores de forma mais eficiente, através de técnicas de Modelagem Numérica do Terreno, fundamentadas em um contexto hidrológico.

O valor do fator de uso e manejo do solo, C , para cada tipo de cultivo ou cobertura do solo é estimado para cada mês de seguindo os modelos apresentados por *Wischmeier e Smith (1978)*.

O fator de práticas conservacionistas será calculado somente nas áreas de manejo agrícola. O produto dos fatores C e P é ponderado de acordo com a área de abrangência de cada tipo de cultivo dentro da bacia para cada mês. Assim temos :

$$CP_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij} \times P_i \times DA_i}{DA} \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad (\text{III.13})$$

onde :

- CP_j = fator composto de uso do solo e práticas conservacionistas no mês j ;
- C_{ij} = fator de uso do solo tipo i durante o mês j ;
- P_i = fator de práticas conservacionistas, aplicada sobre o uso do solo tipo i ;
- DA_i = área correspondente ao uso do solo tipo i e
- DA = área total da bacia.

Nos capítulos seguintes é feita uma demonstração do encaminhamento que deve ser tomado para uma obtenção e manipulação ótima dos parâmetros da MUSLE através de técnicas de geoprocessamento, e a apresentação dos conceitos técnicos envolvidos.

IV. UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEOINFORMAÇÃO (SIG) EM MODELO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

4.1. Conceitos de Sistema de Informações Geográficas

4.1.1. Definições

Um Sistema de Informações Geográficas pode ser definido como um conjunto de ferramentas de planejamento para aplicações que façam uso de dados espacialmente localizados, isto é, passíveis de serem mapeados em uma base cartográfica. Todas as atividades que envolvem a manipulação de dados distribuídos espacialmente na superfície da Terra podem beneficiar-se com sistemas dessa natureza. Entre as principais características de um SIG, pode-se citar:

- capacidade de acesso à informações tendo como base uma localização espacial específica;
- capacidade de integrar, isto é, cruzar informações provenientes de fontes, escalas e formatos distintos;
- disponibilidade de aplicativos gráficos para edição de mapas e geração de símbolos;

A utilização de computadores como suporte de um SIG, permite não apenas aumentar a eficiência de manuseio de dados cartográficos, como também possibilitar a combinação das informações geográficas. Para isso um SIG deverá:

- incorporar um banco de dados geo-codificados que permita a consulta, análise e combinação das informações armazenadas;

- permitir a visualização dos diversos níveis de informação, independentemente ou sobrepostos.

Os SIG's podem ser divididos em dois grandes grupos. O primeiro grupo de SIG's diz respeito a sistemas de inventário. Estes sistemas incluem levantamentos extensivos sobre vastas porções de território, seja para um fim específico (uso do solo, topografia, cobertura vegetal, etc ...), seja para uma base de dados extensiva. Neste caso, o número de cartas envolvidas pode ser da ordem de centenas a milhares, dependendo do território e da escala de trabalho. As aplicações normalmente exigem operações simples, realizadas repetidamente sobre todo o conjunto de cartas. Este tipo de sistema prioriza a capacidade de armazenamento de dados e a eficiência de operação.

O segundo grupo inclui sistemas dedicados a projetos. Neste caso é feita a análise de um problema específico como por exemplo, estudo para localização de rodovias, análise de impactos ambientais e modelagem de fenômenos em geral. Estas tarefas normalmente compreendem uma região limitada, porém uma grande variedade de dados pode ser necessária para fornecer uma resposta adequada. Neste grupo é dada ênfase a flexibilidade das operações.

A manipulação e integração dos parâmetros presentes na MUSLE para a estimativa da erosão potencial é perfeitamente possível através de um SIG dedicado a projetos. Os diferentes fatores podem ser derivados de diferentes fontes, tanto cartográficas como tabulares. Por exemplo, os fatores associados a morfologia do terreno (LS) podem ser derivados de cartas topográficas, a erodibilidade do solo (K) de cartas temáticas e tabelas de pedologia, o fator de cobertura (CP) de imagens orbitais tematizadas e o fator de escoamento (R) de registros linigráficos, de acordo com o esquema apresentado na figura VI.1.

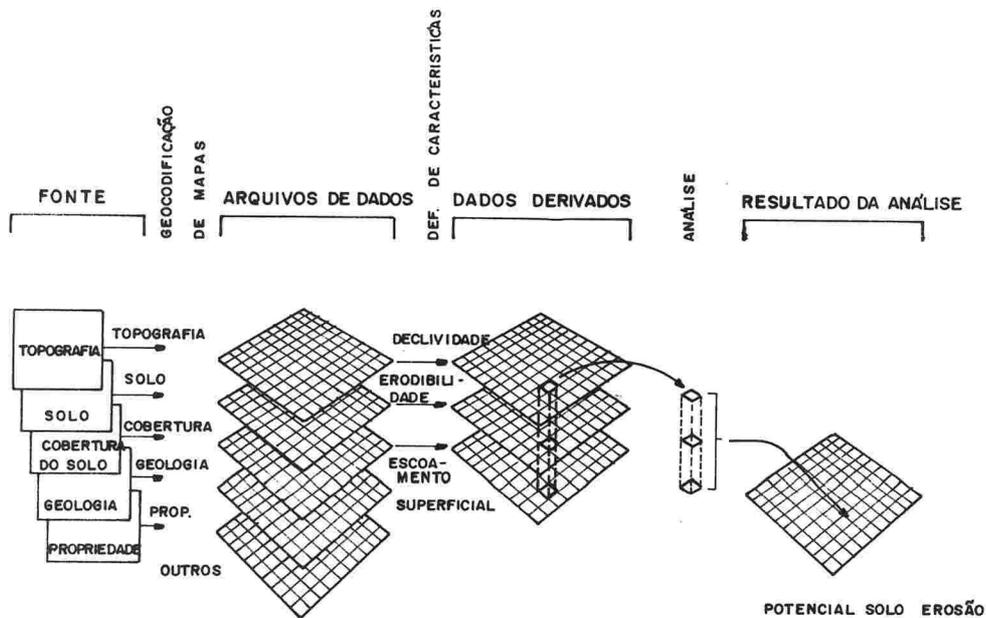


Fig. IV.1 - Procedimento de análise da MUSLE utilizando dados geo-codificados.

4.1.2. Componentes de um Sistema de Informações Geográficas

Um SIG possui dois componentes importantes : equipamento computacional e módulos de programas aplicativos. Estes dois componentes mais a capacitação técnica dos operadores e usuários devem estar em equilíbrio para que o sistema funcione satisfatoriamente.

4.1.2.1. Hardware Computacional

Os componentes básicos de "hardware" para um SIG podem ser vistos na Fig. IV.2. A unidade central de processamento (CPU) normalmente está ligada a uma unidade de disco magnético (disco rígido), a qual providencia o espaço necessário para armazenamento de dados e programas. Uma unidade de digitalização (mesa digitalizadora), é usada para converter dados de gráficos para a forma digital para posterior processamento. Um traçador gráfico (plotter), ou outro tipo de sistema de saída gráfica é necessário para a representação gráfica dos dados processados. A

comunicação entre CPUs pode ser feita através de meios magnéticos (discos e fitas), por meio de sistemas de rede de trabalho ou por linha telefônica através de unidades chamadas "modem". O operador controla o computador e os periféricos (plotter, impressoras, sistemas digitalizadores e outros aparatos ligados ao computador) através de uma unidade de visualização ou monitor, também conhecida por terminal.

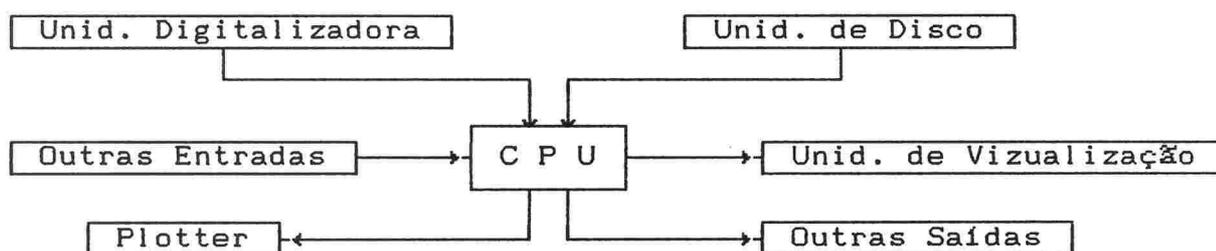


Fig. IV.2 - Componentes básicos de Hardware de um SIG.

4.1.2.2. Módulos de Software de um SIG

Um pacote de software de um SIG consiste em cinco módulos técnicos básicos, conforme a figura IV.3. Esses módulos básicos são sub-sistemas para :

- a) Entrada e verificação da consistência dos dados;
- b) Gerenciamento e armazenamento da base de dados;
- c) Saída e apresentação de dados;
- d) Transformação de dados;
- e) Interações com o usuário.

No módulo de entrada de dados está alojado todo o conjunto de programas destinados à transformação dos dados originais, sob forma gráfica e descritiva para um formato de digital compatível com o computador. Estes programas controlam a taxa de

transferência de dados entre um dispositivo e a CPU e adequam os diferentes formatos de entrada de dados aos padrões do sistema.

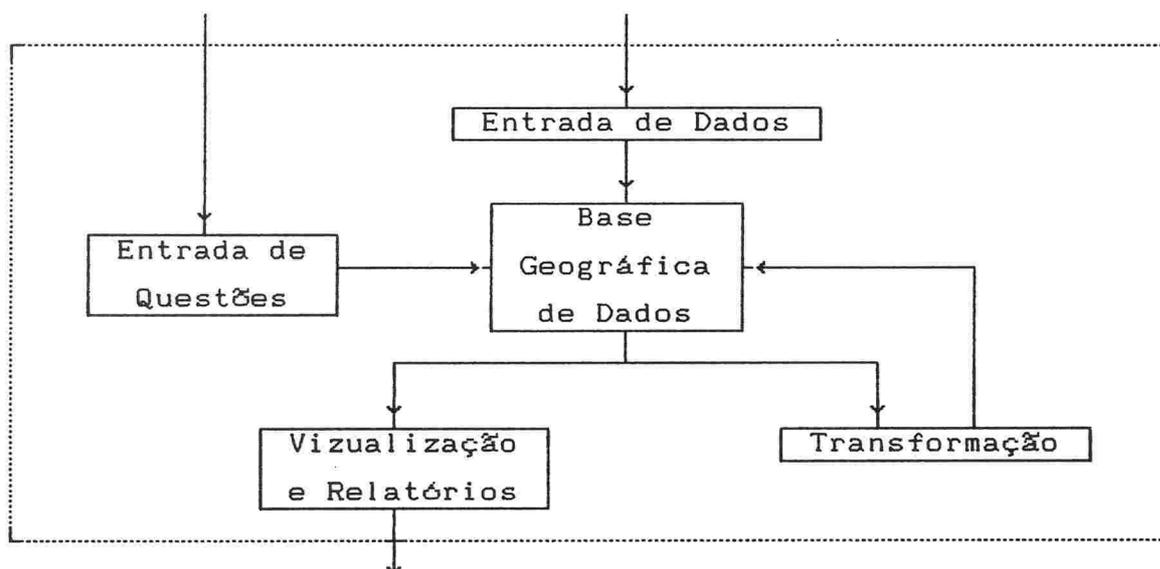


Fig. IV.3 - Principais componentes de software de um SIG.

No módulo de gerenciamento e armazenamento da base de dados é definida a forma pela qual os dados, em relação a sua posição, topologia e atributos descritivos, serão estruturados e organizados. Esta estruturação e organização é uma função da forma como esses dados serão manipulados no sistema e da maneira como serão percebidos pelo usuário.

A saída e apresentação de dados, se refere as diferentes formas através das quais os dados podem ser visualizados e os resultados das análises reportadas ao usuário. Os dados poderão ser apresentados como cartas temáticas, tabelas e figuras (gráficos e cartas) em formas variadas, como plotagens e impressões ou em uma unidade visualizadora (monitor de raios catódicos).

A transformação de dados engloba duas classes de operação:

- (a) transformações necessárias para a correção de erros, atualização dos dados ou ainda para acrescentar uma outra série de dados, e
- (b) um conjunto de métodos de análise, que podem ser aplicados aos dados, com o objetivo de encontrar respostas as questões feitas ao SIG.

Essas transformações podem ser executadas, sobre aspectos espaciais e não espaciais dos dados, separadamente ou em combinação. Algumas destas transformações estão associadas a operações de mudança de escala, ajuste dos dados a novas projeções, acesso lógico aos dados e cálculo de áreas e perímetros.

O último módulo na lista de um sistema de informações geográficas, refere-se a interação do usuário com o sistema, ou seja, a forma pela qual o usuário se comunica com o SIG, introduzindo questões referentes aos problemas a serem solucionados, bem como os parâmetros das transformações das informações. Este módulo é absolutamente essencial para a adoção e uso de um sistema de informação, visando sempre uma maior identificação de linguagem entre o sistema e o usuário.

4.1.3. Estrutura dos Dados em um SIG

Um SIG, lida tanto com dados espaciais, quanto com dados não-espaciais. Topologicamente podemos representar um dado geográfico, isto é, passível de ser representado em uma base cartográfica, por pontos, arcos e áreas (informação espacial), mais um rótulo de identificação (informação descritiva), (figura IV.4). Dessa forma, por exemplo, uma carta de altimetria

(isolinhas) será composta por um conjunto de arcos associados a rótulos para a identificação das cotas.

A localização dos dados geográficos no espaço deverá estar referenciada a um sistema de coordenadas (ex.: projeção Universal Transversal de Mercator (UTM)).

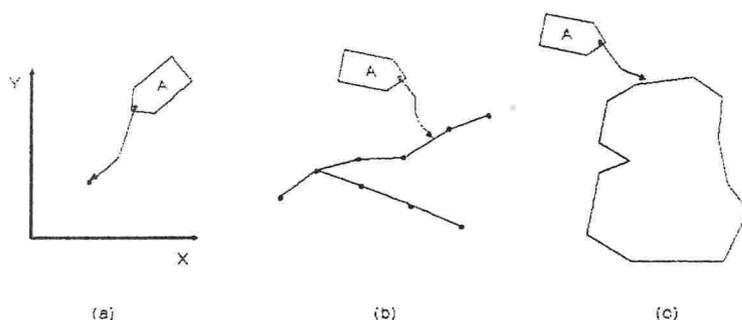


Fig. IV.4 - Um mapa é uma série de pontos (a), arcos (b) e áreas (c), definido em um contexto espacial e não-espacial (ex.: identificador )

A legenda em um mapa é a ligação entre os atributos não-espaciais e as entidades espaciais. Os atributos não-espaciais podem ser representados por cores, símbolos ou achurados, cujo significado é indicado na legenda. Em um sistema de informações geográficas os atributos não-espaciais e as entidades espaciais precisam estar codificados e organizadas de forma a permitir uma análise dos dados.

Uma base de dados é formada por diversos arquivos nos quais estão contidos os dados. Para que se possa ter com facilidade acesso a um ou mais arquivos é necessário ter algum tipo de estrutura ou organização. Os principais tipos de estruturas de base de dados são as estruturas hierárquicas, as redes de trabalho e as estruturas relacionais (Burrough, 1986).

4.1.3.1. Estrutura Hierárquica

Em um a estrutura hierárquica os dados possuem uma relação do tipo "árvore", isto é, estão dispostos em níveis de prioridade. Um exemplo clássico de estrutura hierárquica são as classificações taxonômicas usadas em botânica e zoologia. No caso da estrutura de um mapa (M) formado por dois polígonos (I) e (II), a hierarquia seria a seguinte no sentido crescente, conforme a figura IV.5:

- pontos que formam os vértices de cada polígono;
- linhas que formam os polígonos, compreendidas entre cada vértice;
- rótulo de identificação de cada polígono;
- rótulo do mapa.

O acesso a qualquer parte da estrutura é feito em um um arquivo índice onde estão registrados os níveis de prioridade, a partir de um critério discriminante. A principal desvantagem neste tipo de estrutura é a redundância de dados, criando grandes arquivos índice, com lento acesso as informações.

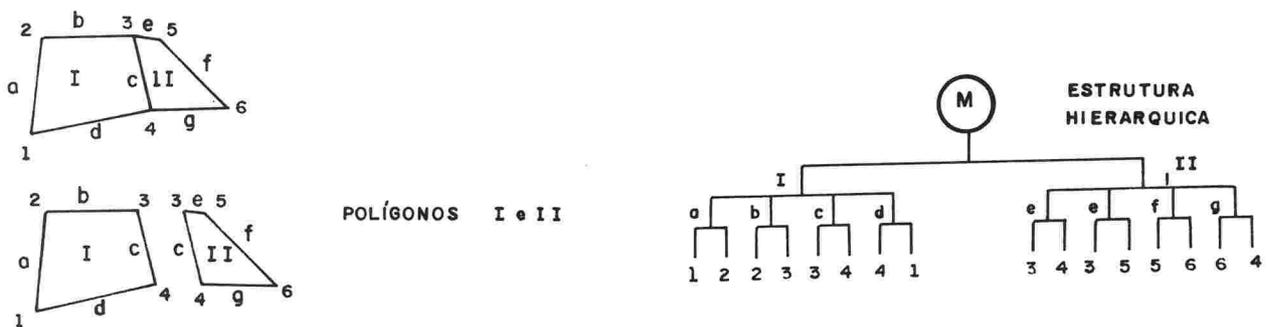


Fig. IV.5. Estrutura Hierárquica.

4.1.3.2. Redes de Trabalho

Em uma estrutura do tipo rede de trabalho, as ligações ou relações são previamente especificadas através do uso de indicadores (ponteiros). Isto evita a redundância de dados, permitindo um melhor uso do espaço de memória disponível. No exemplo do mapa (M) composto pelos polígonos (I) e (II), cada vértice está endereçado à linha a que pertence, cada linha endereçada ao seu polígono e assim por diante (figura IV.6).

A principal desvantagem deste tipo de estrutura é que em dados topologicamente complexos o espaço reservado aos ponteiros poderá ocupar boa parte da base de dados. Outro problema está associado a atualização de uma ou mais partes da estrutura. Este procedimento implica em muitos casos numa quase constante manutenção do sistema de ponteiros.

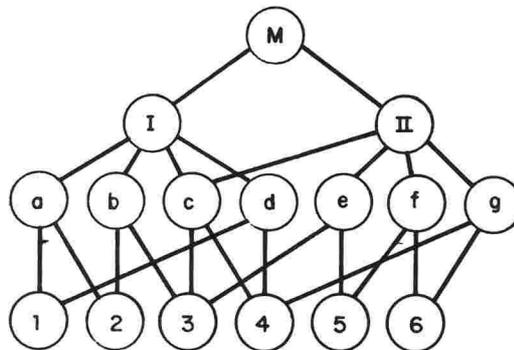


Fig. IV.6 - Redes de Trabalho.

4.1.3.3. Estrutura Relacional

Em uma estrutura relacional não se utilizam ponteiros nem arquivos índices. Em vez disso os dados são armazenados em registros simples, que contém uma série ordenada de atributos agrupados em tabelas bidimensionais conhecidas como relações. Cada tabela ou relação constitui um registro separado, formando normalmente um arquivo isolado (figura IV.7).

Mapa	<table border="1"><tr><td>M</td><td>I</td><td>II</td></tr></table>	M	I	II																													
M	I	II																															
Poligonos	<table border="1"><tr><td>I</td><td>a</td><td>b</td><td>c</td><td>d</td></tr><tr><td>II</td><td>c</td><td>e</td><td>f</td><td>g</td></tr></table>	I	a	b	c	d	II	c	e	f	g																						
I	a	b	c	d																													
II	c	e	f	g																													
Linhas	<table border="1"><tr><td>I</td><td>a</td><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>I</td><td>b</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>I</td><td>c</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>I</td><td>d</td><td>4</td><td>1</td></tr><tr><td>II</td><td>e</td><td>3</td><td>5</td></tr><tr><td>II</td><td>f</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>II</td><td>g</td><td>6</td><td>4</td></tr><tr><td>II</td><td>c</td><td>4</td><td>3</td></tr></table>	I	a	1	2	I	b	2	3	I	c	3	4	I	d	4	1	II	e	3	5	II	f	5	6	II	g	6	4	II	c	4	3
I	a	1	2																														
I	b	2	3																														
I	c	3	4																														
I	d	4	1																														
II	e	3	5																														
II	f	5	6																														
II	g	6	4																														
II	c	4	3																														

Fig.IV.7 - Estrutura relacional do mapa M.

A possibilidade de manipular os dados em tabelas, permite que o acesso à base de dados possa ser executada através de regras de lógica Booleana ou operações matemáticas. Sendo cada relação um arquivo independente, a atualização do sistema é bastante facilitada, pois não há a necessidade de alterar o resto da estrutura.

4.1.4. Formato dos Dados em um SIG

O processo geral de reconhecimento de padrões, usualmente executado com facilidade pelo ser humano, transforma-se em um problema complexo quando executado de forma automática em computadores. Existem basicamente duas formas de representar dados espaciais em um sistema computacional, as quais costuma-se definir como forma explícita e forma implícita de descrever entidades espaciais.

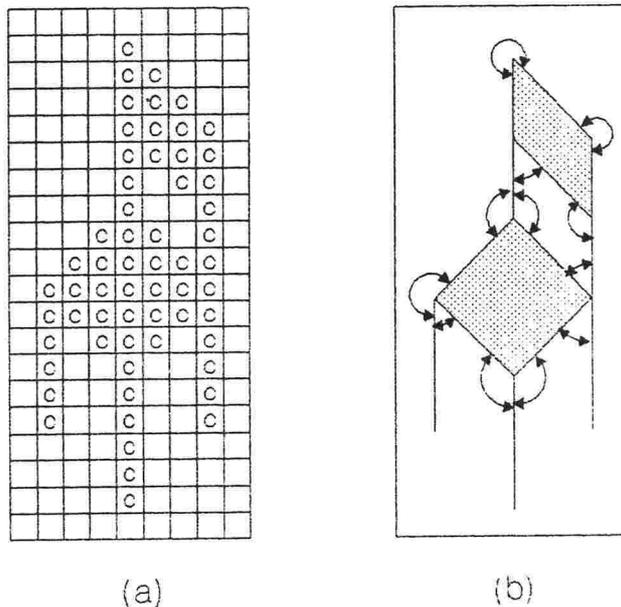


Fig. IV.8 - Cadeira em (a) formato varredura ("raster") ou grade e (b) em formato vetorial.

Na figura IV.8, *Burrough (1986)* ilustra as duas diferentes formas pelas quais uma cadeira pode ser explícita ou implicitamente representada em um computador. Na representação explícita, a forma da cadeira é construída a partir de uma série de pontos em uma grade. Para que o computador reconheça que essa série de pontos representam uma cadeira e não uma mesa, a cada célula é atribuído um valor código "c". Na prática, esse valor código poderá ser um valor numérico, uma cor ou um valor em uma escala de nível de cinza. Temos então a seguinte estrutura de dados para a cadeira :

atributo da cadeira → simbolo/cor → célula X

Para manipular informações representadas explicitamente, deve-se varrer a grade de dados que caracteriza este tipo de estrutura, por isso denomina-se este tipo de representação de "formato varredura ou raster".

Na representação implícita, faz-se o uso de uma série de arcos definidos por pontos de inicialização e finalização e alguma forma de ligação. Os pontos de inicialização e finalização dos arcos definem "vetores" que representam a forma da cadeira. Este tipo de representação denomina-se "formato vetorial". Ponteiros entre os arcos indicam ao computador como os mesmos se ligam entre si para formar a cadeira. A estrutura de dados é :

atributo da cadeira → série de vetores → ligação

A figura IV.8 também mostra várias outras diferenças entre as duas representações. Primeiro, a representação implícita requer um número menor de dados. Isto implica em um menor espaço de armazenamento na memória do computador. Para armazenar a informação referente a cadeira o formato vetorial utilizou 11 pares XY e 14 ponteiros de ligação, já o formato varredura

utilizou 60 números. Além disso, a representação vetorial é esteticamente superior à imagem em formato varredura, isto é, para que a figura IV.8 possua em formato varredura, uma resolução espacial equivalente a de uma imagem em formato vetorial, é necessário uma grade com um número muito grande de células. Finalmente, as informações referentes as ligações permitem um eficiente rearranjo espacial do objeto. Por outro lado, se a forma ou o tamanho da cadeira precisam ser modificados, isso pode ser feito de uma forma mais rápida e com maior facilidade em uma representação em formato varredura do que no formato vetorial. Na representação de varredura, a atualização dos dados, freqüentemente implica em apagar certos valores, substituindo-os por novos. Na representação vetorial, não só as coordenadas deverão ser atualizadas como também as conexões deverão ser reconstruídas.

4.2. Obtenção e Manipulação dos Parâmetros da MUSLE/USLE Utilizando Técnicas de Geoprocessamento

A abordagem da MUSLE/USLE neste trabalho, através das técnicas de geoprocessamento, foi desenvolvida segundo enfoques técnicos distintos.

O primeiro e mais abrangente enfoque é o que se refere à capacidade de transformar e combinar informações descritivas e gráficas do modelo. A caracterização da bacia piloto, assim como das bacias elementares que a constituem, é uma consequência direta da distribuição espacial dos parâmetros naturais e antrópicos da MUSLE, tanto em conjunto como independentemente. Em outras palavras, pode-se identificar zonas de comportamento hidrossedimentológico diferenciadas para cada fator do modelo ou para a resultante da combinação destes fatores no corpo do modelo. A identificação de zonas de comportamento homogêneo se faz através de operações que permitam discretizar os valores

referentes a cada um dos parâmetros do modelo ou a da resultante da combinação destes. As ponderações dos fatores quanto a sua área relativa dentro da bacia é um exemplo disso.

A análise do comportamento em conjunto dos fatores da MUSLE é precedida de uma operação que permita a combinação destes fatores de acordo com as condições de contorno impostas ao modelo. Um SIG, como suporte computacional de um banco de dados geo-relacional, possibilita a sobreposição dos fatores do modelo armazenados em diferentes planos de informação. Este tipo de sobreposição de informação assemelha-se a um "overlay", porem com a vantagem de permitir a aplicação de operadores lógicos ou matemáticos entre os diferentes planos de informação. Dessa forma para estimar as diferentes zonas de erosão superficial na bacia piloto, basta sobrepor os planos de informação referentes a morfologia do terreno (*LS*), erodibilidade do solo (*K*), erosividade da chuva (*R*) e cobertura do solo (*CP*) da USLE conforme o esquema apresentado na figura IV.9.

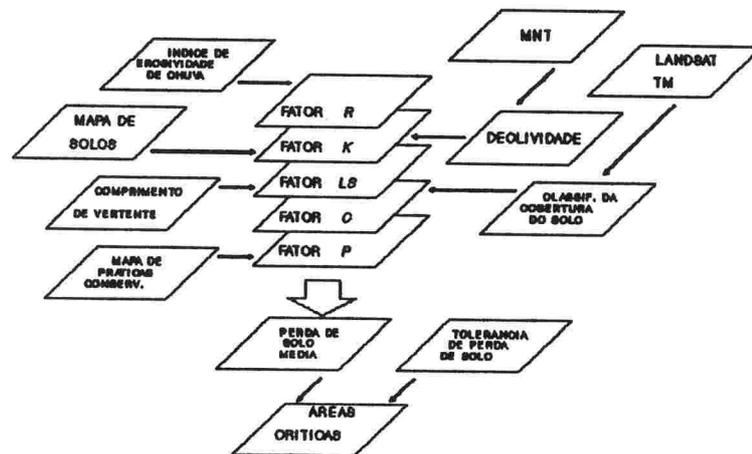


Fig. IV.9. - Estimativa da Erosão Potencial.

O segundo e terceiro enfoques, estão associados a derivação de alguns dos fatores da MUSLE/USLE, a partir de diferentes fontes.

No que se refere as informações relativas a morfologia do terreno (os fatores topográficos (LS) da MUSLE/USLE) são utilizadas as técnicas de geoprocessamento referentes a Modelagem Numérica do Terreno - MNT. Este enfoque se baseia na manipulação da matriz de altitudes, com a finalidade de obtenção de informações como: declividade, os caminhos percorridos pela água sobre o terreno e os divisores das bacias hidrográficas, bem como outros fatores hidrológicos mais complexos. Para a obtenção de uma matriz de altitude existem diferentes técnicas, como aero-restituição e interpolação numérica de ponto e isolinhas. Uma abordagem mais específica dos conceitos relativos a Modelagem Numérica do Terreno é feita no Capítulo V.

Por último enfatiza-se as técnicas de Sensoriamento Remoto, que através de interpretações tanto de imagens analógicas (visual) como de imagens digitais (via computador), permitem definir quais as classes referentes ao uso do solo dentro de região de estudo. No caso de uma interpretação digital, as informações presentes em uma imagem obtida por um sistema sensor, no caso o satélite LANDSAT TM, sofrem uma análise estatística da sua informação espectral, permitindo uma discretização de classes de acordo com os interesses de estudo. O resultado deste tipo de processamento é a geração de uma imagem temática em formato varredura, capaz de ser integrada aos demais planos de informação dentro do ambiente SIG.

Os fundamentos e aplicações de técnicas de Sensoriamento Remoto em estudos hidrossedimentológicos serão visto mais detalhadamente no Capítulo VI.

V. MODELAGEM NUMÉRICA DO TERRENO APLICADA A EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO

5.1. Modelagem Numérica do Terreno

Qualquer representação numérica do relevo de uma superfície por meio de pontos individuais, pode ser chamada de Modelo Numérico do Terreno (MNT).

Os dados de um MNT são constituídos por um conjunto de vetores $(X, Y, Z)^T$. As componentes X e Y definem uma posição sobre uma superfície enquanto Z representa o atributo associado a (X, Y) , que no caso do MNT é a altitude.

Os MNTs foram originalmente desenvolvidos para a representação de modelos de altimetria, o que não impediu que também fossem usados para a representação da variação contínua de qualquer outro atributo Z ao longo de uma superfície.

5.1.1. Métodos para a Representação de MNTs

Segundo *Burrough (1986)*, podemos descrever as informações referentes ao relevo de uma superfície através de funções matematicamente definidas ou, de uma forma discreta, por pontos e/ou linhas.

É importante salientar a diferença entre o modelo e a sua representação visual. Uma equação matemática pode descrever de forma contínua o relevo de uma superfície, porém para visualizar o modelo é necessário gerar a sua "imagem". A imagem é simplesmente a representação gráfica (visual) da discretização, por exemplo, dessa equação matemática.

Um MNT pode ser desenvolvido segundo dois modelos básicos:

a) Modelo de linhas : O modelo de linha mais comum é a representação do MNT por uma série de curvas que podem ser descritos como a intersecção da superfície com planos de cota ou de altitude constantes, isto é, planos horizontais. O modelo de isolinhas (figura. V.1) como é chamado não se adequa muito ao cálculo de declividades e da orientação azimutal de cada ponto da superfície. Por esta razão, costuma-se converter o de modelo linha, para o formato de uma matriz de altitude discretizada (modelo de ponto). *Yoeli (1984) e Felgueiras et al. (1988)* descrevem algoritmos de interpolação para gerar matrizes de altitude a partir de isolinhas. Podemos também representar o modelo numérico do terreno através de cortes verticais (figura V.2), ou seja, perfis do relevo da superfície. *Burrough, (1986)*, descreve os perfis do terreno como produtos derivados, comumente usados para a análise de declividade, elaboração de ortofotocartas ou representações tridimensionais. Nas figuras V.1, V.2, V.3 e V.4 as linhas representam feições do terreno (drenagem e curvas de altimetria). Os pontos representam as cotas altimétricas amostradas.

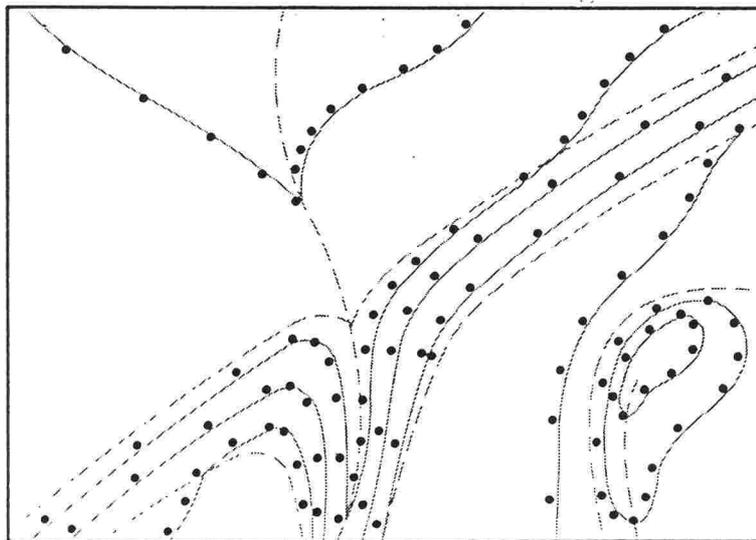


Fig. V.1 - Representação por isolinhas.

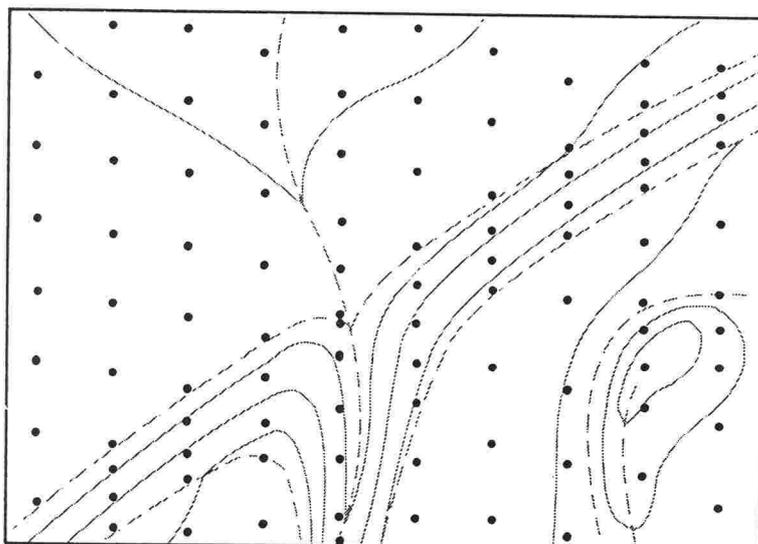


Fig. V.2 - Cortes verticais do terreno (perfis).

b) Modelos de pontos : A forma mais usual de representar um MNT, é a chamada matriz de altitude, ou grade regular retangular (figura V.3). Este produto pode ser obtido através de medições diretas sobre pares estereoscópicos de fotografias aéreas, utilizando estereo-restituidores, ou a partir da interpolação de dados pontuais espaçados regularmente ou não. Este tipo de modelo permite a geração de isolinhas, de ângulos de declividades e orientação, de sombreamento de relevo e delineamento de bacias.

As grades de altitude apresentam algumas desvantagens que devem ser citadas :

- Redundância de informação a ser armazenada em áreas de relevo uniforme;
- Incapacidade de modificar o tamanho das células da grade em áreas onde o relevo da superfície é mais acidentado, requerendo portanto uma maior densidade de pontos.

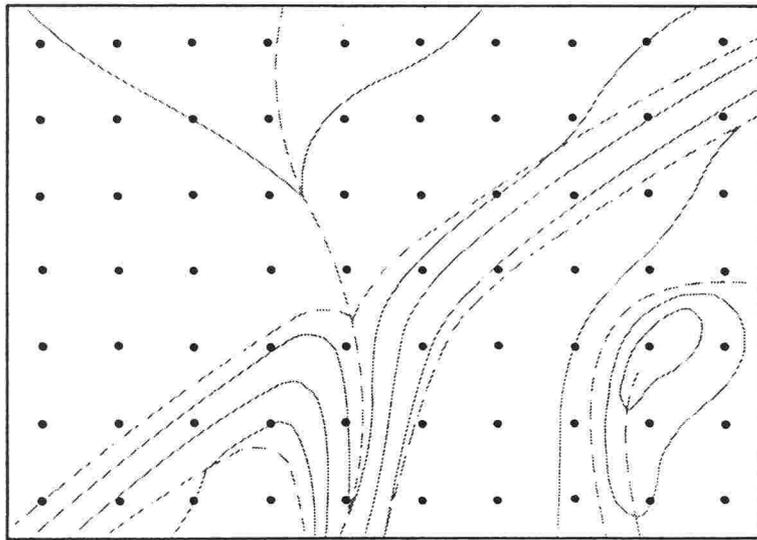


Fig. V.3 - Matriz de altitude

Outra forma de capturar dados de elevação pontuais é a chamada Rede Irregular Triangulada (TIN²). Uma TIN (figura V.4) é formada por uma série de sub-áreas triangulares, ajustados à superfície topográfica, com base no princípio de que uma superfície plana pode ajustar-se a quaisquer três pontos não colineares (Carter, 1988). Uma TIN é criada a partir de triangulos irregulares contíguos conectados por pontos críticos da superfície.

A grande vantagem deste modelo consiste na otimização das amostras armazenadas, eliminando a redundância de informação em áreas de relevo uniforme, permitindo também um melhor detalhamento em áreas menos uniformes. Por outro lado este tipo de MNT exige uma maior complexidade na análise topologica da superfície digitalmente representada, em consequência da distribuição espacial irregular dos dados de altimetria.

² TRIANGULATED IRREGULAR NETWORK

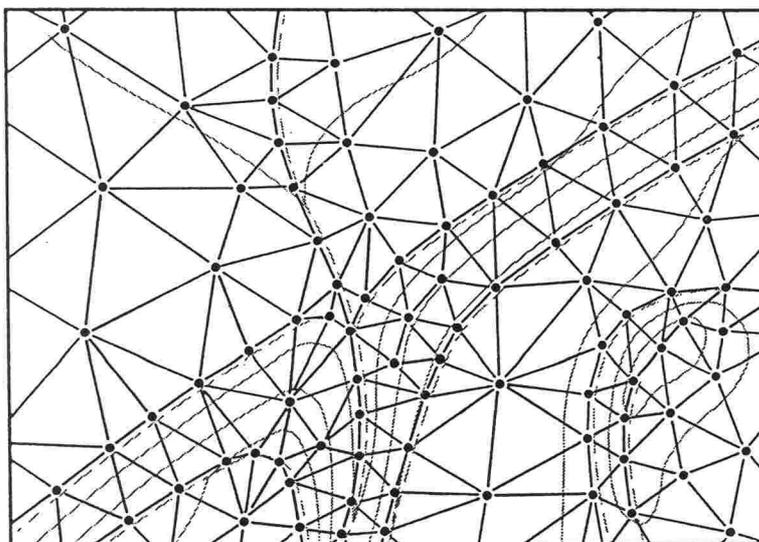


Fig. V.4 - Rede Irregular Triangulada (TIN)

5.2. Formas de Interpolação para a Geração de uma Matriz de Altitude

Em virtude das características do Sistema de Informações Geográficas disponível (SGI) utilizado na elaboração deste trabalho e devido ainda ao tipo de modelagens que foram executadas, optou-se pelo modelo matriz de altitude obtida através da interpolação de isolinhas.

O processo de estimar valores de uma variável em locais carentes de informação a partir de dados disponíveis dentro de uma determinada vizinhança é chamado de interpolação. Existem diversos métodos de interpolação, cada um mais adequado a uma determinada finalidade.

Os modelos de interpolação podem ser classificados quanto a transição espacial da variável, em modelos de transição abrupta e modelos de transição gradual.

5.2.1. Interpoladores de Transição Abrupta

Os modelos de interpolação de "transição abrupta" ou "de fronteira", utilizam técnicas que assumem que todas as variações importantes ocorrem entre regiões ou unidades. Dentro dessas unidades o atributo em estudo, tem um comportamento homogêneo e isotrópico. Um exemplo de interpolador de "fronteira" são os polígonos de Thiessen, muito utilizado em estudos de climatologia. A idéia básica consiste em assumir que dentro de um arranjo bidimensional (X, Y) de pontos amostrais, a melhor estimativa para o valor do atributo Z em um ponto desconhecido corresponde ao valor do ponto amostrado mais próximo.

Os interpoladores de fronteira, não são adequados para geração de matrizes de altitude, pois estas apresentam uma transição gradual de valores, o que não ocorre em cartas temáticas (solos, geologia, vegetação ou uso do solo), claramente de transição abrupta.

5.2.2. Interpoladores de Transição Gradual

Em contraste com as técnicas discretas (transição abrupta) acima descritas, quase todos os demais métodos de interpolação abrangem modelos de variação espacial contínua ou gradual, descritos por uma superfície contínua, matematicamente definida.

Entre as técnicas de interpolação com transição gradual, podemos citar as funções "Spline", métodos de mínimos quadrados, séries de Fourier, métodos de média móvel e métodos de otimização que utilizam a autocovariância espacial (Kriging). Estes métodos podem ser divididos em técnicas de ajuste global e técnicas de ajuste local.

Nas técnicas de ajuste global o modelo é construído utilizando-se toda a informação disponível, isto é, a totalidade da amostra. Neste tipo de interpolador ocorrem problemas de ajuste em feições de carácter localizado, sendo por isso, mais indicado para a modelagem de fenómenos com grande intervalo de variação, por exemplo, níveis piezométricos de aquíferos subterrâneos.

As técnicas de interpolação de ajuste local são mais indicadas para o estudo de fenómenos com pequeno intervalo de variação e conseqüentemente um número relativamente grande de pontos amostrais, por exemplo modelos de altimetria. Este tipo de técnica analisa a informação referente aos dados localizados na vizinhança do ponto a ser interpolado. Podemos citar dois tipos de interpoladores locais para geração de grades altimétricas:

- Métodos de média móvel e
- Métodos de otimização da autocovariância espacial.

As funções Spline, embora possam ser usadas como método interpolativo para modelagem de superfícies (Spline bicúbica), este método é mais utilizado na interpolação de linhas (sistemas bidimensionais), devido ao seu alto custo computacional.

5.2.2.1. Métodos de Média Móvel

Este método consiste em interpolar o valor da variável Z, através do cálculo da média dos valores amostrados em sua vizinhança. Se os valores amostrados estiverem distribuídos espacialmente de forma regular é possível estimar a média da altitude Z do ponto, utilizando uma região simétrica em torno do mesmo. O procedimento é feito da seguinte maneira:

$$\hat{Z}(x) = 1/n [\sum_{i=1}^n Z(x_i)] \quad (V.1)$$

sendo: $\hat{Z}(x)$ = estimativa da altitude no ponto x ;
 $Z(x_i)$ = amostra de altitude no ponto x_i e
 n = número de amostras utilizadas para estimar $\hat{Z}(x)$.

Para o caso bidimensional, a mesma fórmula poderá ser aplicada, substituindo-se o valor x_i por um vetor de coordenadas X_i .

O tamanho da janela define se a interpolação terá uma transição suave. Janelas menores enfatizam fenômenos com alta frequência de espacial e janelas maiores fenômenos com frequências espaciais baixas (Burrough, 1986).

É possível notar que o valor de Z tende a aproximar-se aos valores amostrados mais próximos. Para levar em conta essa tendência, se faz necessário ponderar a média das cotas em função da distância (d) que separa os pontos amostrados do ponto a ser interpolado. Esta variação do método denomina-se "média móvel ponderada", e pode ser assim representada :

$$\hat{Z}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (V.2)$$

para $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

onde o peso λ_i é uma função da distância $\phi(d)$ entre os valores x (\hat{Z} estimado) e x_i (Z amostrado).

Deve-se observar que na medida em que a distância entre o valor estimado e o valor amostrado cresce o peso λ deve tender

a zero. Pode-se conseguir isto através de funções do tipo recíprocas [d^{-k}] ou exponenciais negativas [$\exp^{-\alpha d}$]. A forma mais comum da função $\phi(d)$ é a chamada ponderação pelo inverso da distância ao quadrado :

$$\hat{Z}(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) d_{ij}^{-2}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-2}} \quad (V.3)$$

onde x_j são os pontos pertinentes a superfície a ser interpolada.

Além da ponderação referente a distância entre os pontos amostrados e o ponto a ser estimado, outros fatores são normalmente considerados com a finalidade principal de otimizar o tempo de computação para geração de uma matriz de altitudes.

Um destes fatores é o "método de procura", isto é, a forma e a área usadas para localizar os pontos amostrais utilizados no algoritmo de interpolação. Para cada ponto a ser estimado na interpolação, uma vizinhança (área de procura) é definida. Quanto menor o número de pontos dentro desta vizinhança, menor será o tempo de interpolação. Para cada vizinhança é determinado o tamanho do espaço amostral (raio de procura) e o número de pontos mais próximos a serem utilizados no processo de interpolação.

Quanto ao método de procura, este poderá ser "normal", por "quadrante" ou por "octante". O método normal utiliza os n vizinhos mais próximos para estimar por interpolação o valor do atributo associado a um elemento da grade. Este método deve ser aplicado em situações em que os pontos amostrais encontram-se aleatoriamente distribuídos no espaço (figura. V.5 (a)). Esse processo evita tendenciosidade no processo de interpolação (figura. V.5 (b)).



Fig. V.5 - Método de procura normal, (a) pontos aleatoriamente distribuídos, (b) tendencioso.

Em situações nas quais ocorrem agrupamentos de pontos de mesma altitude, é aconselhável utilizar o método de procura por quadrante ou por octante, nessas situações são definidas sub-regiões de vizinhança, dividindo-se a área de procura em quatro ou oito setores conforme a figura V.6, atribuindo a cada setor um número máximo de pontos a serem utilizados no processo de interpolação para o ponto central.

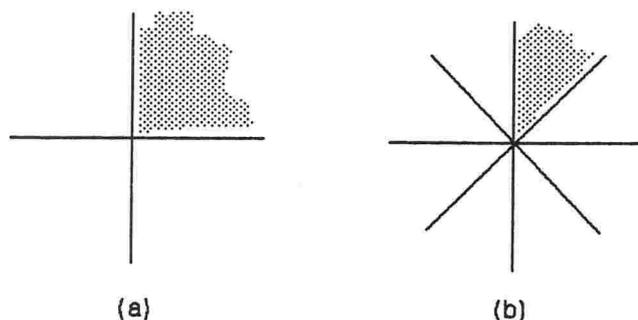


Fig V.6 - (a) Procura por quadrante, (b) procura por octante.

Yoeli (1984), apresenta uma variante no método de procura. Em lugar de coletar amostras por setores de um plano (quadrantes e octantes), o processo proposto se restringe a análise dos pontos que se encontram sobre o percurso de quatro linhas retas separadas entre si por ângulos de 45° e que se cruzam sobre o ponto a ser interpolado. Desta forma o número de pontos a serem usados na interpolação de um ponto sobre o MNT, é de no máximo oito (figura. V.7), os quais serão ponderados pelo inverso da distância com o ponto estimado, elevado a um expoente igual ou maior do que um.

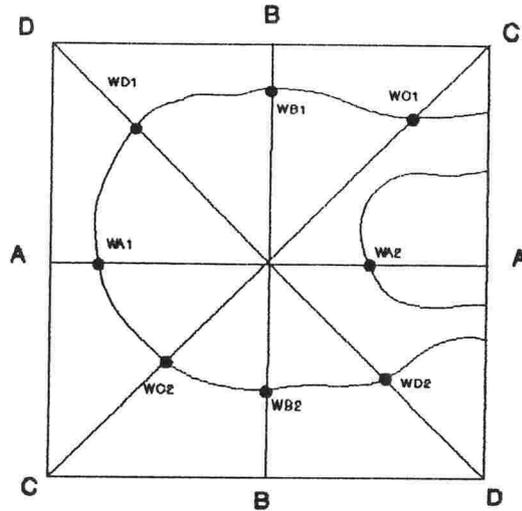


Fig. V.7 - Método de Yoeli.

Um caso especial de agrupamento de pontos amostrais são as curvas de nível digitalizadas, visto que nada mais são do que uma linha formada por pontos de mesma altitude muito próximas entre si. Este conjunto de pontos pode apresentar situações singulares, como o caso da figura V.8, nas quais nenhum dos métodos de procura apresentados anteriormente geram uma interpolação não tendenciosa, pois todos os pontos mais próximos dentro da vizinhança tem a mesma altitude.

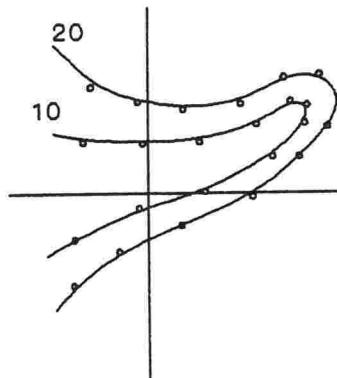


Fig. V.8 - Procura n vizinhos mais próximos por quadrante por cota.

Felgueiras et al. (1988), trata situações deste tipo através do método de procura dos "n pontos mais próximos por cota e por quadrante", isto quer dizer que de cada isolinha digitalizada dentro de cada quadrante da vizinhança, somente um ponto é considerado o mais próximo de todos e será usado no processo de estimativa dos pontos da superfície a ser interpolada.

Outro fator importante na otimização do custo computacional na interpolação dos pontos de uma grade regular é a definição do "raio de busca". Este valor determina a distância máxima que um ponto amostrado deverá estar de um ponto a ser estimado para participar no processo de interpolação.

Em situações onde o número de amostras é muito grande, a definição de sub-espacos, amostrais definidos pelo "raio de busca", permite que se alcance um grande ganho no tempo de computação com pouca ou nenhuma perda na precisão dos resultados do processo de interpolação.

Outra forma de otimizar o processo de procura e interpolação é o que se denomina organização de pontos amostrais. Neste procedimento efetua-se uma divisão do conjunto de pontos amostrados em grupos homogeneamente distribuídos no espaço e com aproximadamente o mesmo número de pontos por partição. Desta forma a procura se faz dentro de cada partição. No caso de um ponto encontrar-se muito próximo de uma partição vizinha, este ponto em particular fará parte de mais de uma partição.

5.2.2.2. Métodos de Interpolação Utilizando a Autocovariância Espacial (Kriging)

Os métodos de interpolação que utilizam a autocovariância espacial preenchem algumas lacunas deixadas pelo método da média móvel, como por exemplo :

- qual deve ser o tamanho da janela?
- qual a forma e orientação que deverá ter esta janela para otimizar a interpolação?
- qual a melhor função ponderadora λ_i no processo de interpolação?
- quais os erros associados a interpolação?

Estas questões fizeram com que o geomatemático francês Georges Matheron e o engenheiro sul africano D. G. Krige desenvolvessem um método de interpolação, dirigido a aplicações na área de mineração (*Burrough, 1984*).

Basicamente este tipo de método de interpolação segue a linha de programação dinâmica, fazendo com que o coeficiente de ponderação λ_i da interpolação se ajuste de acordo a variação de uma determinada vizinhança.

Embora de maior eficiência, este método é desaconselhado para a geração de um MNT, pois o seu custo computacional é bastante elevado devido ao grande número de amostras normalmente envolvido neste tipo de estudo.

Além da área de mineração, este tipo de interpolador é bastante usado no mapeamento de águas subterrâneas e levantamentos pedológicos.

5.3. Métodos para Definição de Estruturas de Drenagem

O uso de matrizes de altimetria, em modelos hidrológicos, cria uma excelente base de dados para obtenção de informações relativas a morfologia da superfície do terreno, entre elas a declividade e a orientação azimutal de cada célula do MNT, a declividade média de uma bacia, a rede de drenagem, os divisores de água de uma bacia ou de um conjunto de subacias, comprimento e grau de concavidade ou convexidade de uma vertente, tempo de concentração e parâmetros de forma utilizados em hidrologia.

As técnicas computacionais envolvidas na estimativa das informações acima citadas, normalmente incluem o processamento matricial, utilizando o método do "vizinho mais próximo". No entanto, algumas destas estruturas, que requerem uma visão mais abrangente ou regional, como os aspectos vinculados às condições de drenagem superficial, exigem a utilização de técnicas espaciais iterativas (Gondim, 1991).

Estas técnicas são relativamente exigentes, em termos de uso intensivo de CPU; porém exigem pouca atenção do Analista de Sistemas, minimizando portanto custos em pessoal.

5.3.1. Problemas de Pré-Processamento

Um dos principais problemas enfrentados no processo de estimar estruturas de drenagem são as depressões do terreno. Estas depressões são na maioria das vezes decorrentes de "ruídos" originados no processo de digitalização ou interpolação e devem ser preenchidas, antes que seja estabelecido o fluxo da drenagem. Este tipo de ruído estará sempre presente em qualquer MNT em estado bruto já que este não passa de uma representação discreta do terreno. Um exemplo de fonte de ruído em um MNT, são os "talwegs", dos cursos d'água, que não coincidem com a posição dos pontos na matriz do MNT em função da sua discretização. Somente

este fato é o bastante para que as cotas ao longo da rede de drenagem, no sentido de jusante, nem sempre sejam decrescentes, gerando assim falsas depressões.

Os processos para depurar o MNT deste tipo de ruído, são vários, mas basicamente consistem em atribuir idêntico valor à cota da célula referente a depressão e as cotas de algumas células específicas da sua vizinhança.

Mark et al. (1984) e *Jenson et al. (1988)*, com algumas variações, descrevem um método para solucionar o problema das depressões que consiste em :

- a) Suavizar o Modelo Numérico do Terreno, através do método do "vizinho mais próximo" dentro de uma janela de 3 x 3 células. Se a cota da célula central desta janela for menor do que a cota das oito células da sua vizinhança, esta será considerada uma depressão. Para suavizar este ruído lhe será atribuído, a menor cota entre as oito células vizinhas. Esta primeira parte tem por finalidade eliminar somente as depressões "singulares", isto é, quando só há uma célula ruído dentro da vizinhança. É de certa forma equivalente a um filtro "passa baixas", utilizado em processamento de imagens digitais.
- b) Preencher as depressões formadas por mais de uma célula aumentando o valor destas, até que sejam de igual valor ao da célula periférica de menor valor. Esta parte do processo consiste em definir o caminho de menor gradiente que a água deverá percorrer para alcançar o centro da depressão, os extremos deste caminho são a célula de menor cota da depressão e a célula periférica da depressão de menor cota. Deve-se observar que este método tem o inconveniente de criar áreas planas "lagos" que devem ser posteriormente tratadas iterativamente para poder definir claramente a rede de drenagem.

Um novo método apresentado por *Gondim (1991)* consiste em rebaixar os valores das células que obstruem o fluxo natural das águas, isto é, as cota que não coincidem com as linhas dos "talwegs", são tomadas sempre acima destes.

Independente de qual dos métodos seja escolhido para a implementação de um algoritmo de supressão de ruídos, *Hutchinson (1988)* indica uma forma de minimizar o número e o tamanho das depressões na superfície do MNT. Esta minimização consiste em forçar a tendência dos caminhos d'água na rede de drenagem principal, aumentando o número de pontos amostrados nesta região quando possível, visto que, como já foi dito é nos "talwegs" que a presença de ruídos se faz mais constante.

5.3.2. Identificação de Estruturas de Drenagem

Considerando que este estudo visa criar uma base de dados para um modelo "cacho de uva", uma das informações básicas necessárias para a sua formação é a definição dos seus módulos, no caso, as bacias hidrográficas elementares e do sistema de interligação entre estes módulos, isto é, a rede de drenagem.

Uma vez construído o MNT e considerando que este se encontra com os ruídos de processamento (depressões) devidamente filtrados é possível determinar automaticamente a rede de drenagem e o conjunto de subáreas de uma determinada região.

Até recentemente, a análise quantitativa de uma bacia ou de uma rede de drenagem, exigia um laborioso serviço de compilação em cima de fotografias aéreas ou cartas topográficas. Além de ser tedioso, esse tipo de trabalho acrescenta erro aos dados. Em áreas de relevo suave, em particular, não é sempre fácil representar os limites de uma bacia. Da mesma forma, em cartas topográficas bem detalhadas, a rede de drenagem é representada

por desenhos de linhas azuis que podem estar subestimando seriamente o padrão atual de todos os cursos d'água em potencial.

Para a detectar os cumes de um MNT é necessário localizar todos os lugares máximos convexos (\cap) e para os vales os locais mínimos concavos (\cup). *Peucker et al. (1975)* elaboraram um algoritmo local simples, que trabalha utilizando uma janela de quatro células. Esta janela se desloca sobre a matriz de altitude, analisando um conjunto de 2×2 células de cada vez. Para estimar a rede de drenagem, a célula de menor elevação é marcada. Para estimar os cumes, a célula de maior elevação é marcada. Ao final do processo de marcação, as células que permaneceram sem marca, representam a rede de drenagem ou as linhas de cume, respectivamente. O passo seguinte do processo, é juntar os pontos não marcados, de forma a construir uma linha padrão. É importante salientar que este processo somente identifica os padrões lineares da rede de drenagem ou dos cumes, porém, não individualiza uma bacia ou define o sentido em que a água flui.

Fundamentando-se em processos fluviais, *Mark (1984)*, decidiu investigar se por estudos geomorfológicos, não seria possível obter um melhor algoritmo, com base em um MNT, para simular o escoamento das águas. Tal algoritmo assemelha-se com a definição do Teorema de Cauchy que estabelece que a menor distância entre dois pontos situados sobre uma superfície curva, é a linha de maior declividade.

O algoritmo proposto por *Mark (1984)* faz a varredura do MNT através de uma janela de 3×3 células. Para cada célula, a cota é comparada com a das suas oito vizinhas mais próximas dentro da janela. O vizinho com o menor valor para a cota é marcado e o valor do acúmulo de água (expresso como uma função do número de células percorridas e a área de cada célula) é atribuído à célula

em questão. A janela, então é movida para o vizinho de menor cota e o processo é repetido. As linhas de drenagem podem ser codificadas numa escala de níveis cinza por exemplo, de acordo com o volume de água que passe sobre elas.

Visando mapear automaticamente uma bacia ou um conjunto de bacias hidrográficas, *Mark et al. (1984)* criaram um algoritmo que estima os divisores de água a partir do cálculo do gradiente local e da orientação azimutal de cada célula no MNT. A célula correspondente à saída de cada bacia pode ser determinada manualmente ou calculada iterativamente por critérios da ordem da rede de drenagem (*Band, 1986*), ou por imposição de limites da área de contribuição na saída da bacia. O algoritmo procura por todas as células que estejam a montante da saída da bacia e dentro da mesma, usando uma janela de 3 x 3 células. Partindo da saída da bacia, uma célula é definida como estando localizada a montante da célula central da janela (figura V.9), se a sua orientação for dirigida no sentido do centro da janela. Normalmente a orientação é quantificada em oito níveis.

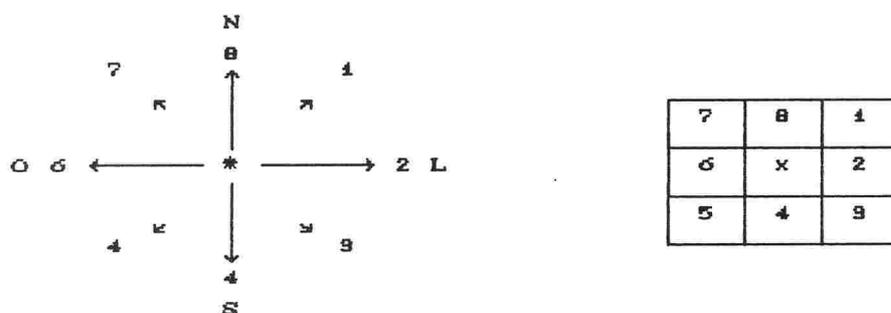


Fig. V.9 - Classes de orientação para cada célula do MNT.

Outros processos para delimitação de bacias são propostos (*Collins, 1975*) porém todos apresentam um tempo de computação maior do que o algoritmo de *Mark et al (1984)*, sem demonstrar uma maior eficiência.

5.4. Utilização de MNT para Obtenção do Fator LS da MUSLE

Uma vez definidos os módulos do modelo "cacho de uva", ou seja, as bacias elementares, o fator topográfico LS (MUSLE) médio de cada bacia deverá ser estimado.

A estimativa do gradiente de declividade média (s) (equação III.7) e do comprimento da vertente (x) médio (equação III.6) de uma bacia hidrográfica pode ser obtida a partir da matriz de orientações azimutais e de acúmulo de água previamente calculadas (Jenson *et al.*, 1988).

São consideradas como início de vertente todas as células que possuam acúmulo de água igual a zero e são consideradas redes de drenagem as células que recebam uma contribuição igual ou maior do que um patamar definido em função da resolução do MNT e das observações feitas pelo próprio analista, por exemplo ao comparar os resultados, com uma imagem de satélite ou carta temática que realce a rede hidrográfica.

Pela inversão do algoritmo de Mark *et al.* (1984), determina-se a declividade e o comprimento da vertente seguindo o caminho dado pela orientação de cada célula. Ao chegar a rede de drenagem calcula-se a declividade média da vertente. Feito isso para todas as vertentes da bacia, então calcula-se as médias das declividades e dos comprimentos de vertente da bacia (figura. V.10).

Considerando-se que uma bacia (B) possua m células que definem os divisores de águas, podemos expressar x e s matematicamente da seguinte maneira :

$$x_j = \sum_{k=1}^n D_k \quad (V.4)$$

onde x_j é o comprimento da vertente j , D_k a distância entre as células de maior gradiente de declividade dentro da janela 3x3 na célula k e n é o número de células da vertente j . Logo :

$$x_B = \sum_{j=1}^m x_j / m \quad (V.5)$$

onde x_B é o comprimento de vertente médio da bacia B , x_j o comprimento da vertente j e m o número de vertentes da bacia. E :

$$s_k = (H_k - H_k^*) / D_k \quad (V.6)$$

onde s_k é a declividade na célula, $(H_k - H_k^*)$ é a diferença de altitude entre as células de maior gradiente de declividade dentro da janela 3 x 3 na célula k . Então :

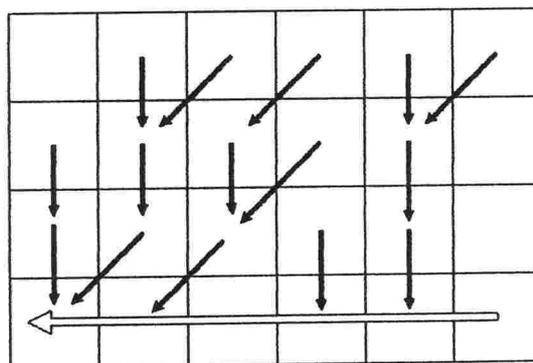
$$s_j = \sum_{k=1}^n s_k / n \quad (V.7)$$

onde s_j é a declividade média da vertente j e n o número de células desta vertente. Logo :

$$s_B = \sum_{j=1}^m s_j / m \quad (V.8)$$

onde s_B é a declividade média da bacia, s_j declividade média da vertente j e m o número de vertentes da bacia B .

As células superiores correspondem a um divisor de água



As células inferiores correspondem a um eixo de drenagem

Fig. V.10. Percurso da água sobre um MNT.

VI. UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO

6.1. Sensoriamento Remoto

6.1.1. Generalidades

Dentro de uma definição ampla pode-se dizer que Sensoriamento Remoto é a ciência e a técnica que tem como objetivo a aquisição de informações referentes a objetos, sem entrar em contato físico com eles. De uma forma mais específica se diz que um sistema sensor é aquele que é capaz de registrar a energia refletida e/ou emitida por um objeto e convertê-la em um sinal passível de ser analisado de forma adequada à extração de informações.

O termo Sensoriamento Remoto engloba diversas áreas técnicas, visto que é uma tecnologia que envolve a utilização de sistemas sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves e espaçonaves.

Os métodos mais freqüentemente utilizados hoje, baseiam-se na análise da energia eletromagnética refletida e/ou emitida pelo alvo de interesse. Outros meios de medição podem ser no entanto citados, por exemplo: ondas sísmicas, ondas sônicas e a força da gravidade (*Landgrebe, 1978*).

Os sistemas sensores eletromagnéticos podem ser "ativos" ou "passivos" em função da fonte de energia utilizada no processo. Os sistemas do primeiro grupo caracterizam-se por conterem uma fonte própria de radiação, isto é, geram a energia radiante que irá interagir com os alvos de interesse. Como exemplo pode-se citar os sistemas de radar ou microondas.

Os sistemas passivos são aqueles que utilizam fontes naturais de radiação eletromagnética. O Sol é a fonte mais comumente utilizada. Dependem portanto de uma fonte externa para que possam operar. Os sistemas fotográficos se constituem em um exemplo simples de sistema sensor passivo (De Moraes, 1989).

Este trabalho limitou-se ao uso de sistemas sensores passivos operantes na chamada região ótica do espectro eletromagnético. Estes sistemas caracterizam-se por utilizarem componentes óticos na sua construção e estão aptos para captar a energia emitida e/ou refletida por um objeto nas regiões do visível e do infravermelho do espectro, em uma faixa de comprimento de onda compreendida entre, $0,38 \mu\text{m}$ e $15,0 \mu\text{m}$ (figura VI.1). Este tipo de sistema sensor tem a vantagem de permitir a obtenção da imagem da superfície observada, e fornece informações sobre a variação espacial da sua resposta espectral.

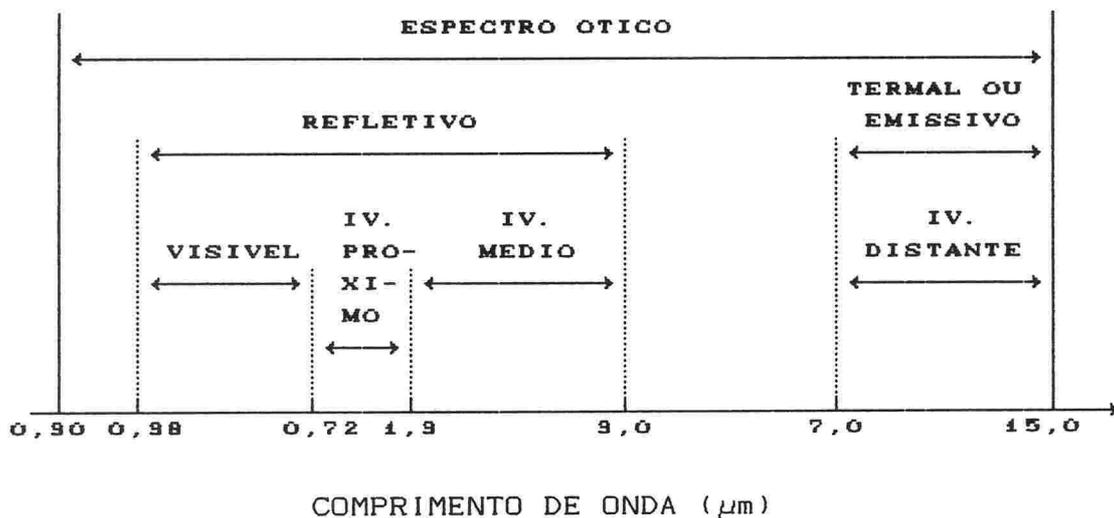


Fig. VI.1 - Regiões do espectro ótico.

6.1.2. Níveis de Aquisição de Dados

O nível de aquisição de dados é definido como sendo a distância do sistema sensor em relação ao alvo. Desta forma convencionou-se três níveis básicos de coleta de dados por Sensoriamento Remoto, em ordem crescente dessa distância (figura VI.2):

- nível de laboratório ou de campo;
- nível sub-orbital;
- nível orbital.

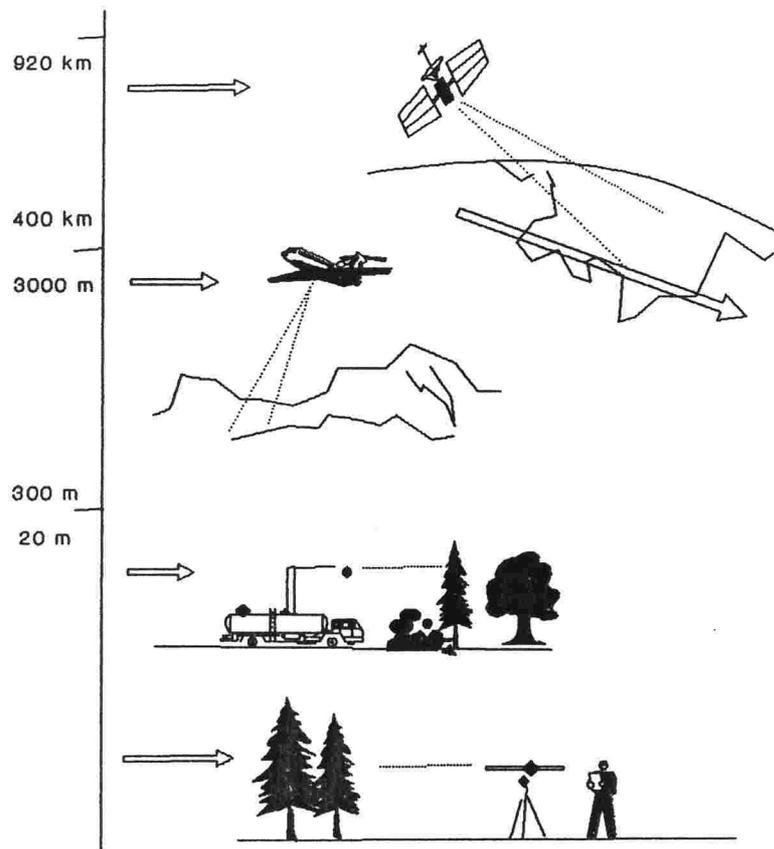


Fig. VI.2 - Níveis de aquisição de dados por Sensoriamento Remoto.

Ao passarmos de um nível para outro, modificam-se as dimensões da área observada, o que influi na resolução espacial dos dados obtidos. A nível de laboratório trabalhamos com porções reduzidas da matéria e estudamos seu comportamento espectral em um ambiente controlado, isto é, quase sem interferência dos fatores ambientais. Medidas efetuadas nesse ambiente controlado, permitem um estudo detalhado das características espectrais de objetos diversos bem como da ação dos diferentes parâmetros que influenciam o comportamento espectral do alvo. Esses dados de laboratório permitem um melhor entendimento dos dados obtidas a nível sub-orbital e orbital.

Quando trabalhamos com dados a nível de sub-orbital e orbital, a energia registrada pelo sensor não se refere a um determinado objeto, mas a um conjunto de objetos da cena. Em outras palavras a energia registrada em cada elemento de resolução no terreno é a integração da resposta dos diferentes objetos ali contidos.

O uso de aeronaves (nível sub-orbital) e espaçonaves satélites artificiais (nível orbital) como plataformas para sistemas sensores passivos óticos é o mais adequado para o estudos que envolvem o mapeamento de recursos naturais, visto que estes tem condições de captarem informação relativas a grandes extensões do terreno.

Outro fator importante na escolha de um sistema sensor é a sua resolução espectral, isto é, o número de intervalos ou bandas no espectro que o sistema sensor pode discretizar, bem como a largura de cada intervalo. Quanto maior o número de bandas espectrais do sensor e menor a sua largura, maior será a sua capacidade de identificar a natureza e condições de diferentes objetos a partir da correspondente curva de resposta espectral, isto é, maior será sua resolução espectral (figura VI.3).

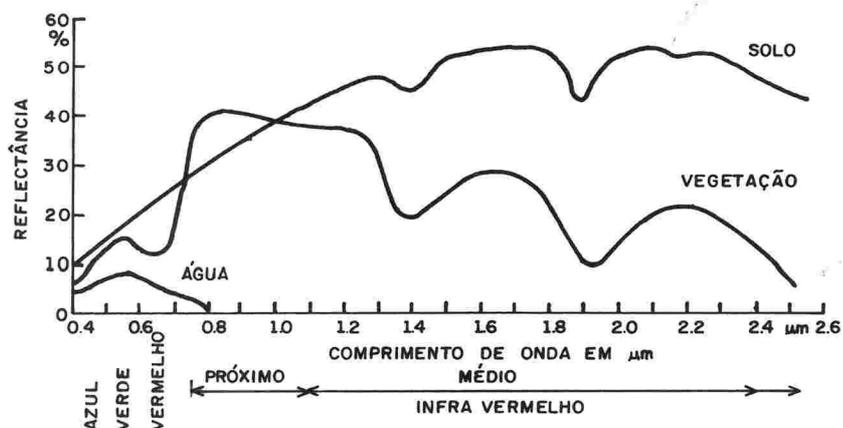


Fig. VI.3 - Curva de resposta espectral de diferentes objetos.

Os dados assim obtidos, são sempre volumosos e de difícil manipulação, com vista à extração de informações úteis. Por essa razão os dados fornecidos pelo sistema sensor devem ser colocados em forma digital, adequada à análise por computador. A forma normalmente utilizada é a de uma imagem digital, a qual consiste em um arranjo retangular de células, também retangulares, denominadas pixels. A cada pixel está associado um vetor de atributos, representando a resposta de cada uma das bandas espectrais disponíveis.

Como em toda informação sob formato digital, um número de "bits" é necessário para representar a radiância (brilho) de cada pixel. A radiância em cada pixel é quantificada através de valores numéricos discretos denominados de número ou contador digital e que podem ser visualizados como níveis de cinza. Em torno de 5 ou 6 bits (32 ou 64 níveis do contador digital) é o suficiente para visualização de uma imagem digital. Para uma análise numérica dos dados em um computador, é desejável um contador digital com maior número de níveis. O número de intervalos do contador digital denomina-se resolução

radiométrica. O sistema LANDSAT MSS possui uma resolução radiométrica de 6 bits, isto é, um contador digital com 64 níveis, já os sistemas SPOT e LANDSAT TM, mais recentes, trabalham com pixels representados por 8 bits, ou seja, 256 níveis digitais.

Neste estudo optou-se pelo uso de um sistema sensor orbital bastante adequado aos seus propósitos, o sistema LANDSAT TM, o qual apresenta adequadas resoluções radiométrica, espacial e espectral para a caracterização de feições relativas ao uso e manejo do solo em bacias hidrográficas agrícolas.

6.2. Sistema LANDSAT TM

6.2.1. Características do Sensor TM (Thematic Mapper)

O sistema LANDSAT (tabela VI.1) foi o primeiro a dar uma cobertura global da superfície da Terra (com exceção das regiões polares) de uma forma periódica.

Da mesma forma que o sensor varredor multiespectral (Multispectral Scanner - MSS), também presente nos satélites da série LANDSAT, o sensor TM é um dispositivo mecânico de varredura, porém com melhores características espectrais, espaciais e radiométricas. Sete bandas espectrais são disponíveis, contra quatro do sistema MSS, com uma resolução espacial apresentada na tabela VI.2. Pode-se notar que a banda 7 encontra-se fora do lugar na progressão dos comprimentos de onda, isso se deve ao fato de esta banda ter sido adicionada, após a fase inicial de planejamento por requisição da comunidade de geologia (Richards, 1986).

Tabela VI.1 - Características dos satélites da série LANDSAT

PARAMETROS ORBITAIS	LANDSAT 1, 2, 3	LANDSAT 4, 5
Altitude (km)	920	705
Inclinação (°)	99,4	98,20
Período (min)	103	98,20
Horário de passagem pelo equador	9h 15min	9h 45min
Repetição de ciclo (dias)	18	16

Os satélites LANDSAT 4 e 5 se caracterizam por servirem de plataforma para o sistema sensor TM.

Tabela VI.2 - Características dos Sensores dos Satélites LANDSAT

Sensor	Banda espectral (μm)	IFOV ^a (m)	número de bits por pixel
MSS	4 0,5 - 0,6	79 x 56	7
	5 0,6 - 0,7	79 x 56	7
	6 0,7 - 0,8	79 x 56	7
	7 ^b 0,8 - 1,1	79 x 56	6
	8 ^b 10,4 - 12,6	237 x 237	
TM	1 0,45 - 0,52	30 x 30	8
	2 0,52 - 0,60	30 x 30	8
	3 0,63 - 0,69	30 x 30	8
	4 0,76 - 0,90	30 x 30	8
	5 1,55 - 1,75	30 x 30	8
	7 2,08 - 2,35	30 x 30	8
6 10,4 - 12,5	120 x 120	8	

^a Campo de visada instantâneo (IFOV).

^b A banda 8 do MSS só foi utilizada no LANDSAT 3 e teve curta duração.

As características de coleta de dados do sensor TM são apresentadas na tabela VI.3.

Tabela VI.3 - Esquema de varredura do sensor TM

Largura da faixa imageada	185 km
Período de varredura	142,9 μ seg
Frequência de varredura	6,9 Hz
Tempo de varredura ativa	60,7 μ seg
Tempo de retorno do espelho	10,7 μ seg
Tempo de permanência do IFOV	9,6 μ seg
Extensão da linha de varredura	6320 IFOV

6.3. Comportamento Espectral de Alvos

Um fator fundamental para a definição de técnicas de Sensoriamento Remoto mais eficientes, é o conhecimento prévio do comportamento físico e biológico das feições a serem estudadas.

No caso de estudos referentes ao escoamento superficial e da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica as características espectrais da vegetação e do solo, são as mais importantes. O comportamento espectral da água, dentro deste enfoque, intervem indiretamente em combinação com o da vegetação e o do solo.

Tanto as características da cobertura vegetal como o tipo de solo, influenciam as principais componentes do ciclo hidrológico, como a infiltração da água no solo, a interceptação da água pelas camadas de folhas das plantas e por consequência o próprio escoamento superficial.

6.3.1. Características Espectrais da Vegetação

A resposta espectral (reflectância) da vegetação verde é bem característica, apresentando uma forte dependência do comprimento de onda (Hoffer, 1978). A figura VI.4 representa uma curva de reflectância típica da vegetação verde e identifica as regiões onde a resposta espectral possui uma maior significância.

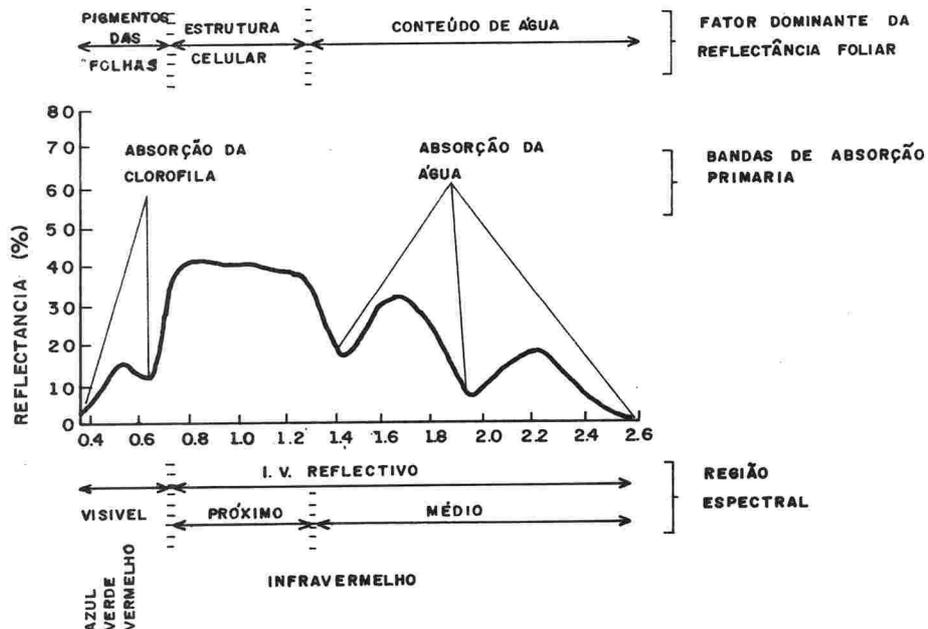


Fig. VI.4 - Resposta espectral da vegetação verde.

Nessas regiões a reflectância da vegetação tem a sua assinatura espectral determinada por distintos agentes físicos e biológicos. Na região visível do espectro eletromagnético, o agente mais importante é a pigmentação, em especial a clorofila.

Na região do infravermelho próximo a assinatura espectral da vegetação tem como elemento condicionante a estrutura celular das folhas. Nesta faixa do espectro os valores da reflectância são altas, pois as folhas verdes absorvem muito pouca energia. A forte absorção da água, em determinadas faixas da região do infravermelho médio é o principal fator que comanda a forma da curva de resposta espectral da vegetação.

Segundo *Hoffer (1978)*, o mecanismo físico e biológico que influencia a resposta espectral da vegetação, pode ser representado como uma função do comprimento de onda λ , através da equação do balanço de energia:

$$I_{\lambda} = R_{\lambda} + A_{\lambda} + T_{\lambda} \quad (\text{VI.1})$$

onde I representa a energia incidente, R a energia refletida, A a energia absorvida, e T a energia transmitida. Considerando que a maioria dos sensores multiespectrais operam eficientemente em uma faixa compreendida entre 0,3 e 3,0 μm do espectro, estes só medem energia refletida. Desta forma podemos representar a interação entre matéria e energia da seguinte forma:

$$R_{\lambda} = I_{\lambda} - (A_{\lambda} + T_{\lambda}) \quad (\text{VI.2})$$

ou seja, a energia refletida é igual a energia incidente menos a soma das energias absorvida e transmitida no comprimento de onda λ .

De posse da informação acima, fica fácil interpretar a figura VI.4. Pode-se notar, em primeiro lugar reflectâncias muito baixas nas regiões do azul e do vermelho no espectro visível. Como já foi visto, esse comportamento se deve a presença de clorofila nas folhas que absorve a maior parte da energia incidente, com uma baixa taxa de transmissão. Isso ocorre principalmente em duas bandas denominadas bandas de absorção da clorofila centradas aproximadamente em 0,45 μm e 0,65 μm . Aproximadamente no comprimento de onda 0,54 μm (cor verde) ocorre um pico de reflectância. Quando uma planta entra em estado de perda de vigor, a produção de clorofila decai. A queda dos teores da pigmentação da clorofila, causam um decréscimo nas taxas de absorção nas bandas correspondentes (0,45 μm e 0,65 μm). Daí a coloração amarelo-avermelhada da vegetação seca.

Na região do infravermelho próximo (0,7 μm a 1,3 μm) o fator que comanda a forma da curva de resposta espectral é a estrutura celular das folhas.

Nessa região, a vegetação saudável caracteriza-se por possuir valores altos para reflectância e transmitância e conseqüentemente muito baixa absorvância quando comparadas com os comprimentos de onda visíveis. Tipicamente, transmitância e reflectância apresentam nessas regiões valores entre 0,45 e 0,50 μm , restando valores muito baixos para absorvância.

É muito importante resaltar que a taxa reflectância de níveis múltiplos de folhas, no infravermelho próximo, pode sofrer um acréscimo de mais de 85 por cento, se comparado a uma única folha. Isso se deve ao que se denomina "reflectância aditiva". A energia transmitida através do primeiro nível de folhas e reflectido pelo segundo nível é parcialmente transmitido para o nível próximo inferior e assim por diante. O esquema apresentado na figura VI.5, ilustra o processo. Através da reflectância aditiva pode se estimar o estágio evolutivo de um determinado cultivo, dentro de uma análise temporal (Hoffer, 1978).

A reflectância da vegetação na região do infravermelho médio do espectro é controlada pelas chamadas bandas de absorção da água, as quais ocorrem próximas a 1,4, 1,9 e 2,7 μm (figura VI.5). Os picos de reflectância, ocorrem nos comprimentos de onda 1,6 e 2,2 μm , entre as bandas de absorção.

A faixa do infravermelho médio permite que se estime o conteúdo de umidade da vegetação. Quando os teores de umidade da vegetação decrescem, a reflectância no infravermelho médio aumenta nas bandas correspondentes a absorção da água, resultando em um aumento da energia reflectida pelos comprimentos de onda presentes nos intervalos entre as bandas de absorção. Esse efeito é denominado "carryover".

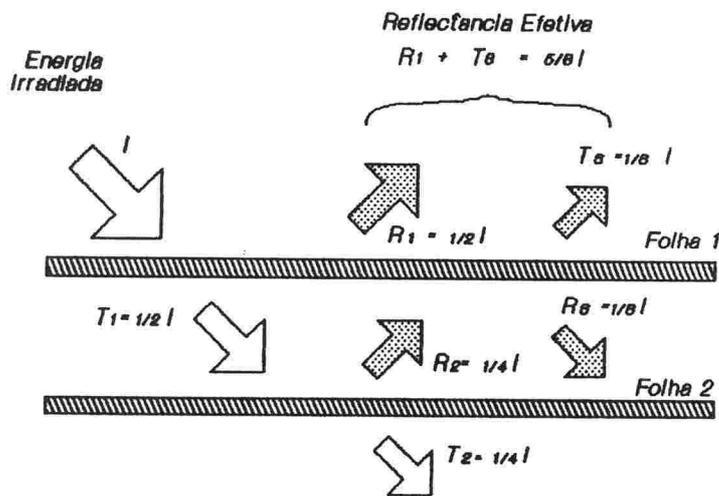


Fig. VI.5 - Esquema de reflectância de múltiplos níveis de folhas

6.3.2. Características Espectrais do Solo

As curvas de reflectância para maioria dos materiais que compõe o solo são bem menos complexas, pelo menos em aparência, do que as da vegetação. Na figura VI.6, são mostradas as curvas de reflectância típicas de três tipos diferentes de solos, mantendo-se as mesmas condições de baixa umidade.

Entre os parâmetros que influenciam na interação matéria-energia estão a textura, o teor de umidade, a quantidade de matéria orgânica e a presença de óxidos metálicos.

A textura do solo, pode ser representada pela porcentagem relativa de partículas de diferentes diâmetros presentes no solo. As partículas com um diâmetro menor do que 0,002 mm são definidas como argilas, de 0,002 a 0,05 mm como silte e de 0,05 até 2mm como areia (Mitchell et al., 1980).

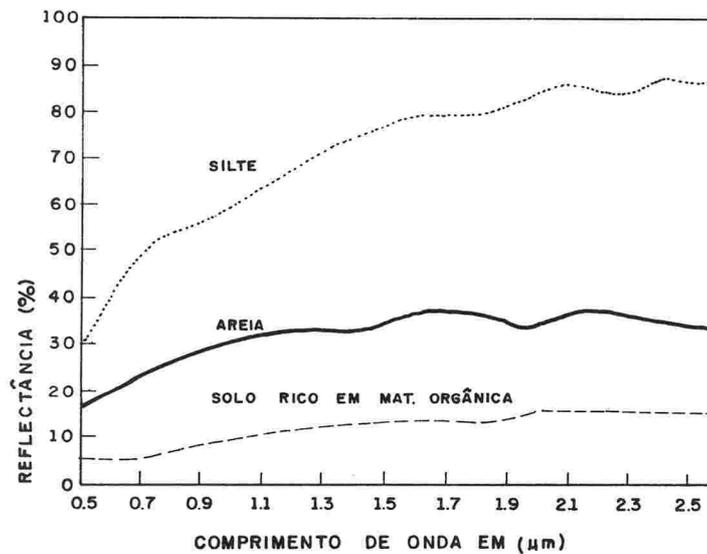


Fig. VI.6 - Reflectância de três diferentes tipos de solo.

A proporção de materiais de diferentes diâmetros está diretamente relacionada com a superfície específica e porosidade de um solo, fatores que influenciam na retenção e movimento da água entre as partículas. Os solos com uma porcentagem grande de partículas com granulometria fina (argila e silte - abaixo de 0,05 mm) retêm bastante umidade, pois são solos com grande superfície específica e pouca porosidade, ao contrário dos solos arenosos. Esta relação entre o tamanho das partículas do solo e o seu conteúdo de umidade, apresentam um significativo impacto na resposta espectral do solo. A figura VI.7 representa o efeito do conteúdo de umidade na resposta espectral de um solo tipicamente argiloso.

Como se pode ver, da mesma forma que na vegetação, na medida que o conteúdo de umidade do solo cresce, decresce a sua reflectância nas bandas de absorção da água (1,4, 1,9 e 2,7 μm). Como foi visto na seção 6.3.1 o decréscimo da reflectância nas bandas de absorção causam um decréscimo nos comprimentos de onda situados entre elas.

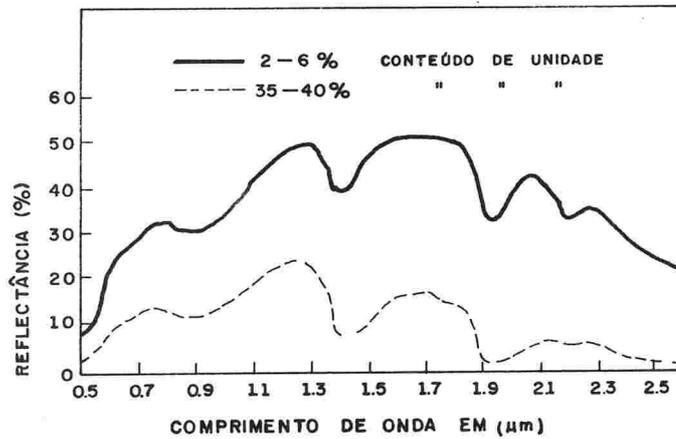


Fig. VI.7 - Reflectância de um solo argiloso com diferentes teores de umidade.

Os teores de matéria orgânica interferem nas faixas do visível e do infravermelho do espectro, em uma razão inversa às taxas de energia refletida. A cor do solo está associada a presença de óxidos metálicos (ferro e manganês). A remoção do óxido de ferro causa um substancial acréscimo nos valores de reflectância do solo na faixa do visível e parte do infravermelho próximo (0,5 e 1,0 μm).

A análise do comportamento de todos estes parâmetros permite diferenciar os principais grupos de solos, porém deve-se levar em conta que em situações de campo muitas vezes existirá a interferência da cobertura vegetal, o que implicará em abordagens indiretas de classificação, para fins pedológicos.

6.4. Pré-Processamento de Imagens Digitais em Sensoriamento Remoto

As técnicas de pré-processamento, tem por objetivo corrigir erros de geometria e de radiometria presentes em uma imagem digital.

Os erros radiométricos, estão associados aos valores referentes ao brilho de cada pixel podendo ter origem na instrumentação utilizada ou em efeitos provocados pela atmosfera. Os erros geométricos podem provir de diversas fontes, como o movimento relativo entre o satélite e a Terra, a curvatura da Terra e as variações na orientação do satélite (Richards, 1986).

6.4.1. Correção Radiométrica

Três correções são consideradas aqui:

- correção de ruído (aleatório);
- correção de problemas instrumentais e
- correções de efeitos provocados por agentes externos.

Denomina-se ruído, no processamento de imagens, a um ou mais sinais que ocorrem aleatoriamente em uma imagem digital. Este tipo de falha ocorre durante a transmissão dos dados entre o sistema sensor e a estação em terra.

As falhas devido a problemas instrumentais ocorrem durante a varredura da superfície terrestre e apresentam em geral um padrão sistemático. Como exemplo pode-se mencionar, falhas em linhas de varredura causando lacunas (line dropout), falhas no início e/ou durante a varredura (start problems) e padrões de bandas na imagem (striping ou banding). Este último tipo de falha instrumental (bandeamento na imagem) se deve a valores distintos no ganho e offset entre os componentes do sensor.

Os processos de correção tanto para as falhas acima citadas podem ser realizadas a partir dos dados existentes na imagem por meio de uma cópia ou reamostragem (interpolações). Por exemplo, em uma falha de varredura, onde se perca uma linha ou um segmento de linha, esta poderá ser substituída por uma das linhas vizinhas, ou pela ponderação destas. Embora a informação perdida não possa ser recuperada a correção introduzida é útil no processo de interpretação visual ou classificação auxiliada por computador.

As técnicas de pré-processamento radiométrico tratam também da correção das distorções na imagem digital causadas por agentes externos ao sistema sensor, como a contribuição devido ao espalhamento atmosférico, que resulta numa contribuição aditiva em função do comprimento de onda. A correção atmosférica devido ao espalhamento é especialmente importante em situações em que haja a necessidade de uma análise multitemporal da cena ou em situações em que este efeito mascare excessivamente as informações presentes em uma única imagem.

Outros efeitos externos que causam diferenças radiométricas e que devem ser corrigidos em estudos de imagens multitemporais são causados principalmente por alterações sazonais que ocorrem durante as várias estações do ano. Os efeitos sazonais compreendem um somatório complexo que envolve o ângulo de incidência solar, clima, umidade relativa, assim como outros fatores naturais.

6.4.2. Correção Geométrica

A função dos programas de correção geométrica é reorganizar os pixels da imagem em relação a um determinado sistema de projeção cartográfica. Este procedimento é imprescindível quando se deseja associar as informações presentes na imagem a um banco de dados geo-relacionado.

As correções geométricas em uma imagem ficam definidas por um modelo matemático, que pode ser linear ou não. Os parâmetros que ocorrem no modelo são estimados para cada caso, utilizando o método dos mínimos quadrados em pontos de controle. Por pontos de controle entende-se aqui, detalhes de fácil identificação na imagem e com coordenadas conhecidas em um sistema cartográfico de referência.

Uma vez estimados os parâmetros existentes no modelo a imagem corrigida pode ser obtida a partir da original, em formato de grade regular (varredura), por meio de um processo de interpolação. Entre as técnicas de interpolação mais conhecidas encontram-se

- a) Vizinho mais Próximo: O valor do contador digital a ser atribuído ao pixel Z terá o mesmo valor de contador digital do pixel que se encontrar mais próximo da posição ocupada por Z.
- b) Interpolação Bilinear: O valor do contador digital a ser atribuído ao pixel Z é determinado a partir do valor dos 4 pixels vizinhos.
- c) Convolução Cúbica: O contador digital a ser atribuído ao pixel Z é determinado a partir de cálculos realizados na matriz de 16 pixels na sua vizinhança.

6.5. Processamento de Imagens Digitais em Sensoriamento Remoto

A análise visual de imagens obtidas por Sensoriamento Remoto, se torna bastante facilitada, quando técnicas de realçamento radiométrico são aplicadas. Desta forma, diferenças sutis nos valores de brilho, dentro de um conjunto de pixels, podem ser salientadas através de técnicas de manipulação numérica da imagem que ampliam o contraste entre os pixels.

A análise do histograma dos valores de brilho de uma imagem se constitui em uma etapa preliminar para uma manipulação radiométrica satisfatória. O histograma da maioria das imagens apresenta uma distribuição multimodal, onde normalmente cada pico está associado à uma classe. Já quando em uma imagem ocorre a forte predominância de uma classe, esta tende a apresentar um histograma com formato aproximado de uma distribuição gaussiana.

A figura VI.8 descreve as características básicas da distribuição dos contadores digitais em um histograma para diferentes tipos de imagens. É importante lembrar que o histograma de uma imagem somente representa a quantidade de pixels para cada valor de contador digital, nada informando sobre a sua distribuição espacial na imagem (Schowengerdt, 1983).

Os métodos de processamento radiométrico utilizados no presente trabalho, se dividem em dois grupos: técnicas de processamento "pontual" e técnicas de processamento de "vizinhança".

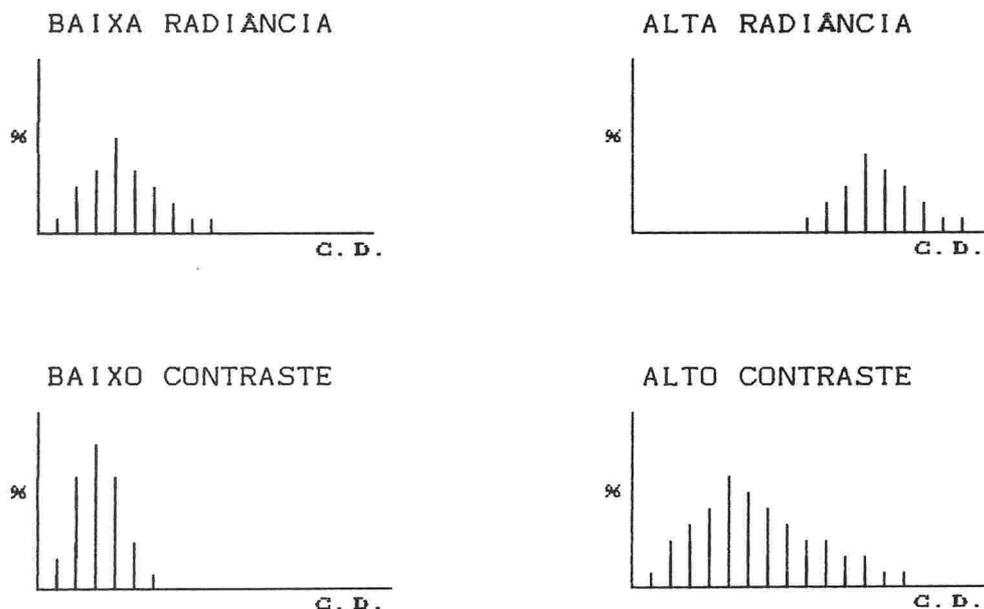


Fig. VI.8 - Histogramas característicos para diferentes cenas.

O primeiro grupo consiste de técnicas, pelos quais a transformação de cada pixel em uma imagem, depende unicamente do valor do contador digital deste. Neste grupo se enquadram as técnicas de manipulação de contraste.

No segundo grupo estão as técnicas que se caracterizam por utilizar o valor de brilho dos pixels vizinhos ao elemento de imagem a ser transformado para a geração de uma nova imagem. Este grupo caracteriza as técnicas de filtragem espacial, as quais permitem realçar ou suavizar uma imagem.

6.5.1. Manipulação de contraste

O efeito de uma manipulação de contraste em um histograma de imagem pode ser observado na figura VI.9. Segundo *Schowengerdt (1983)*, cada contador digital na imagem original é transformado em um outro valor, por meio de uma função de transformação linear ou não-linear gerando assim uma nova imagem. Deve-se observar também, que teoricamente a área do histograma não é modificada por efeito da manipulação de contraste, pois esta representa o número total de pixels de uma imagem (ou área unitária se o histograma for normalizado).

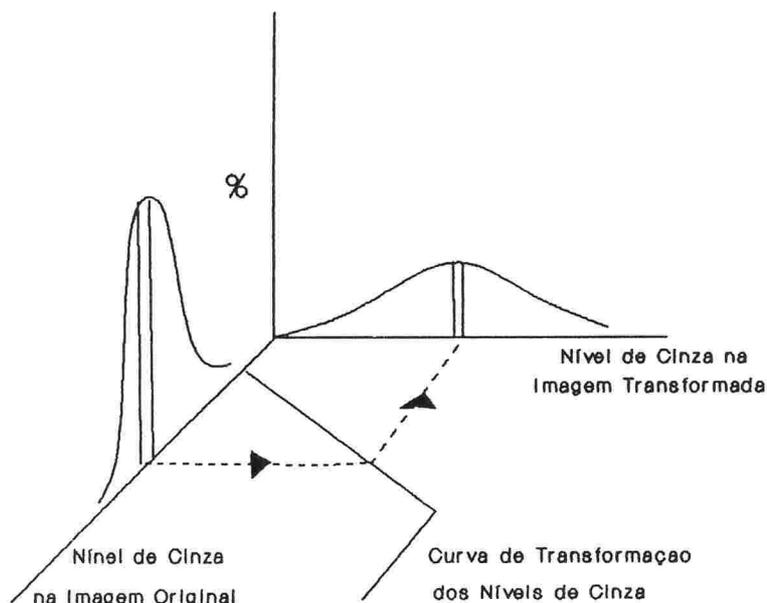


Fig. VI.9 - Transformação de contadores digitais.

O baixo contraste das imagens referentes a cada uma das bandas espectrais da imagem digital utilizada neste trabalho, levou a utilização de uma técnica de manipulação de histograma denominada ampliação de contraste (contrast stretch). Neste processo a função transformação é linear ou linear por segmentos (piecewise linear), de tal forma que a operação envolvida implica numa simples ampliação do intervalo entre os valores extremos do histograma (figura VI.9). Na obtenção de um grande acréscimo de contraste, poderá ocorrer saturação nos valores de brilho em ambos extremos do histograma de saída (Richards, 1986).

Nos freqüentes casos de assimetria de histograma, é impossível controlar simultaneamente os dois extremos do histograma com uma simples função linear. Uma transformação linear por segmentos (piecewise linear transformation), permite que ajustem diferentes segmentos de reta, atribuindo diferentes funções, a diferentes partes do histograma, obtendo-se um melhor contraste para estes casos. Funções de transformação não lineares, como por exemplo, a empregada no método de equalização de histograma, não foram utilizadas neste trabalho.

6.5.2. Filtragem espacial

A filtragem espacial, como a manipulação de contraste, é uma transformação pixel a pixel em uma imagem digital. Neste caso porém, a transformação não depende unicamente do contador digital do pixel processado, mas também dos contadores digitais dos pixels vizinhos, isto é, de uma região da imagem que envolve o pixel.

A definição de filtragem, nesse caso está ligado com o conceito de freqüência espacial. O conceito de freqüência espacial em uma imagem, pode ser melhor entendido através da análise de Fourier. Utilizando a transformada de Fourier, uma

imagem $f(x,y)$ (domínio espacial) pode ser decomposta em um somatório de funções periódicas seno e cosseno. Cada uma dessas componentes apresenta um período ou frequência própria:

$$f(x,y) = \sum_{u=1}^N \sum_{v=1}^N F(u,v) \exp [-i 2\pi (ux + vy)] \quad (VI.3)$$

sendo:

$$F(u,v) = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N f(x,y) \exp [i 2\pi (ux + vy)] \quad (VI.4)$$

$F(u,v)$ é a transformada de Fourier da imagem $f(x,y)$, e representa um fator ponderador para cada componente periódica na equação (VI.1) na formação da imagem $f(x,y)$.

As variáveis u, v tem uma interpretação bastante direta.

Pelo teorema de Euler:

$$\exp [-2\pi i (ux + vy)] = \cos 2\pi (ux + vy) - i \sin 2\pi (ux + vy) \quad (VI.5)$$

A componente cosseno, atingirá os máximos quando:

$$(ux + vy) = n \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (VI.6)$$

ou

$$y = -\frac{1}{v/u}x + \frac{n}{v} \quad (\text{VI.7})$$

Gráficamente, essa condição de máximo pode ser entendida como uma família de linhas retas paralelas, com coeficiente linear $\frac{n}{v}$ e coeficiente linear $-\frac{1}{v/u}$ (Figura VI.10).

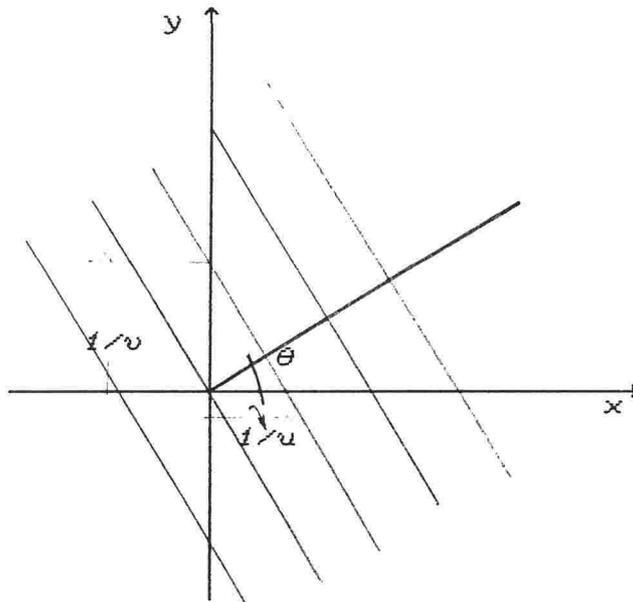


Fig. VI.10 - Condição de máximo da expressão da componente cosseno.

(fonte - Duda & Hart)

Essas retas interceptam o eixo x nos pontos $0, 1/u, 2/u, \text{ etc}$ e o eixo y nos pontos $0, 1/v, 2/v, \text{ etc}$.

Portanto, u e v representam respectivamente o número de vezes que o padrão $(\cos 2\pi (ux + vy))$ se repete ao longo dos eixos x e y respectivamente, da imagem $f(x,y)$. As variáveis u e v são portanto denominadas de "frequência espacial" ao longo dos eixos x e y respectivamente. Com a componente seno, pode-se fazer considerações similares.

Em termos práticos, as altas frequências espaciais estão associadas à transições bruscas na imagem (feições lineares, bordas, ruídos), enquanto que as baixas frequências espaciais estão associadas as transições mais lentas. Esse fato torna a operação de filtragem de imagens facilmente compreensível. A eliminação ou suavização das baixas frequências espaciais ao mesmo tempo que as altas frequências são mantidas resulta em um realçamento de transições abruptas na imagem, enquanto o oposto ocorre quando da eliminação ou suavização das altas frequências espaciais.

A filtragem de uma imagem $f(x,y)$ no domínio de Fourier consiste das etapas seguintes:

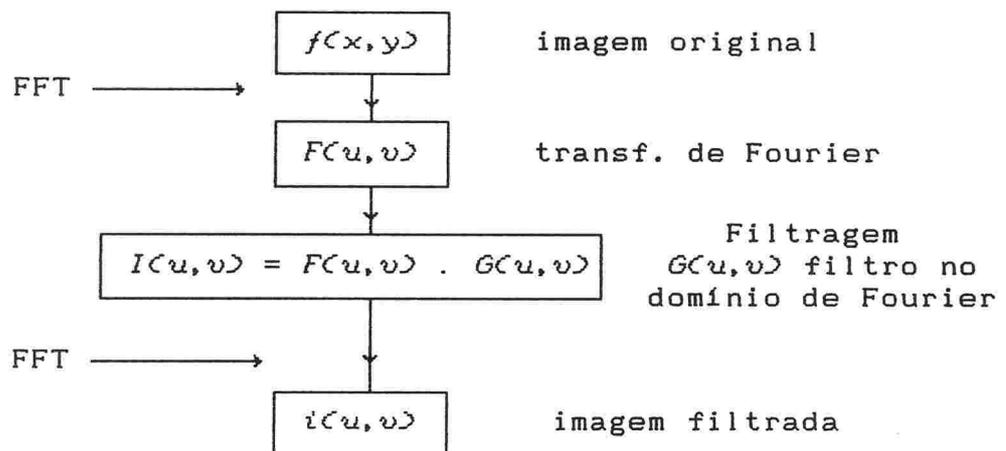


Fig. VI.11 - Etapas de filtragem de uma imagem no domínio Fourier

Pelo teorema da convolução a operação de multiplicação no domínio de Fourier equivale ao processo de convolução no domínio espacial (da imagem). Este teorema prova que se:

$$f(x,y) \leftrightarrow F(u,v) \quad (VI.8)$$

$$g(x,y) \leftrightarrow G(u,v) \quad (VI.9)$$

então:

$$f(x,y) * g(x,y) \leftrightarrow F(u,v) * G(u,v) \quad (VI.10)$$

onde:

\leftrightarrow : significa que duas funções formam um par de Fourier;

$*$: operação de convolução entre duas funções.

Para retornar ao domínio espacial, basta aplicar a transformada inversa de Fourier a imagem $I(u,v)$ no lugar de $F(u,v)$ da expressão (VI.3).

O processo de filtragem pode também ser aplicado diretamente no domínio espacial através do conceito de "janela móvel" (moving window) (Showengerdt, 1982). Esse processo equivale à implementação direta do conceito de convolução entre a imagem (discreta) e o filtro (janela móvel).

Os filtros podem ser classificados em filtros "Passa-Baixa" (LPF - Low Pass Filter) e Passa-Alta (HPF - High Pass Filter).

6.5.2.1. Filtros Passa-Baixa (LFF)

Em determinadas circunstâncias o processo de suavização de uma imagem, como pré-processamento ao processo de classificação por computador tem se mostrado adequado. O efeito da filtragem consiste em suavizar a imagem, eliminando ou diminuindo pequenas variações locais (muitas vezes a nível de pixel). Esse processo resulta uma variação menor para as classes envolvidas e portanto uma classificação mais uniforme. Em termos práticos, equivale à

uma degradação na resolução espacial da imagem resultando na perda de pequenas variações locais que se supõe irrelevantes no processo de classificação.

O mais simples exemplo de filtro passa-baixa é o operador média, assim chamado por atribuir ao pixel processado, a média aritmética dos valores de brilho dos pixels contidos na vizinhança definida pelo tamanho da janela do operador (3x3, 5x5, 7x7, 9x9 e assim por diante).

No caso de um operador média com uma janela de convolução 3x3, com nove coeficientes, c_i , teremos:

$$\text{janela genérica} = \begin{matrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 \end{matrix} \quad (\text{VI.11})$$

os coeficientes do operador média tem valor unitário:

$$\text{janela A} = \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix} \quad (\text{VI.12})$$

A figura VI.12(a) representa a forma da função $G(u,v)$ que este filtro apresenta no domínio de Fourier (em uma dimensão). A figura VI.12(b) representa a função $g(x)$ correspondente no domínio espacial. Sendo que $G(u) \leftrightarrow g(x)$, conforme anteriormente explicado.

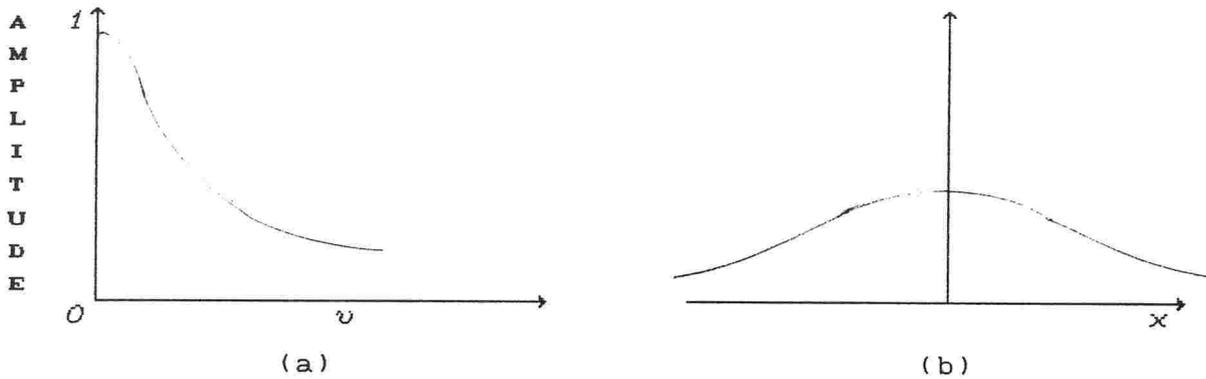


Fig. VI.12 - (a) função $G(u)$ do filtro Passa-Baixa, no domínio das frequências, (b) função $g(x)$ no domínio espacial.

O pixel processado, será aquele coincidente com o centro da janela (c_5). Desta forma temos:

$$LFF_{5,out} = INT \left[\frac{\sum_{i=1}^{n=9} c_i \times VB_i}{n} \right] \quad (VI.13)$$

onde:

$LFF_{5,out}$ = valor de brilho na posição $i=5$ após a filtragem;

VB_i = valor do brilho do pixel na posição i da janela na imagem original;

c_i = coeficiente da janela de convolução na posição i .

obs: a função INT , indica que o resultado da convolução será somente a parte inteira do resultado.

Esta operação é repetida para todos os pixels da imagem.

Existem outros filtros passa-baixa. Por exemplo o filtro "moda", nesse caso o pixel resultante é escolhido através do processo estatístico da Moda, ou seja, é escolhido aquele valor de brilho que mais vezes aparecer dentro da área da janela móvel. Este operador tem a característica de suavizar a imagem preservando as bordas entre as feições da cena.

6.5.2.2. Filtros Passa-Alta (HFF)

Os filtros passa-alta, neste trabalho, foram utilizados para enfatizar a heterogenidade das feições da cena de estudo, permitindo uma melhor discriminação dos diferentes tipos de usos e manejos do solo, já que as características de uma imagem digital que são evidenciadas pela alta frequência espacial, são os pequenos detalhes radiometricamente distintos da vizinhança, ruídos e contornos.

A figura VI.13(a) representa a forma da função $G(u,v)$ que este filtro apresenta no domínio de Fourier (em uma dimensão). A figura VI.13(b) representa a função $g(x)$ correspondente no domínio espacial. Sendo que $G(u) \leftrightarrow g(x)$ conforme anteriormente explicado.

O filtro passa-alta utilizado para convolução sobre a imagem deste trabalho foi:

$$\text{janela } D = \begin{matrix} & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 13 & -1 & \\ -1 & -1 & -1 & \end{matrix} \quad (\text{VI.14})$$

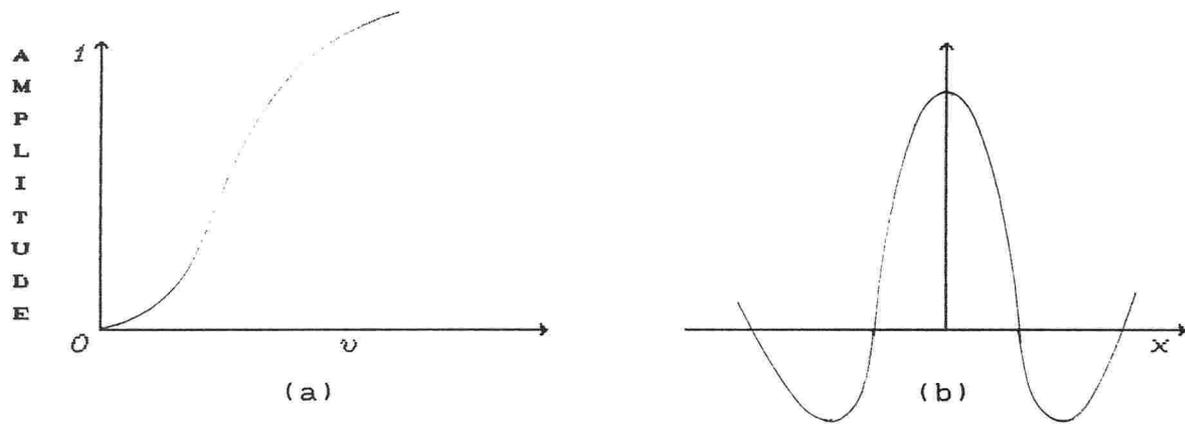


Fig. VI.13 - (a) função $G(u)$ do filtro Passa-Alta, no domínio das frequências, (b) função $g(x)$ no domínio espacial.

Quanto ao tamanho do operador, é importante lembrar que quanto maior o seu tamanho, maior será o efeito de suavização ou realce dos componentes da imagem.

6.6. Classificação Temática de Imagens Digitais em Sensoriamento Remoto

Segundo *Richards (1986)*, do ponto de vista quantitativo, as técnicas de processamento digital tem por objetivo, examinar cada pixel de uma imagem e avalia-los numericamente, com base em seus atributos. Este tipo de abordagem, denominado interpretação computacional, é bastante conveniente quando se visa por exemplo, mapear as diversas classes de cobertura do solo de uma determinada cena.

As principais vantagens e desvantagens da análise quantitativa, com relação aos métodos convencionais de interpretação de imagens (fotointerpretação), são descritos na tabela VI.4.

Tabela VI.4 - Comparação entre interpretação visual e análise quantitativa.

Interpretação visual	Análise quantitativa
- Escala maior que um pixel	- Escala de um pixel
- Estimativa inexata de área	- Maior precisão na estimativa de áreas
- Análise multiespectral limitada	- Análise multiespectral multidimensional
- O ser humano percebe em torno de 16 níveis de cinza	- Possibilidade de interpretar até 256 níveis de cinza por banda
- Fácil determinação de formas	- A determinação de formas envolve complexos algoritmos de decisão
- Informação espacial de fácil utilização, dentro de uma abordagem qualitativa.	- Limitada disposição de técnicas quantitativas que façam uso de dados espaciais (formato, textura e tamanho).

Além de fazer uma abordagem global, na identificação das feições de uma cena, os processos de fotointerpretação baseiam-se na capacidade que um ser humano treinado (analista) tem de assimilar dados disponíveis em três ou menos bandas espectrais de todo um conjunto disponível. Considerando que o sistema LANDSAT MSS dispõe de quatro bandas espectrais e o sistema LANDSAT TM de sete, além dos rastreadores aerotransportados que podem operar em doze ou mais bandas, percebe-se que o potencial de análise dessas informações através de fotointerpretação fica bastante limitado,

enquanto que através da análise computacional multidimensional é possível manipular em conjunto todas as faixas espectrais captadas por um sistema sensor.

Por outro lado o homem é incapaz de discriminar a resolução radiométrica disponível em qualquer dos sistemas sensores acima citados, pois nenhum ser humano tem capacidade de distinguir 64 ou mais tons de cinza, ficando portanto muito abaixo do poder de discriminação de um computador.

A análise quantitativa baseia-se em processos de classificação. A classificação é um método pelo qual rótulos identificando classes são atribuídos aos pixels de uma imagem de acordo com as suas características espectrais. Essa rotulação é implementada computacionalmente, através de algoritmos, que utilizando regras previamente estabelecidas, reconheçam pixels espectralmente similares. Esses rótulos ou temas, podem ser então, associados a uma tabela de cores ou padrões de impressão e gerar uma imagem temática a partir de uma imagem digital multiespectral.

6.6.1. Espaço Multiespectral

O meio mais eficiente de representar dados multiespectrais, para poder formular algoritmos de classificação consiste em definir um espaço multiespectral com uma dimensionalidade igual ao número de bandas espectrais a serem usadas na classificação. Nesse espaço, cada pixel tem sua posição definida pelo valor do respectivo contador digital em cada uma das componentes. Isto é ilustrado de forma simplificada na figura VI.14, em um espaço bidimensional. Se as bandas escolhidas permitirem uma boa discriminação das feições, é de se esperar que os pixels formem agrupamentos no espaço multiespectral. Cada um desses agrupamentos é associado a uma classe de cobertura do terreno (information classes).

Segundo *Richards (1986)*, na prática uma classe de cobertura no terreno dificilmente será representada por um único agrupamento, como aparece na figura VI.14. É muito comum associar vários agrupamentos para um mesmo tipo de solo ou de vegetação em uma cena. Isso resulta não somente das diferenças específicas entre os tipos de cobertura mas também da diferença de alguns parâmetros como umidade e efeitos do relevo, entre outros. Conseqüentemente, o espaço multiespectral provavelmente será mais parecido com a figura VI.15, onde cada classe de cobertura do terreno é vista como sendo uma composição de vários agrupamentos ou classes espectrais (spectral classes).

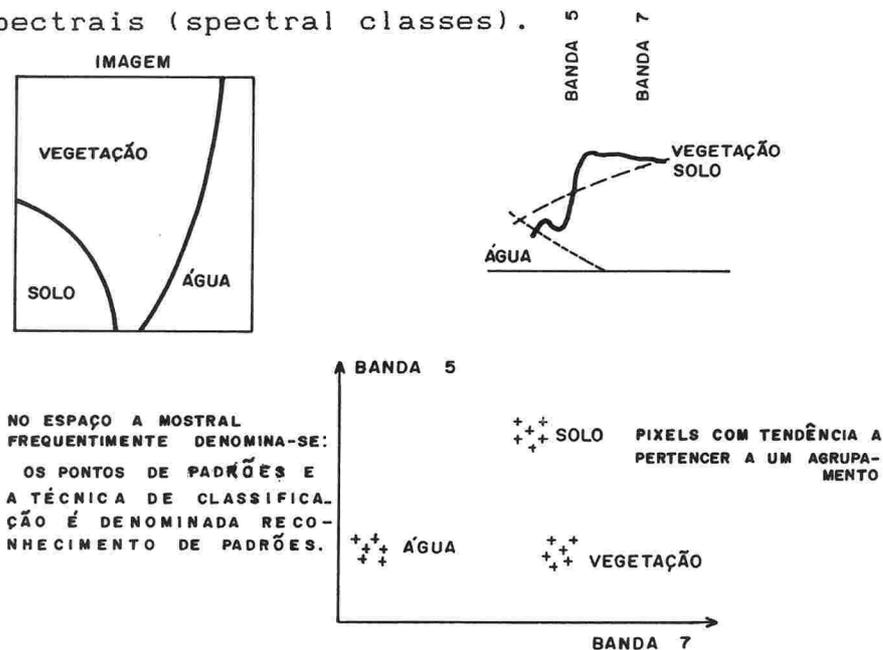


Fig. VI.14 - Espaço espectral bidimensional mostrando a sua relação com as características de reflectância espectral de diferentes tipos de coberturas do terreno.

Os processos de classificação caracterizam-se por rotular os pixels que constituem uma imagem, como pertencentes a determinadas classes espectrais, utilizando os dados espectrais disponíveis. Isto é ilustrado na figura IV.16.

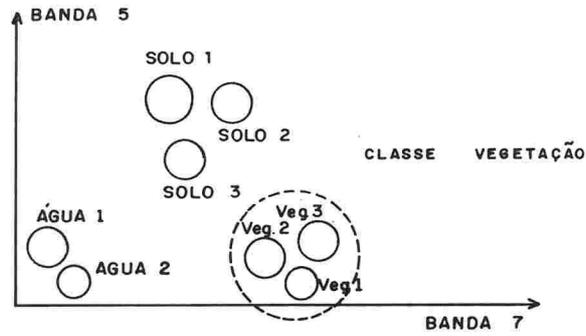


Fig. VI.15 - Representação das classes de cobertura por um conjunto de agrupamentos de classes espectrais.

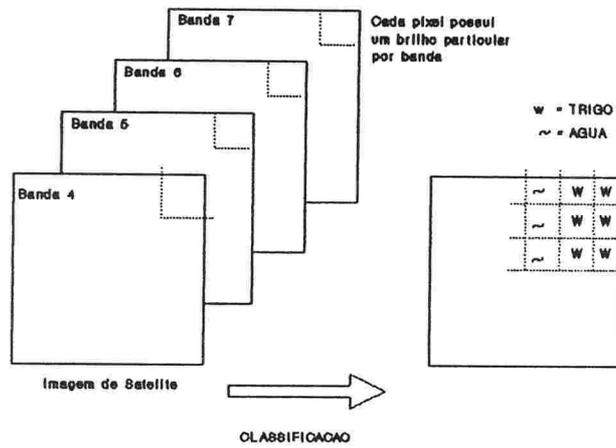


Fig. VI.16 - Esquema de rotulação de pixels de uma imagem LANDSAT MSS. (fonte Richards, 1986)

Existem duas abordagens quanto aos processos de classificação: Classificação Supervisionada e Classificação Não Supervisionada. Cada uma destas técnicas de classificação podem ser utilizadas alternativamente, porém a combinação destas técnicas é freqüentemente utilizada em metodologias de classificação híbridas (Richards, 1986).

6.6.2. Classificação Supervisionada

O processo de classificação consiste na partição do espaço multiespectral em regiões, associadas as classes. Uma possível abordagem consiste na utilização das chamadas funções decisão também conhecidas como funções discriminantes. Essas funções podem ser de natureza probabilística ou não. Em ambos os casos entretanto, são necessárias amostras de cada classe para estimação dos parâmetros que ocorrem nessas funções. Essa abordagem caracteriza o processo de classificação supervisionada.

6.6.2.1. Funções Discriminantes

As informações produzidas por um sistema sensor multiespectral atribuem a cada pixel um vetor com n medidas, onde n é o número de bandas do sensor.

Como foi visto na seção 6.6.1, esse pixel-vetor pode ser plotado em um espaço n -dimensional. Quando vários pixels-vetor associados a uma mesma classe de cobertura do terreno são plotados, tem-se um agrupamento de pontos (figura VI.19). É possível associar regiões do espaço multiespectral às classes de cobertura do terreno específicas. Essas classes são ditas *discrimináveis*, e todas as demais *indiscrimináveis*.

Segundo Swain (1980), o processo de classificar diferentes padrões de uma cena consiste primeiro em dividir o espaço de medidas multiespectrais em *regiões de decisão* (decision region), onde cada região corresponde a uma classe discriminável específica, e então construir um algoritmo de classificação que permita identificar cada pixel-vetor como pertencente a classe correspondente à região de decisão na qual ele se localiza. A primeira parte do processo é bem menos simples do que sugere a figura VI.17, visto que em muitos casos ocorre, como já foi visto, a sobreposição de alguns padrões pertencentes as classes de interesse. No entanto, para uma abordagem puramente conceitual este tipo de problema não será agora abordado.

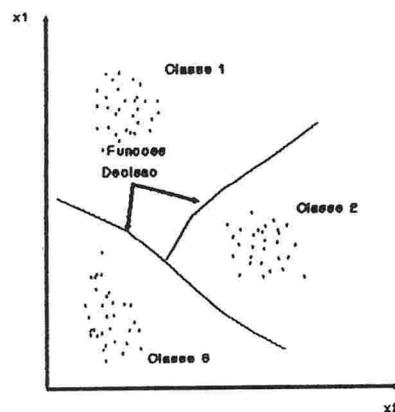


Fig.VI.17 - Regiões de decisão em um espaço bidimensional.

Assumindo que existam m classes e que as regiões de decisão correspondentes a cada classe tenham sido determinadas. Supondo que se possa determinar um conjunto de m funções de X , onde X é um pixel-vetor, denominadas *funções discriminantes* representadas por $g_1(X)$, $g_2(X)$, ..., $g_m(X)$, tendo a propriedade de que $g_i(X)$ será a função discriminante de maior valor quando X pertencer a i -ésima região de decisão. Então caso se deseje

classificar *qualquer* ponto X_u , isto é, determinar a qual região X_u pertence, tudo o que é necessário fazer é calcular os valores de $g_1(X_u)$, $g_2(X_u)$, ..., $g_m(X_u)$. O ponto X_u será atribuído à classe que gerar o maior valor de g (Swain, 1980).

Uma vez determinadas, as funções discriminantes podem ser utilizadas para construir um algoritmo classificador como o mostrado esquematicamente na figura VI.18.

Duas funções discriminantes podem ter valores iguais somente em pontos situados nas fronteiras entre as regiões de decisão. Quando isto ocorre uma regra de desempate deve ser definida.

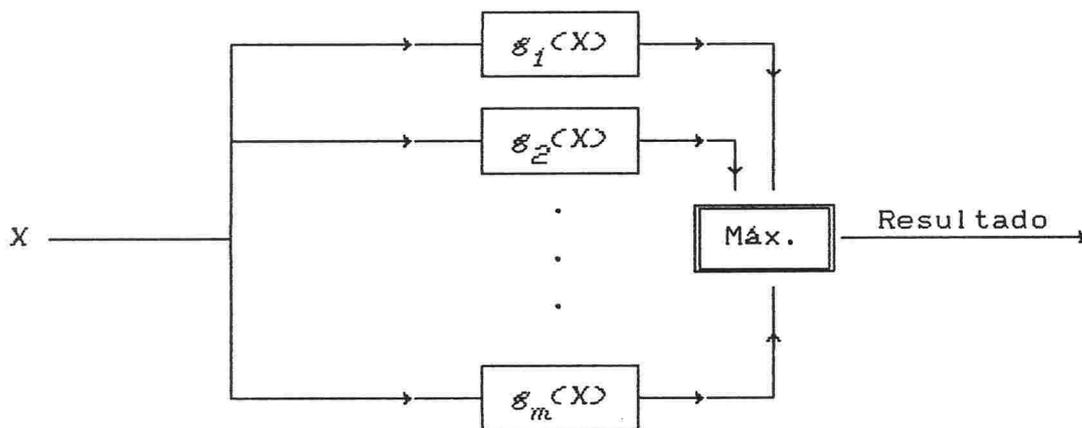


Fig. VI.18 - Algoritmo de classificação definido em termos de função discriminante.

(Swain, 1980)

6.6.2.2. Classificação por Máxima Verossimilhança (Maximum Likelihood Classification)

A classificação por Máxima Verossimilhança é o método de classificação supervisionada mais comumente usado em dados de imagens de Sensoriamento Remoto. A definição das funções discriminantes neste método estão baseadas na teoria estatística.

Este processo de classificação baseia-se na teoria de Bayes. Tem como regra de decisão classificar um pixel como pertencente a uma determinada classe, se a probabilidade de ocorrência desse pixel nessa classe for maior do que nas outras classes. Se assume, neste caso, que a função de probabilidade de cada classe se aproxima a uma função de densidade de probabilidade normal (Gaussiana).

No caso multivariado a função densidade de probabilidade é dada por:

$$p(X|\omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (X - U_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - U_i) \right] \quad (\text{VI.15})$$

onde:

$|\Sigma_i|$ = determinante da matriz covariância Σ_i ;

Σ_i^{-1} = inversa da matriz Σ_i ;

$(X - U)^T$ = transposta do vetor $(X - U)$.

sendo que para um caso n -dimensional:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad U_i = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_n \end{bmatrix} \quad \Sigma_i = \begin{bmatrix} \sigma_{i11} & \sigma_{i12} & \cdots & \sigma_{i1n} \\ \sigma_{i21} & \sigma_{i22} & \cdots & \sigma_{i2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{in1} & \sigma_{in2} & \cdots & \sigma_{inn} \end{bmatrix} \quad (\text{VI.16})$$

onde:

X = pixel vetor;
 U_i = vetor média e
 Σ_i = matriz covariância.

Na prática, o vetor média e a matriz covariância para cada classe são desconhecidos e devem ser estimados para o treinamento do algoritmo de classificação. Desta forma temos:

$$\hat{\mu}_{ij} = \frac{1}{q_i} \sum_{l=1}^{q_i} x_{jl} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{VI.17})$$

$$\hat{\sigma}_{ijk} = \frac{1}{q_i - 1} \sum_{l=1}^{q_i} (x_{jl} - \hat{\mu}_{ij})(x_{kl} - \hat{\mu}_{ik}) \quad (\text{VI.18})$$

$j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, n$

onde q_i é o número de amostras da classe ω_i .

A probabilidade de que um dado pixel X pertença a classe ω_i é dada pela expressão $p(\omega_i | X)$, que é desconhecida. Para definir a regra de decisão na classificação por Máxima Verossimilhança estima-se o valor de $p(\omega_i | X)$, pelo teorema de Bayes:

$$p(\omega_i | X) = \frac{p(X | \omega_i) \cdot p(\omega_i)}{p(X)} \quad (\text{VI.19})$$

onde:

$p(\omega_i | X)$ = probabilidade de que um dado pixel X pertença a classe ω_i (probabilidade "a posteriori");

$p(X | \omega_i)$ = função densidade de probabilidade normal para a classe ω_i ;

$p(\omega_i)$ = probabilidade "a priori" da classe ω_i e

$p(X)$ = probabilidade de encontrar um pixel de qualquer classe na posição X .

Para duas classes i e j , em um conjunto de n classes, a regra de decisão para Máxima Verossimilhança diz que $X \in \omega_i$ se e somente se

$$p(X | \omega_i) p(\omega_i) \geq p(X | \omega_j) p(\omega_j)$$

para todo $j = 1, 2, \dots, n$

A partir das equações (VI.15) e (VI.19) pode-se expressar a função discriminante $p(\omega_i | X)$ da seguinte forma:

$$p(\omega_i | X) = \frac{p(\omega_i)}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (X - U_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - U_i) \right] \quad (VI.20)$$

Do ponto de vista computacional a expressão (VI.20) tem a sua implementação simplificada através da sua logaritmização.

$$\ln p(\omega_i | X) = \ln p(\omega_i) - \frac{1}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (X - U_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - U_i) \quad (VI.21)$$

6.6.2.3. Classificação por Mínima Distância

O algoritmo de classificação supervisionada por Mínima Distância é de simples implementação e é um dos mais utilizados. Neste algoritmo, à cada pixel-vetor X desconhecido é assignada a classe cujo vetor-média U_i esteja mais próximo no espaço espectral.

Este algoritmo é um caso especial da forma geral do classificador por Máxima Verossimilhança. Assumindo-se que as matrizes covariância de todas as classes estipuladas sejam iguais, isto é,

$$\Sigma_i = \Sigma_j = \Sigma_0 \quad (\text{VI.22})$$

e que as probabilidades "a priori" sejam iguais

$$p(\omega_i) = p(\omega_j) = p_0 \quad (\text{VI.23})$$

então a função discriminante representada pela equação (VI.21) fica representada pela seguinte expressão:

$$g_i(X) = A - \frac{1}{2} (X - U_i)^T \Sigma_0^{-1} (X - U_i) \quad (\text{VI.24})$$

onde a constante A é:

$$A = \ln p(\omega_0) - \frac{1}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln|\Sigma_0| \quad (\text{VI.25})$$

sendo A constante pode ser ignorada na comparação de g_i para diferentes classes.

A expressão

$$d_{Mi} = - \frac{1}{2} (X - U_i)^T \Sigma_0^{-1} (X - U_i) \quad (\text{VI.26})$$

denomina-se *Distância de Mahalanobis*.

Se as matrizes covariância forem consideradas diagonais, ou seja, as feições da cena não são correlacionadas e o valor da variância for igual ao longo do eixo de cada feição, para uma matriz Σ_i arbitrária

$$\Sigma_i = \begin{bmatrix} \sigma_0^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_0^2 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.27})$$

então

$$g_i(X) = A - \frac{(X - U_i)^T (X - U_i)}{2 \sigma_0^2} \quad (\text{VI.28})$$

Como todas as matrizes de covariância são iguais, desconsidera-se σ_0 .

A expressão $(X - U_i)^T (X - U_i)$ é um valor escalar que consiste em uma soma dos termos quadrados

$$\begin{aligned} d_{2i}^2 &= (X - U_i)^T (X - U_i) \\ &= (x_1 - \mu_{1i})^2 + (x_2 - \mu_{2i})^2 + \dots + (x_K - \mu_{Ki})^2 \end{aligned} \quad (\text{VI.29})$$

Esta expressão é simplesmente o quadrado da *Distância Euclidiana* entre os vetores X e U_i . A equação (VI.28), por outro lado, representa a função discriminante para o classificador de mínima distância (Schowengerdt, 1983). Dessa forma $g_i(X)$ será maior para a classe i quando a distância d_{2i} seja mínima.

A classificação por mínima distância é um algoritmo simples que pode ser eficientemente programado. Um estudo comparativo de algoritmos de classificação em aplicações agrícolas (Hixson et al., 1980 citado por Schowengerdt, 1983) conclui que o algoritmo

de mínima distância produz resultados com uma precisão comparável ao algoritmo de máxima-verossimilhança, consumindo a metade do tempo de computação

6.6.2.4. Considerações Sobre Treinamento

É importante que cada área de treinamento seja uma área homogênea e representativa da respectiva classe, pois a elevada heterogenidade dentro de uma amostra, pode causar a classificação de elementos não desejados.

Se para uma determinada classe for amostrada uma área muito extensa, será grande a probabilidade, de que existam elementos nessa amostra que não pertencem a classe de interesse, em outros termos, a amostra perderá representatividade estatística. Neste tipo de treinamento se torna evidente a importância do prévio conhecimento que o analista deverá possuir sobre o comportamento espectral das feições de interesse, assim como da distribuição espacial destas, pois é destas amostras que serão extraídos os parâmetros estatísticos (média e variância) que servirão de condição de contorno nos algoritmos de classificação.

É bom lembrar que o treinamento não gerará necessariamente classes espectralmente separáveis, pois alvos diferentes podem possuir respostas espectrais semelhantes.

6.6.3. Classificação Não Supervisionada

Nos processo de classificação Não Supervisionada, o analista emprega algoritmos computacionais que localizam as ocorrências naturais de grandes concentrações de pixels com padrões semelhantes (cluster algorithm) de uma imagem. Tais feições são assumidas então como classes desta imagem. Neste tipo de algoritmo não há a necessidade de qualquer informação a respeito

da área que está sendo classificada, delimitando apenas, áreas homogêneas, podendo-se dizer, que não ocorre o treinamento do algoritmo de classificação. Deve-se prever, no entanto, que estas áreas podem não corresponder as áreas de interesse para o analista.

Entre os algoritmos mais conhecidos para o cálculo de agrupamentos naturais de uma cena, estão o **K-médias** e o **Isodata**.

No K-médias a definição de classes é realizada tendo como critério agrupador a Distância Euclidiana entre o valor dos pixels no espaço de atributos espectrais (bandas).

Considera-se o centro de um agrupamento os valores do vetor média dos pixels pertencentes a esse grupo. A partir de valores iniciais que representam os centros de agrupamentos de possíveis classes, o programa calcula a distância entre o valor de cada pixel e o centros de cada agrupamento no espaço de atributos espectrais. O pixel pertencerá ao grupo em que o valor da Distância Euclidiana ele e o centro do agrupamento for menor. Feito isso, é calculado o novo vetor média de cada agrupamento. Este processo é feito sucessivamente, até que a diferença do valor médio do agrupamento, entre duas iterações, seja menor do que uma valor pré estabelecido (fator de convergência), ou até se atinja um número de iterações previstas pelo programa.

Os dados de entrada para o algoritmo K-médias são:

- o número de agrupamentos desejados (classes);
- o valor de convergência (tolerância);
- o número máximo de iterações.

O algoritmo Isodata³ determina o centro de cada agrupamento iterativamente a partir de informações estatísticas referentes a Distância Euclidiana entre o centro dos agrupamentos e do Desvio Padrão de cada agrupamento.

Partindo do princípio que quanto maior o desvio padrão menor a homogeneidade em uma classe, o Isodata permite que a partir de uma amostra inicial o programa determine que um agrupamento deva ser subdividido.

Para isso usa-se um fator definido como fração de divisão (Splinting Fraction (K)). Sempre que o desvio padrão de uma banda em um agrupamento exceder o valor especificado pelo analista, o valor médio para este agrupamento será incrementado ou diminuído de uma quantidade igual a K vezes o desvio padrão para esta banda. O inverso também é possível, ou seja, se houverem dois agrupamentos muito próximos, o programa fará com que estes se fundam em uma só classe.

³Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques A.

VII. ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA BACIA DO ARROIO TABOÃO E SUB-BACIAS

7.1. Descrição da Região de Estudo

A área estudada, bacia hidrográfica do arroio Taboão, situa-se na região fisiográfica do Planalto Médio, no Estado do Rio Grande do Sul, dentro da bacia hidrográfica do Rio Potiribú, está localizada entre as latitudes S-28°22'00" e S-28°30'00" e as longitudes O-53°35'00" e O-53°51'00", entre as cidades de Ijuí e Pejuçara (figura VII.1).

Estudos de predisposição aos riscos de erosão em todo o Brasil (Bordas et al. 1988) mostraram que a parte ocidental do derrame basáltico sulbrasileiro ocupa a quarta classe na escala de riscos, depois do oeste amazonense, de Minas Gerais e do divisor de águas entre a bacia do prata e a Amazônia; com uma produção específica de sedimentos que varia entre 75 e 100 toneladas por quilômetro quadrado por ano em bacias de 15.000 km².

De 1983 a 1987 foi feito o zoneamento de erosão potencial em 75% dos quase 300.000 km² do afloramento de basalto em território brasileiro, bem como uma classificação das bacias elementares da área. O resultado apontou 13 zonas físico-climáticas cuja hidrossedimentologia pode ser inteiramente coberta pelo estudo de 5 bacias características e sete classes de bacias elementares. Foram localizadas 2 das 5 bacias em que a pesquisa deveria ser implantada, sendo uma delas a bacia do rio Potiribu (Borges e Bordas, 1990)

A bacia escolhida faz parte do sistema hidrológico do rio Potiribu. Esta região foi escolhida para pesquisa por ser considerada representativa do derrame basáltico sulriograndense. É uma zona de planalto de relevo ondulado suave, com altitude média de 400 metros, solos medianamente erodíveis, onde predomina o latossolo roxo distrófico.

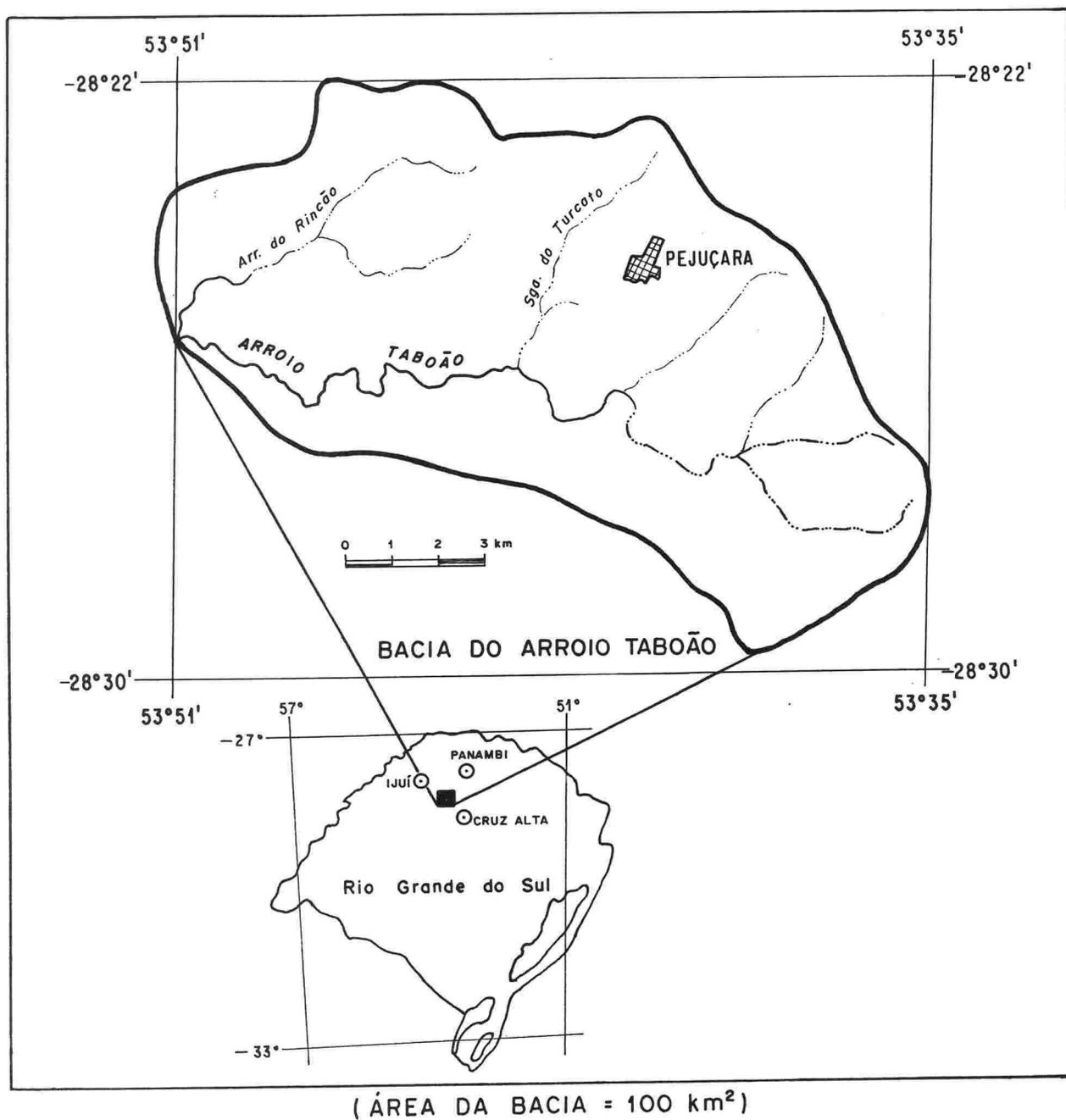


Fig. VII.1 - Situação e localização da Bacia do Arroio Taboão.

As águas desta região estão comprovadamente comprometidas pelo excesso de sedimentos produzidos por práticas agrícolas inadequadas. As principais culturas da região são o trigo e aveia como culturas de inverno e a soja e o milho como culturas de verão.

O clima da região é mesotérmico, do tipo temperado caracterizado por sua homogeneidade e por sua unidade regional (Chevallier, 1990, citando Nimer, 1989). Esta região caracteriza-se por possuir chuvas com os maiores índices de erosividade da região.

A pluviometria média interanual na região é da ordem de 1.700 mm. Para um período de retorno de 10 anos é de aproximadamente 1.200 mm na hipótese de seca e de 2.200 mm na hipótese úmida. Para um período de retorno de 100 anos os valores serão 800 mm e 2.600 mm respectivamente.

A distribuição mensal dos volumes de precipitações é muito regular, cerca de 120 mm por mês, em média (Chevallier, 1990).

7.2. Estimativa dos Parâmetros da USLE/MUSLE para a Região de Estudo

Para a alimentação do modelo hidrossedimentológico (USLE/MUSLE) da bacia do arroio Taboão, ambientado em um SIG, houve a necessidade de estimar os seus parâmetros constituintes, conforme as equações (III.1) e (III.13).

7.2.1. Estimativa do Fator de Erosividade da Chuva (R)

O fator de erosividade (R), que se pode traduzir como sendo o produto da energia cinética de uma chuva pela sua máxima intensidade em 30 minutos, foi estimado por *Chevallier e Castro*

(1991), a partir de 16 anos de dados de chuvas da região no posto Ijuí-Ipagro. A erosividade média anual é de aproximadamente 500 (t.m.mm/ha h). A erosividade máxima anual observada é de 759 e a mínima de 258 (t.m.mm/ha h).

A figura VII.2 representa a distribuição mensal dos valores de R .

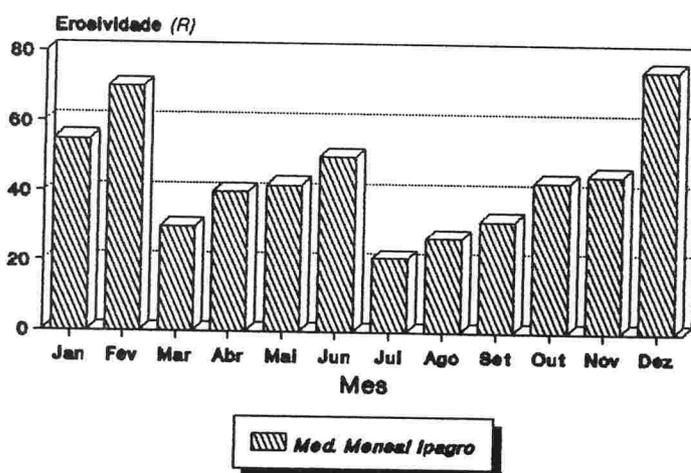


Fig. VII.2 - Valores médios mensais do índice de erosividade (R) - (Ijuí-Ipagro)

Os valores mensais do índice de erosividade apresentam máximos no verão, justamente na época do plantio da soja, ou quando esta se encontra ainda em estágio inicial de crescimento. Este fato se traduz em prejuízo para a conservação dos solos (Chevallier e Castro, 1991).

A partir da análise estatística dos 500 maiores índices de erosividade para um único evento chuvoso, observou-se uma distribuição log-normal cujos resultados permitem a obtenção dos valores de R para alguns períodos de recorrência, conforme a tabela VII.1 (Castro, 1992).

Tabela VII.1 - Valores de R para diferentes tempos de retorno

Tempo de Retorno (anos)	1	2	3	5	10	20
Erosividade (R) (t.m.mm/ha.h)	62	83	95	111	132	153

7.2.2. Análise do Fator de Escoamento Superficial da MUSLE

O fator de escoamento superficial, representado pela expressão $(11,8 (Q \times qp)^{0,56})$, da equação (III.18), é estimado em função de um evento chuvoso. Desta forma, enquanto a USLE permite estimar a produção anual de sedimentos, a MUSLE estima a perda de solos em uma bacia provocada por uma chuva.

Neste trabalho, foram utilizados, a título de exemplo e comparação, valores medidos de Q e qp por *Castro (1992)*, para duas sub-bacias do arroio Taboão nas datas em que também se efetuaram medições da concentração de sedimentos produzidos por esses eventos chuvosos.

Para a bacia do Donato ($1,38 \text{ Km}^2$), as medidas foram efetuadas no período compreendido entre os dias 17 e 20 de junho de 1991. Para esse evento chuvoso, obteve-se os seguintes valores para o volume de escoamento superficial e do pico do hidrograma de cheia:

$$Q = 12.850 \text{ m}^3 \qquad qp = 1,73 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para a bacia do Turcato ($19,3 \text{ Km}^2$), as medidas foram efetuadas no período compreendido entre os dias 04 e 06 de junho de 1991. Para esse evento chuvoso, obteve-se os seguintes valores para o volume de escoamento superficial e do pico do hidrograma de cheia:

$$Q = 245.600 \text{ m}^3$$

$$qp = 5.81 \text{ m}^3/\text{s}$$

Estes valores serão utilizados para comparar a ordem de grandeza dos valores de produção de sedimentos medidos em campo, com os valores estimados pela metodologia exposta neste trabalho.

7.2.3. Estimativa do Fator de Erodibilidade do Solo (K)

O fator de erodibilidade (K) na bacia do arroio Taboão foi mapeado a partir de um levantamento semidetalhado dos solos da bacia (Carvalho et al. 1989). Para este levantamento de solos foram utilizadas fotografias aéreas na escala 1:40.000, cartas topográficas na escala 1:25.000, dados de campo e análise laboratorial de amostras de solo.

Neste levantamento foram identificados os seguintes solos:

- Latossolo Roxo (LR);
- Latossolo Vermelho Escuro (LE);
- Terra Roxa Estruturada (TR);
- Glei Pouco Húmico (HGP);
- Solos Aluviais (A);
- Solos Litólicos (R);

A distribuição desses solos pela bacia do arroio Taboão é apresentada na figura VII.3 (Bordas e Vacas, 1990).

As características a seguir para cada classe de solo, foram extraídas do *Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul (1973)*.

Os solos classificados como Latossolo Roxo, são solos minerais, não hidromórficos, de textura argilosa, formados a partir de rochas eruptivas básicas (basalto). São solos de coloração arroxeadada, muito profundos, muito friáveis e acentuadamente drenados.

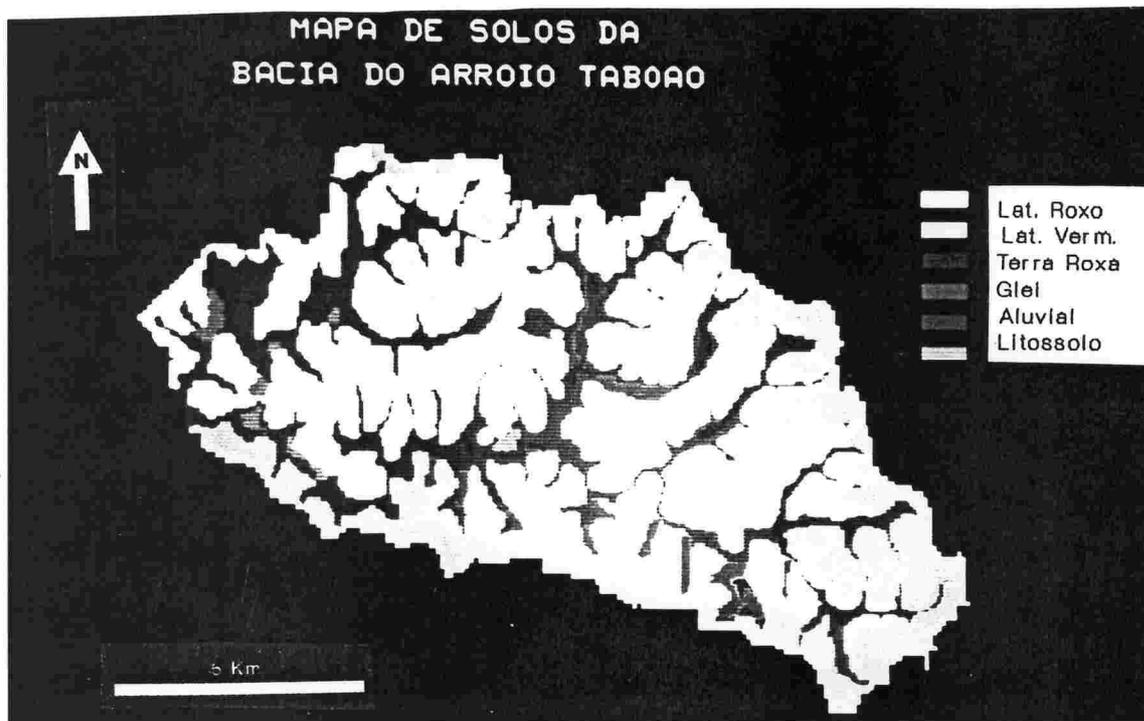


Fig. VII.3 - Mapa da pedologia do arroio Taboão.

Da mesma forma os solos classificados como Latossolo Vermelho Escuro, são solos minerais, não hidromórficos, com textura argilosa, formados a partir de rochas eruptivas básicas (basalto). São solos muito profundos, bem drenados, bastante porosos, com boa permeabilidade e friáveis quando úmidos.

As principais características dos solos identificados como, Terra Roxa Estruturada, é que são solos minerais, não hidromórficos, formados a partir de rochas eruptivas básicas (basalto), de coloração avermelhada-escura, bem drenados, textura argilosa.

Por Gleí Pouco Húmico, se compreende solos minerais, hidromórficos, constituídos por um horizonte superficial de coloração clara e com cerca de 20 cm de espessura, sobre horizonte glei de cor neutra (cinzenta), normalmente com mosqueados de coloração brunada ou amarelada. São formados em terrenos baixos com grande influência do lençol freático à superfície ou próximo dela, por todo o ano ou pelo menos durante

um longo período do ano, condicionado pelo relevo plano que ocasiona a má drenagem. São solos desenvolvidos a partir de sedimentos do quaternário, depositados ao longo dos rios ou em áreas baixas alagadiças.

Os solos Aluviais, são solos minerais, pouco desenvolvidos, com seqüência de horizontes do tipo A sobre C, de textura argilosa e espessura variável, podendo as vezes, ocorrer camadas gleizadas ou mosqueadas, refletindo más condições de drenagem.

A classe dos solos Litólicos, engloba solos muito pouco desenvolvidos, rasos (espessura inferior a 50 cm), constituídos por um horizonte A assente diretamente sobre a rocha consolidada (R), ou apresentando um horizonte C pouco espesso entre os horizontes A e R, comumente com muito material de rocha em decomposição.

A área estudada possui solos Litólicos com horizonte A moderado, com cerca de 20 cm de espessura, cor bruno-avermelhada-escura e textura média argilosa.

7.2.3.1. Avaliação do Fator *K* para cada Classe de Solo

A partir de algumas características das classes de solo acima citadas, estimou-se o índice de erodibilidade (*K*) destes solos utilizando-se o nomograma de *Wischmeier e Smith (1978)*.

Para a utilização do nomograma são necessárias informações referentes a:

- porcentagem de silte + areia muito fina (*s+af*);
- porcentagem de areia (*a*);
- porcentagem de matéria orgânica (*mo*);
- índice relativo a estrutura do solo (*est*);
- índice relativo a permeabilidade do solo (*perm*);

A tabela VII.2 apresenta a granulometria média das diferentes classes de solo presentes na bacia do arroio Taboão.

Tab. VII.2 - Granulometria dos solos da bacia do arroio Taboão
(valores em %)

Classe\Grão	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Grossa
LR	64	19	8	9
LE	55	18	13	14
TR	66	18	9	7
HGP	-	-	-	-
A	49	34	7	10
R	28	36	17	19

Diâmetros característicos de cada partícula:

- Argila: $\phi < 0,002$ mm
- Silte: $0,002 < \phi < 0,05$ mm
- Areia Fina: $0,05 < \phi < 0,2$ mm
- Areia Grossa: $0,2 < \phi < 2,0$ mm

Os valores da granulometria do solo Gleí Pouco Húmico não estão presentes no levantamento semidetalhado de *Carvalho et al. (1989)*. Os valores de granulometria encontrados no *Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul (1973)*, tem-se para um solo Gleí 44% de argila, 52% de areia fina + silte e 4% de areia grossa.

A tabela VII.3 apresenta os valores obtidos para o índice K, para os solos presentes na bacia do Arroio Taboão utilizando-se o nomograma de *Wischmeier e Smith (1978)*.

Tabela VII.3 - Estimativa do Índice K pelo Nomógrafo de *Wischmeier e Smith (1978)*.

Solo	s+af	a	mo	est	perm	K
LR	28	9	4,0	3	3	0,08
LE	30	10	3,5	3	3	0,08
TR	30	10	3,0	3	3	0,09
HGP	52	4	4,0	-	-	0,10
A	41	10	3,0	-	-	0,13
R	54	19	3,0	4	3	0,26

Obs.: Os solos glei e aluviais não possuem dados referentes a estrutura e permeabilidade, e por isso estimou-se o valor de K pela 1ª aproximação do nomograma.

O fator K medido por *Wischmeier e Smith (1978)*, foi deduzido a partir das características de 23 dos principais solos dos EUA, a partir de parcelas experimentais. Foi graças as características desses 23 solos que a equação ligando parâmetros de granulometria, teor de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade foi estabelecida.

Resulta, imediatamente, que nada prova que essa expressão do fator K deduzida da equação de *Wischmeier* seja utilizável com segurança para os solos e condições brasileiras, nem que o emprego do nomógrafo seja possível. Seria necessário verificar isso (*Leprum, 1981*).

Pombo et al. (1971) aplicaram o método do nomograma para solos do tipo latossolo no Rio Grande do Sul e encontraram um valor K variando com a profundidade de 0,16 a 0,21 para o Latossolo Roxo.

Segundo o *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1987)*, em estudos feitos para a bacia do Peixe-Paranapanema, baseado nos valores de *Bertoni e Lombardi (1975 e 1985)*, os valores de K são os seguintes:

Latossolo Roxo	K = 0,12
Latossolo Vermelho Escuro	K = 0,16
Terra Roxa Estruturada	K = 0,18
Glei pouco Húmico	K = 0,00
Aluvial	K = 0,00
Litossolo	K = 0,54

Tanto para o solo glei como o aluvial, o valor de K é zero ou muito baixo devido a quase ausência de declividade, nos sítios onde se encontram estas classes de solo.

Como a principal finalidade deste trabalho é encorajar o uso de técnicas de geoprocessamento para a manipulação de modelos hidrossedimentológicas, obteve-se por trabalhar com os valores dos solos paulistas, em função de que o fator K destes solos foi obtido através da análise das medidas de produção de sedimentos em parcelas de classes de solo com condições mais semelhantes as do Rio Grande do Sul.

7.2.3.2. Geoprocessamento do Fator de Erodibilidade do Solo (K)

Primeiramente, digitalizou-se o mapa pedológico no SIG em formato vetorial, atribuindo-se a cada polígono a classe correspondente de solo (figura VII.3), a partir de um levantamento planimétrico na escala 1:25.000.

Esse mapa pedológico, após a digitalização, sofreu uma conversão de formato, passando de formato vetorial para o formato

varredura. Dessa forma, obteve-se uma matriz com pixels de 30x30 metros, aos quais está atribuída uma classe de solo. Essa conversão vetor-varredura, tem por objetivo agilizar os processamentos de cruzamento de informações para a estimativa da produção de sedimentos e facilitar o cálculo de área de cada solo. Para cada solo estimou-se os seguintes valores de área:

Latossolo Roxo	42,3	Km ²
Latossolo Vermelho Escuro	33,7	Km ²
Terra Roxa Estruturada	21,6	Km ²
Glei pouco Húmico	2,26	Km ²
Aluvial	3,93	Km ²
Litossolo	1,06	Km ²

A partir do mapa de solos em formato varredura, atribuindo o respectivo índice de erodibilidade à classe de solo correspondente, isto é, fornecendo a cada pixel o seu valor de K, tem-se o mapa de erodibilidade do solo.

7.2.4. Estimativa do Fator Topográfico (LS)

Para a obtenção automática de parâmetros topográficos e geomorfológicos referentes aos modelos de produção de escoamento e sedimentos, como por exemplo índices de declividade, comprimentos de vertentes, entre outros, assim como a determinação da rede de drenagem e os divisores de água de bacias hidrográficas, implementou-se uma série de algoritmos que fornecem estas informações, em formatos adequados para manipulação e análise em um SIG, utilizando como base de dados um Modelo Numérico do Terreno (MNT).

7.2.4.1. Geração do Modelo Numérico do Terreno

O MNT ou grade regular de altitudes, representativo da região estudada, foi gerado a partir da interpolação local por média móvel ponderada (Burrough, 1986), das curvas altimétricas digitalizadas a partir das cartas planialtimétricas da região do arroio Taboão. (Folhas MI-2915/4 e MI-2916/3, escala 1:50.000 (figura VII.4). Este processo é detalhado na seção 5.2.2. do capítulo V deste trabalho.

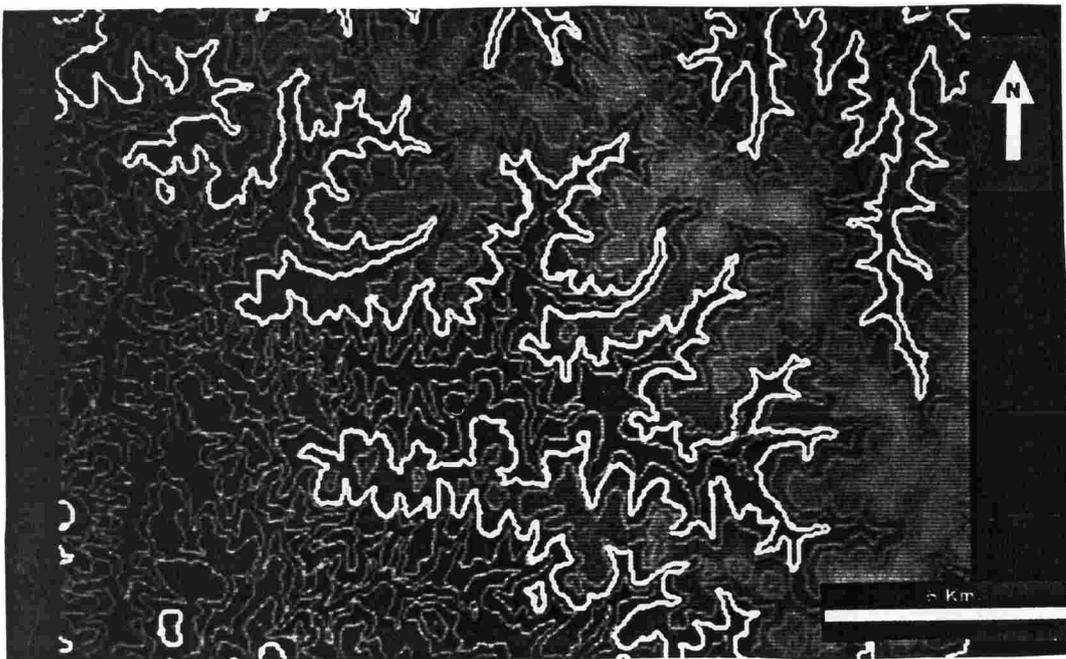


Fig. VII.4 - Isolinhas de altitude da região do arroio Taboão

No processo de interpolação, o elemento poderador foi o inverso da distância entre as amostras de altimetria. Estas amostras foram coletadas através da digitalização das isolinhas. Utilizando o "default" de coleta de amostras do Sistema de Informações Geográficas SGI, desenvolvido pelo INPE, foram coletadas uma amostra a cada 0,5 mm de digitalização, ou seja, em uma escala 1:50.000 tem-se uma amostra a cada 25 metros sobre a isolinha.

O método de busca utilizado é o dos n valores mais próximos por altitude por quadrante (Felgueiras et al., 1988), isto é, para cada célula a ser interpolada serão considerados dentro de cada quadrante em torno da célula os n valores de cada altitude mais próximos (figura V. 9).

Como resultado deste processo de interpolação, se obteve uma grade regular de altitudes de 139 linhas por 201 colunas, com uma resolução espacial de 100 x 100 metros (figura VII.5).

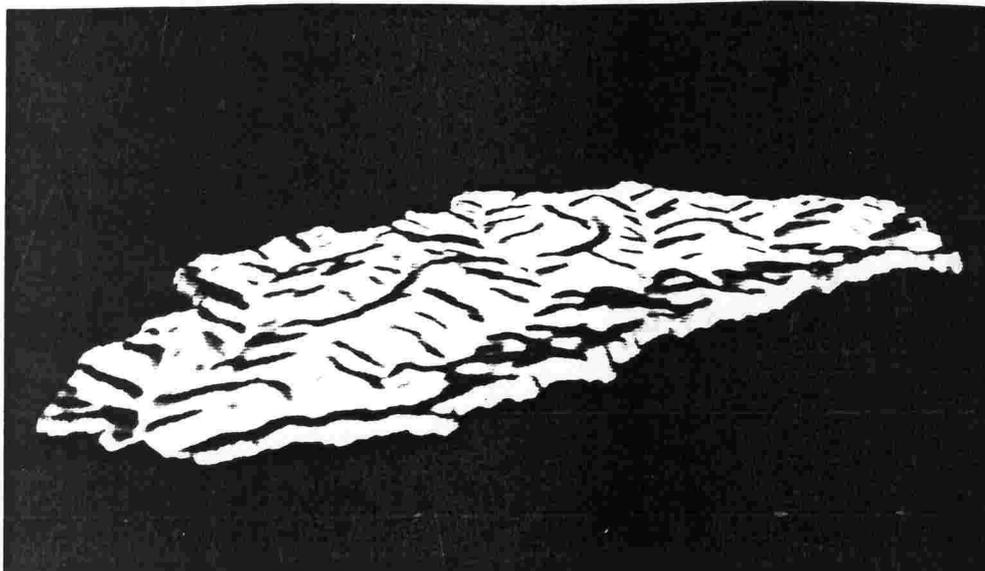


Fig. VII.5 - MNT da região de estudo (tridimensional)

7.2.4.2. Extração das Estruturas de Drenagem

A definição de comprimento de vertente até um ponto sobre a superfície de uma bacia hidrográfica, corresponde à distância média percorrida pela água sobre a superfície da bacia, desde o divisor de águas da bacia até o ponto em questão. Da mesma forma desejando-se conhecer o comprimento médio de vertente de uma bacia, basta estimar a distância média que a água percorre entre o divisor de águas e a rede de drenagem fluvial). Desta forma fica evidente que para a obtenção automática dos termos constituintes do fator (LS) da MUSLE, se faz necessária a existência de

informações referentes a localização da posição do divisor de águas da bacia assim como da rede de drenagem fluvial, para definir o início e o fim respectivamente dos caminhos supostamente percorridos pela água sobre o MNT.

Para esse fim, foram desenvolvidas uma série de rotinas que seguem as diretrizes dos algoritmos apresentados por *Mark (1984)* e *Mark et al. (1984)*, apresentados neste trabalho na seção 5.3.2 do Capítulo V.

As rotinas desenvolvidas, descritas e listadas no Apêndice A e B respectivamente são as seguintes:

- Suavização: tem por objetivo eliminar todas as depressões constituídas por uma célula, presentes no MNT. Estas depressões impedem o estabelecimento do fluxo de drenagem.
- Orientação: esta rotina atribui a cada célula do MNT o sentido em que a água deverá escoar através da sua superfície (aspecto). Caso a região seja plana, esta rotina considera a tendência das vertentes mais próximas (figura VII.6).
- Acumulação: uma vez determinada a orientação de cada célula do MNT, esta rotina percorre a grade de orientações, gerando uma nova grade, onde para cada célula, é atribuída um valor do acúmulo de água, expresso como uma função do número de células atravessadas pela água até chegar a célula em questão e a área de cada célula. As linhas de drenagem podem ser codificadas numa escala de cores ou níveis de cinza de acordo com o volume de água que passe sobre elas (figura VII.7).

- Divisão: determinando o exutório de uma bacia, manualmente ou através de critérios de área da bacia ou de ordem da rede de drenagem, esta rotina estima ocorrência de células do MNT que contribuam para a célula exutório.

Todas estas rotinas aqui apresentadas geram planos de informação em formato de grade, com a mesma resolução, número de linhas e número de colunas do MNT.

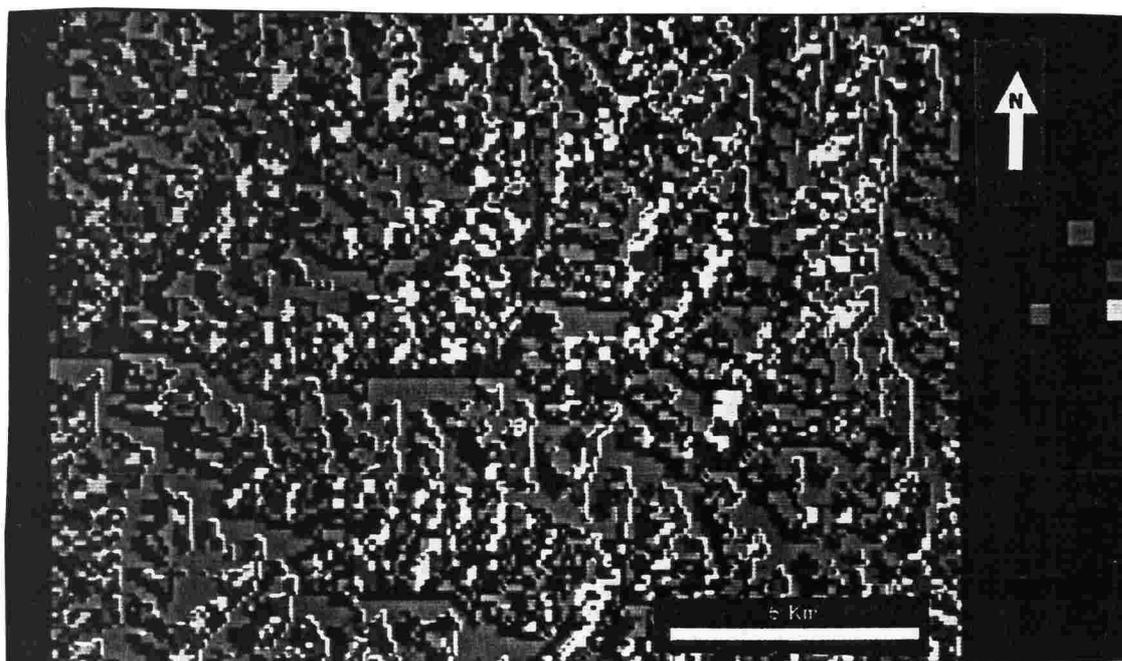


Fig. VII.6 - Plano de orientações (8 níveis) na região de estudo.

A saída da bacia do arroio Taboão foi definida manualmente, fornecendo assim a entrada para a rotina Divisão, isto é, linha e coluna da célula exutório (figura VII.8).

Utilizando o plano obtido a partir da rotina Acumulação, foram determinadas iterativamente, a posição (linha e coluna) das células correspondentes as saídas das bacias com áreas entre 1 e 2 Km² (Risso e Chevallier, 1991). Dessa forma, 26 bacias elementares distribuídas dentro da bacia do arroio Taboão, foram delimitadas pela rotina Divisão (figura. VII.8).

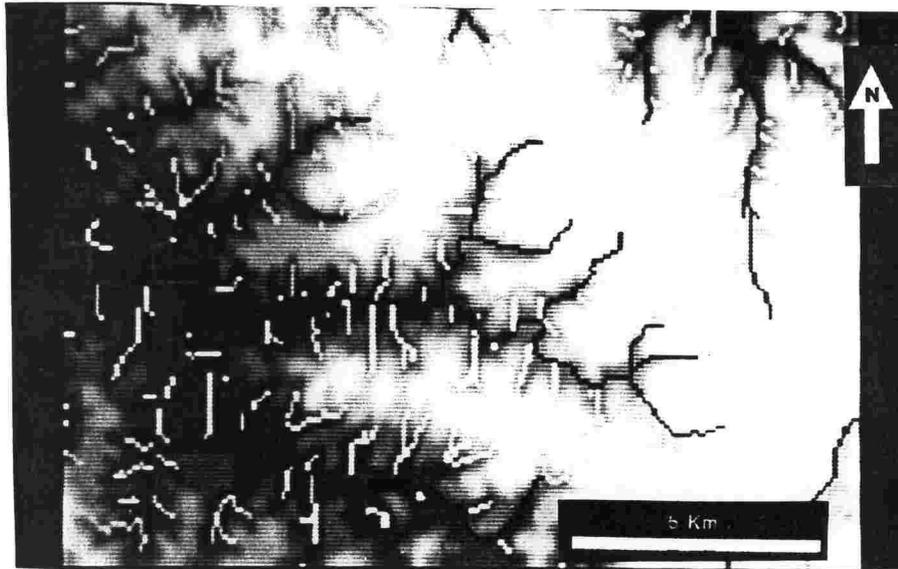


Fig. VII.7 - Plano de acúmulos fatiado em cores (rede de drenagem).

Da mesma forma, determinando iterativamente as saídas das bacias com áreas entre 15 e 20 Km², foram localizadas 3 sub-bacias da bacia do arroio Taboão (figura VII.8).

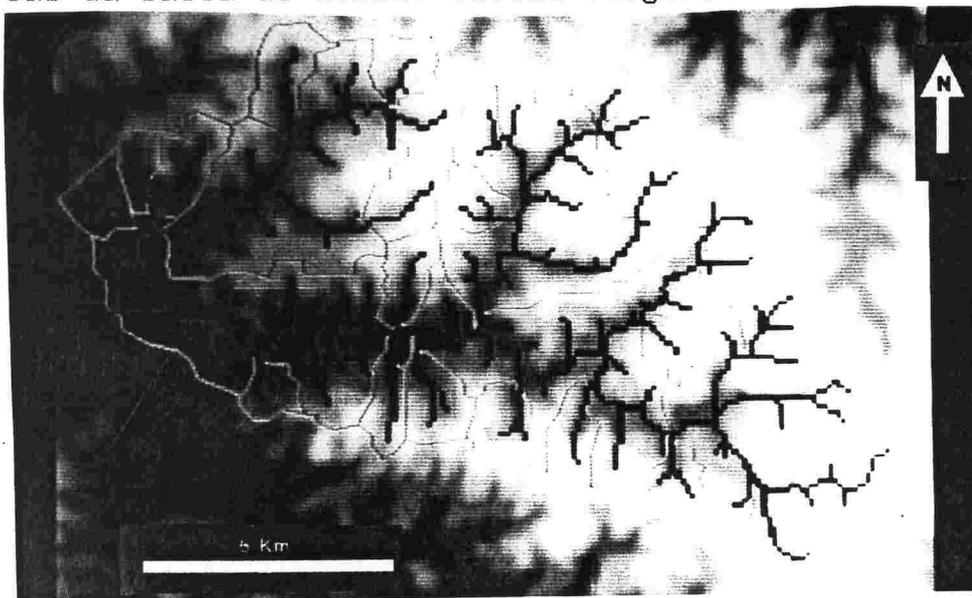


Fig. VII.8 - Determinação automática das bacias e da rede de drenagem.

7.2.4.3. Cálculo do Fator Topográfico (LS) de uma Bacia Utilizando MNT

Para o cálculo automático do fator topográfico (LS) de uma bacia ou um conjunto de bacias dentro de uma mesma base cartográfica, assim como também as suas declividades médias, os seus comprimento de vertente, as suas áreas e perímetros, entre outros fatores morfológicos, foi desenvolvida uma rotina denominada FATOP.

No caso de um conjunto de bacias, primeiramente localiza-se todas as bacias através da rotina DIVISÃO. Processando uma bacia de cada vez, rotina FATOP passa a percorrer todas as vertentes presentes em cada bacia.

Considera-se neste processo início da vertente, todas as células que não tem nenhum vizinho orientado em sua direção, isto é, que possuam vazão acumulada igual a zero e é considerada rede de drenagem fluvial àquelas células que recebam contribuição igual ou maior do que um patamar definido em função da resolução do MNT e das observações feitas pelo próprio analista. Este valor é estimado comparando diversos planos de acumulos fatiados, com dados cartográficos.

O plano de acumulos é representado por uma grade de números inteiros, onde o atributo de cada célula indica o número de células que lhe contribuem com escoamento. O fatiamento desse plano consiste em atribuir graficamente uma cor ou valor a diferentes intervalos de acumulo, permitindo visualizar a rede de drenagem (figura VII.7).

Através da análise de diversos fatiamentos do plano de acumulos, comparados a rede de drenagem cartograficamente definida, chegou-se a conclusão que a partir de um dado patamar

de fatiamento a rede de drenagem pouco muda. Para as características do MNT da bacia do arroio Taboão o patamar de fatiamento caracteriza-se por uma contribuição igual ou maior a quinze células, isto é, uma área de contribuição equivalente a 150.000 m².

O algoritmo para definição do fator $\langle LS \rangle$ está descrito na seção 5.4 do Capítulo V. Basicamente o algoritmo usado na rotina FATOP é uma inversão do algoritmo de *Mark et al. (1984)*, dessa forma se determina a declividade e o comprimento da vertente seguindo o caminho dado pela orientação de cada célula. Ao se chegar a rede de drenagem calcula-se a declividade média da vertente.

Desenvolvendo esse procedimento para todas as vertentes de cada bacia, pode-se então calcular as médias das declividades e dos comprimentos de vertentes de todas as bacias do conjunto.

Aplicando-se a metodologia acima citada, sobre o MNT correspondente geograficamente a superfície da bacia do arroio Taboão, foi possível, determinar os valores do comprimento de vertente médio da bacia $\langle x \rangle$ e declividade média da bacia $\langle s \rangle$ e do fator LS , assim como a área e o perímetro de um conjunto de 26 bacias elementares entre 1 e 2 Km², 3 sub-bacias entre 15 e 20 Km² e uma de aproximadamente 100 Km² (bacia do arroio Taboão). Esses resultados são apresentados na tabela VII.4.

Com a finalidade de comparar a metodologia proposta com a tradicional, descrita na seção 3.3 do Capítulo III (*Williams e Brendt, 1976*), foram calculados os valores x , s , e LS de 3 bacias, de 1, 20 e 100 Km², presentes na tabela VII.5.

Como se pode perceber a precisão dos valores de x está estritamente ligada a resolução do MNT, no caso 100 x 100 m. Provavelmente, com uma malha mais fina, se obterá um resultado mais preciso. No entanto, como o MNT deste trabalho foi gerado a partir de uma carta topográfica na escala 1:50.000 com equidistância vertical das curvas de nível de 20 m, é muito difícil alcançar um melhor resultado via interpolação.

Nota-se uma diferença importante entre os valores de x e conseqüentemente LS , obtidos pela rotina FATOP e pelo método de *Williams e Berndt (1976)* (capítulo III, p.22). O maior problema neste cálculo, na rotina FATOP, vem da resolução da malha, neste caso 100x100 metros. Em média os valores para o comprimento x obtidos, cabem em duas, três ou quatro células de 100x100 m. Isto implica em um erro sistemático de 50%, 33% ou 25% respectivamente para cada vertente. É claro que estes erros podem, eventualmente compensar-se, mas em geral como a média é estabelecida sobre valores discretos, os erros tendem a se acumular por excesso.

Por outro lado, quando a metodologia convencional desenvolvida por *Williams e Berndt (1976)* é aplicada, procede-se em um erro associado a generalização cartográfica de informações representadas em diferentes escalas, ou seja, a representação cartográfica da altimetria e da rede de drenagem (importantes para a determinação do fator LS) sofrem um maior ou menor grau de simplificação de acordo com a escala gráfica de representação destes dados.

Os erros sistemáticos associados as duas metodologias, explicam a grande diferença observada nas tabelas VII.4 e VII.5, quanto ao fator LS . Acredita-se que com uma malha mais fina 50x50 m ou 25x25 m, essa diferença deva diminuir.

Tabela VII.4 - Dados topográficos obtidos a partir de MNT

NOME -	AREA Km ²	PER. Km	x m	s %	LS -
B(1)	1,99	6,90	313	7,8	3,1
B(2)	1,45	4,98	325	8,2	3,3
B(3)	1,09	4,28	321	8,1	3,3
B(4)	1,77	5,60	344	7,5	3,0
B(5)	1,29	5,86	330	7,3	2,9
B(6)	1,20	4,44	307	8,5	3,4
B(7)	1,97	6,14	326	8,9	3,8
B(8)	1,93	6,35	353	7,6	3,1
B(9)	1,95	6,20	359	7,9	3,3
B(10)	1,00	5,44	321	10,2	4,6
B(11)	1,39	5,77	314	8,1	3,2
B(12) *	1,38	4,75	296	7,2	2,7
B(13)	2,00	5,95	400	7,4	3,2
B(14)	1,37	5,24	349	6,6	2,6
B(15)	1,62	5,90	331	8,3	3,4
B(16)	1,04	4,30	386	6,4	2,5
B(17)	2,00	5,70	319	6,7	2,4
B(18)	1,01	4,40	333	7,7	3,1
B(19)	1,40	5,82	306	6,5	2,4
B(20)	2,00	6,22	380	6,3	2,5
B(21)	2,00	6,10	391	6,0	2,4
B(22)	1,95	6,35	367	7,2	3,0
B(23)	1,65	5,92	396	6,6	2,7
B(24)	1,59	5,70	336	8,1	3,3
B(25)	2,00	8,06	386	5,9	2,3
B(26)	1,94	6,27	372	6,7	2,7
RINÇAO	20,0	21,6	346	7,3	2,9
TURCATO	19,3	20,3	337	7,4	2,9
MAMBUCA	18,7	21,4	359	6,6	3,7
TABOÃO	105,4	55,8	344	7,1	2,8

* Bacia do Donato

Tabela VII.5 - Resultados obtidos manualmente a partir do método de *Williams e Berndt*

NOME -	AREA Km ²	PER. Km	x m	s %	LS -
DONATO	1,29	4,72	140	5,5	1,3
TURCATO	19,4	19,8	280	5,5	1,8
TABOÃO	105,0	53,3	320	5,2	1,8

7.2.4.4. Cálculo do Fator Topográfico (LS) para cada célula de um MNT (Abordagem Não Pontual).

O cálculo do fator LS para cada célula de um MNT é feito a partir da rotina TOPOPONT. Esta rotina calcula a maior distância percorrida pela água, do divisor de águas até cada célula e a declividade média desta vertente. A partir destes dois parâmetros, atribui-se a cada célula do MNT o fator LS segundo a equação (III.7).

A rotina TOPOPONT funciona por operações de vizinhança. No caso deste trabalho utilizou-se uma janela de 3 x 3 células do MNT por operação, de maneira análoga a rotina FATOP. O resultado gerado pela rotina TOPOPONT é uma grade onde o atributo de cada célula é o fator LS . Os valores para LS na bacia do arroio Taboão variam entre 0 e 5,01.

Considerando-se os erros sistemáticos associados a resolução da malha do MNT, 100x100 m, e a forma de convencional de obtenção do fator LS , os quais produzem as diferenças de LS observadas nas tabelas VII.4 e VII.5 em aproximadamente 50%, decidiu-se, reduzir este fator à esta mesma ordem de grandeza (50%), na rotina TOPOPONT. A finalidade deste procedimento é uniformizar a ordem de grandeza do valor de LS , a fim de permitir que sejam feitas comparações dos valores estimados de produção de sedimentos perante valores estabelecidos de tolerância de perda de solos, apresentados por *Bertoni e Lombardi (1985)*, considerando que estes últimos normalmente são obtidos a partir de metodologias convencionais.

Desta forma os valores estimados para LS passam a variar entre 0 e 2,5.

Para melhor poder visualizar a distribuição espacial deste fator, gerou-se uma imagem com os valores de *LS* discretizados em cinco intervalos representados por cores distintas (figura VII.9).

As áreas da bacia correspondentes a cada intervalo são:

<i>LS</i> = 0,0 a 0,2	44,3 Km ²
<i>LS</i> = 0,2 a 0,5	13,3 Km ²
<i>LS</i> = 0,5 a 1,0	44,5 Km ²
<i>LS</i> = 1,0 a 1,5	3,99 Km ²
<i>LS</i> maior do que 1,5	0,28 Km ²

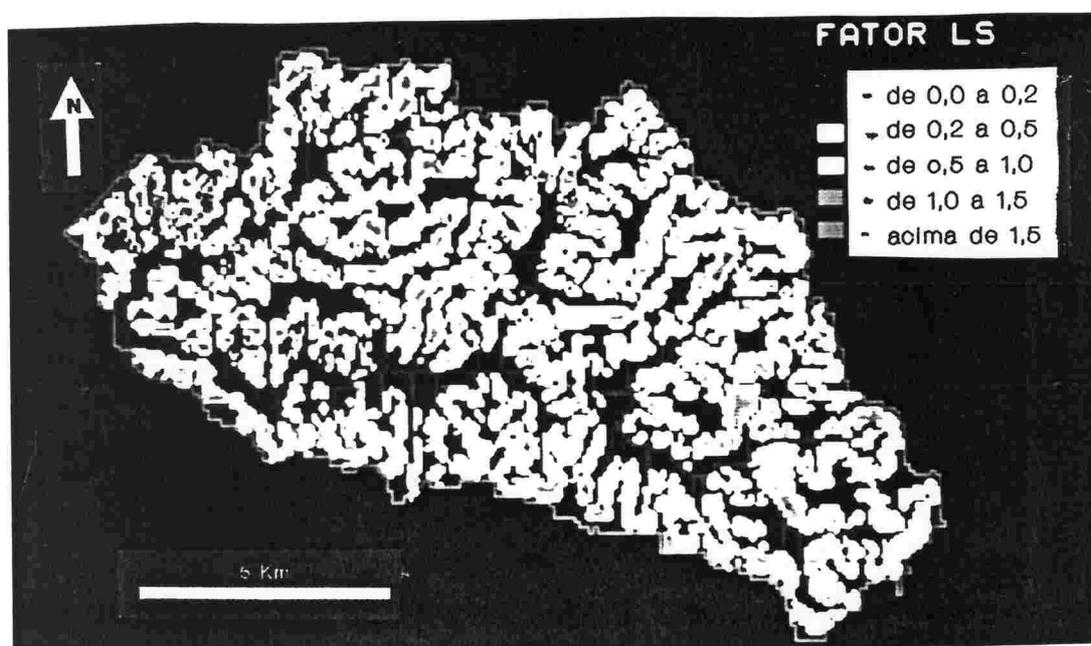


Fig. VII.9 - Plano do fator *LS* de Wischmeier.

7.2.5. Estimativa do Fator de Uso do Solo (CP)

A bacia hidrográfica do arroio Taboão situa-se na região fisiográfica do Planalto Médio, no Estado do Rio Grande do Sul. A partir de 1850, com a chegada dos imigrantes europeus a agricultura foi desenvolvida nesta região. Há aproximadamente 30 anos, a exploração vem sendo intensificada com o plantio da soja,

tendo nos tempos atuais uma agricultura totalmente mecanizada e o uso de pesticidas e fertilizantes difundido (Castro, 1992).

As principais culturas da região são a soja e o milho no verão e o trigo e a aveia no inverno. Em menor escala é também desenvolvida a pecuária na região.

Na maior parte da bacia, em geral os solos permanecem cobertos o ano inteiro seja com lavoura ou pastagem. O solo fica descoberto na época da colheita de uma safra e quase que imediatamente após já é plantada a próxima cultura, ficando pouco tempo sem cobertura (Castro, 1992). Também vem sendo difundida na região, por alguns agricultores, a prática do plantio direto, com a finalidade de minimizar a perda de solo em suas propriedades.

O plantio das culturas de verão (soja e milho) ocorre em novembro e a sua colheita em abril. As culturas de inverno (trigo e aveia) geralmente são plantadas em maio e colhidas em outubro.

A bacia do arroio Taboão não é totalmente rural. A cidade de Pejuçara localiza-se nesta bacia ocupando 1,3% da sua área. Na bacia do Turcato, sub-bacia do arroio Taboão com 19,3 Km², esta cidade ocupa aproximadamente 10% de sua área.

Neste trabalho o fator de cobertura do solo C foi calculado de duas formas: fator C anual (USLE) e fator C para um dado evento de chuva (MUSLE).

7.2.5.1. Estimativa do Fator C Anual (USLE)

Na primeira abordagem, estimou-se o fator C anual para as regiões de uso agrícola, conforme a metodologia apresentada por Bertoni e Lombardi (1985). Para isso se fez necessário a obtenção das seguintes informações:

- esquema de rotação e manejo das culturas de inverno e verão na região;
- razão de perdas de solo entre área cultivada e área continuamente descoberta;
- porcentagem do valor médio anual do índice de erosividade das chuvas que ocorre entre o dia 01 de junho e as datas indicadas, para a região de estudo.

O esquema de rotação e manejo das culturas na região da bacia do arroio Taboão é aproximadamente o seguinte:

- plantio de cereais (trigo e aveia) em início de junho;
- colheita de cereais a partir do início de novembro;
- preparo do solo para cultivo da soja e milho (aprox. 15 dias);
- plantio de soja e milho em início de dezembro;
- colheita de soja e milho a partir do início de maio;
- preparo do solo para o cultivo de cereais (aprox. 15 dias).

A metodologia apresentada por *Bertoni e Lombardi (1985)*, para fins práticos, divide o manejo dos cultivos em cinco períodos ou estádios de cultura, definidos de tal modo que os efeitos de cobertura e manejo possam ser considerados aproximadamente uniformes dentro de cada período:

- (a) período D - preparo do solo: desse preparo ao plantio;
- (b) período 1 - plantio: do plantio a um mês após o plantio;
- (c) período 2 - estabelecimento: do fim do período 1 até dois meses após o plantio;
- (d) período 3 - crescimento e maturação: de dois meses após o plantio até a colheita;
- (e) período 4 - resíduo: da colheita até o preparo do solo.

A razão de perdas de solo entre área cultivada e área continuamente descoberta para diferentes estádios de cultura de diferentes cultivos, foram obtidas em *Wischmeier e Smith (1979)*, *Mitchell et al. (1980)* e *Bertoni e Lombardi (1985)*.

A porcentagem do valor médio anual do índice de erosividade das chuvas que ocorre entre o dia 01 de junho e as datas indicadas, para a região da bacia do arroio Taboão, foi obtida a partir dos estudos de *Chevallier e Castro (1991)*, efetuados na bacia do Rio Potiribú, da qual o sistema do arroio Taboão faz parte (figura VII.10).

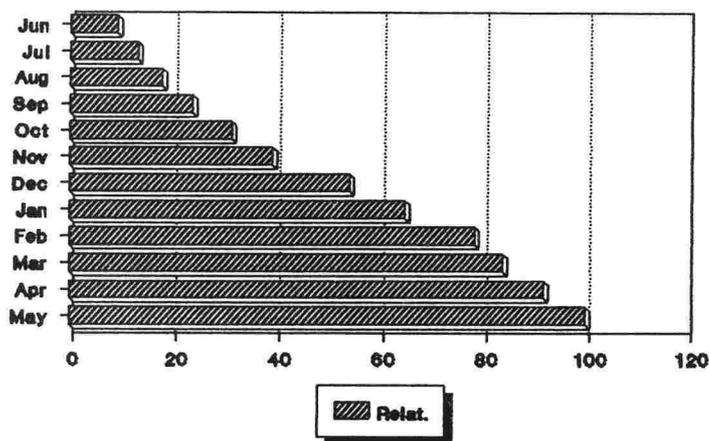


Fig. VII.10 - Porcentagem do índice de erosão anual das chuvas na bacia do arroio Taboão.

A estimativa do fator C anual para uso agrícola, segundo a metodologia proposta por *Bertoni e Lombardi (1985)* é apresentada na tabela VII.6. A coluna (1) representa os cultivos do período, devendo-se entender por cereais (trigo e aveia) e porsoja (soja e milho, este último em minoria). Os valores da coluna (3) são obtidos na figura VII.10. A coluna (5) indica a porcentagem do índice de erosão por período. Os valores são as diferenças

entre os valores sucessivos da coluna (3). O valor do fator *C* para cada período é obtido na coluna (7), multiplicando-se a coluna (5) pela coluna (6). Pela soma dos valores da coluna (7) se obtém o valor médio anual de *C* para uso agrícola.

Tabela VII.6 - Avaliação do valor de *C* anual para uso agrícola na bacia do arroio Taboão.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Cultivo	Data	Fator (<i>R</i>) Mensal Relat.	Est. da Cult.	Índice Erosão Período (%)	Razão Perda Solo (%)	Fator (<i>C</i>) Mensal
Cereal	01/06-01/07	9,1	1	9,12	0,30	0,027
	01/07-01/08	13,1	2	3,98	0,30	0,012
	01/08-01/11	31,4	3	18,25	0,25	0,046
	01/11-15/11	35,3	4	3,97	0,15	0,006
	15/11-01/12	39,3	D	3,97	0,35	0,014
Soja	01/12-01/01	54,2	1	14,88	0,30	0,045
	01/01-01/02	64,9	2	10,71	0,20	0,021
	01/02-01/05	91,9	3	26,99	0,20	0,054
	01/05-15/05	95,9	4	4,06	0,05	0,002
	15/05-01/06	100,0	D	4,07	0,35	0,014
Fator (<i>C</i>) Anual para Uso Agrícola: 0,241						

Para as outras coberturas existentes na bacia do arroio Taboão (área urbana, floresta e pastagem), foram utilizados valores de *C* sugeridos por *Wischmeier e Smith (1979)*, *Mitchell et al. (1980)*, *Sivertum et al. (1988)* e *IPT (1985 e 1991)*. Pode-se dizer que para estas coberturas o valor do fator *C* permanece constante durante todo o ano. A tabela VII.7 apresenta os valores de *C* para as coberturas da bacia do arroio Taboão.

Tabela VII.7 - Fator *C* anual para as diversas coberturas da
bacia do arroio Taboão.

Área urbana	$C = 0,030$
Floresta	$C = 0,001$
Pastagem	$C = 0,010$
Agricultura	$C = 0,241$

7.2.5.2. Estimativa dos Valores do Fator *C* para a MUSLE

Um dos objetivos deste trabalho é avaliar a produção de sedimentos na bacia do arroio Taboão, em uma condição em que a erosividade da chuva e o fator de cobertura do solo ponderado para todo o corpo da bacia sejam altos.

Ao se observar a figura VII.2 (p.112), é possível perceber que nos períodos em que se efetua o preparo do solo e o plantio os índices médio mensal de erosividade das chuvas é elevado com relação a média anual. Particularmente na época do plantio do trigo e aveia (maio-junho) pode-se perceber um pico nesse valores.

Castro (1992) executou duas campanhas de coleta de sedimentos na região de estudo em períodos que correspondem a época do plantio da soja. Estes valores foram comparados, como será visto mais adiante, com os resultados da metodologia aqui exposta.

Nestes períodos as classes de cobertura do solo existentes na região apresentam os fatores de cobertura apresentados na tabela VII.8. Estes valores foram atribuídos a partir dos valores sugeridos por *Wischmeier e Smith (1979)*, *Mitchell et al. (1980)*, *Sivertum et al. (1988)* e *IPT (1985 e 1991)*.

Tabela VII.8 - Fator C para o período maio-junho na bacia do arroio Taboão.

Área Urbana	$C = 0,030$
Floresta	$C = 0,001$
Pastagem	$C = 0,010$
Soja e Milho	$C = 0,200$
Resteva	$C = 0,050$
Solo Nú	$C = 1,000$

7.2.5.3. Estimativa do Fator de Práticas Conservacionistas P

A prática conservacionista mais utilizada na região é o terraceamento. Estes terraços em geral são de base estreita e compostos de duas partes: um canal de seção convexa funcionando tanto na retenção como no escoamento da água da chuva e um camalhão de seção côncava, que serve como barreira para a água que escoar no canal não passar para o terraço seguinte (Castro, 1992).

Em geral os terraços tem 2 metros de distância entre a primeira e última fileira de cultivo e 20 metros entre um terraço e outro, variando de acordo com a declividade do terreno, com uma declividade da vertente de aproximadamente 15%. Os canais tem uma declividade de 1 a 3 %.

A manutenção dos terraços é feita normalmente a cada ano. Após a colheita é geralmente feita uma lavração e a semeadura da próxima cultura.

Os terraços desta região geralmente desaguam nas estradas ou no limite das terras vizinhas em sulcos que podem gerar profundas voçorocas.

Segundo *Wishmeier e Smith (1979)*, para regiões terraceadas deve-se considerar o fator P igual a 0,5. Este fator deve ser multiplicado pelo fator de cobertura C nas regiões com cobertura agrícola, obtendo-se assim o fator de uso do solo CP . Nas áreas com outras coberturas o valor de P é unitário. O valor de CP anual para as áreas cultivadas é 0,121. Para a abordagem da MUSLE (para um evento de chuva) os valores de CP obtidos estão apresentados na tabela VII.9.

Tabela VII.9 - Fator CP para o uso do solo na bacia do arroio Taboão no período maio-junho.

Área Urbana	$CP = 0,030$
Pastagem	$CP = 0,010$
Floresta	$CP = 0,001$
Resteva	$CP = 0,025$
Soja e Milho	$CP = 0,100$
Solo Nú	$CP = 0,500$

7.2.5.4. Mapeamento do Fator CP

Neste trabalho foram obtidos dois mapas temáticos do fator CP , uma anual (USLE) e outro para um evento de chuva (MUSLE). Para ambos casos foram utilizados os dados obtidos através da classificação de uma imagem orbital LANDSAT TM, bandas 3, 4 e 5. A imagem disponível para este trabalho, identifica-se pela órbita 223 ponto 80 quadrante B, que cobre geograficamente uma área de $92,5 \times 92,5 \text{ Km}^2$, na qual a região de estudo está situada (figura VII.11). Foram escolhidas as bandas espectrais 3, 4 e 5, por serem as que melhor discriminam a cobertura do solo.

A data de passagem do satélite é 20 de abril de 1989, época em que se procedeu a colheita da soja.

O mapeamento do fator *CP*, foi obtido a partir da geração de uma imagem temática da cobertura do solo da área estudada. Para a geração dessa imagem temática, foram utilizadas técnicas de Sensoriamento Remoto para o pré-processamento, processamento e classificação da imagem original.

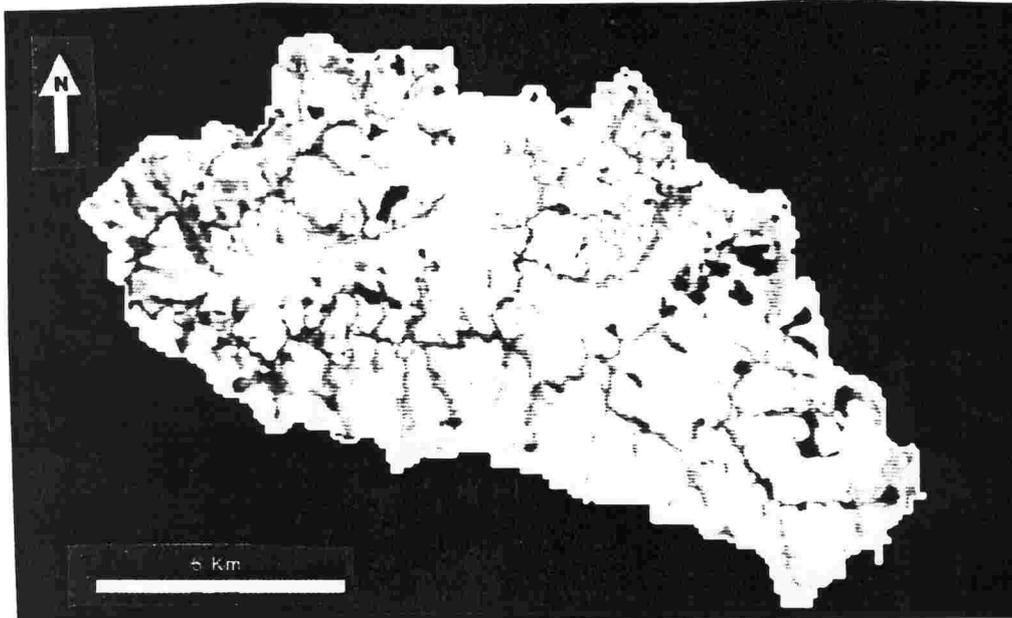


Fig. VII.11 - Imagem do uso do solo da bacia do arroio Taboão na banda 3 do satélite LANDSAT TM.

As técnicas de pré-processamento aplicadas aos dados obtidos pelo satélite LANDSAT TM, foram técnicas para o registro das imagens referentes as bandas 3, 4 e 5 com a base cartográfica. Em outras palavras, através das rotinas de registro do sistema SITIM-150, efetuou-se a correção da geometria da imagem, permitindo que esta fica-se referenciada a uma base.

Para a execução do registro de imagem foram fornecidos 9 pontos de controle, identificáveis tanto na imagem como na base cartográfica, às rotinas de modelagem matemática polinomial para correção geométrica do sistema SITIM-150.

Uma vez estimados os parâmetros do modelo de registro, aplicou-se um algoritmo de interpolação bilinear, para a geração da imagem corrigida, a partir da original, em formato varredura.

O processo de registro acima, foi aplicado a todas as três bandas espectrais utilizadas.

Com a finalidade de homogenizar a variação presente dentro dos agrupamentos relativos as possíveis classes espectrais, aplicou-se uma filtro passa-baixas a cada uma das bandas espectrais da imagem.

Através de visitas a campo, e em função da escala de trabalho, 1:50.000, foram definidas seis classes de cobertura do solo: área urbana, floresta, pastagem, resteva, área com cultivo (soja e milho) e solo nú.

A partir de fotografias aéreas de baixa altitude (figura VII.12 e figura VII.13) em confronto com a imagem LANDSAT TM, foram definidas as áreas de treinamento, ou seja, as áreas na imagem das quais foram extraídas amostras de cada classe para a implementação do algoritmo de classificação.



Figura VII.12 - Foto aérea sobre a bacia do arroio Taboão.



Fig. VII.13 - Foto aérea sobre a bacia do arroio Taboão, para a obtenção de amostras para classificação da cobertura do solo.

Para a classificação da cobertura do solo da bacia do arroio Taboão, foi aplicado o classificador por Mínima Distância. A figura VII.14 apresenta imagem temática resultante.

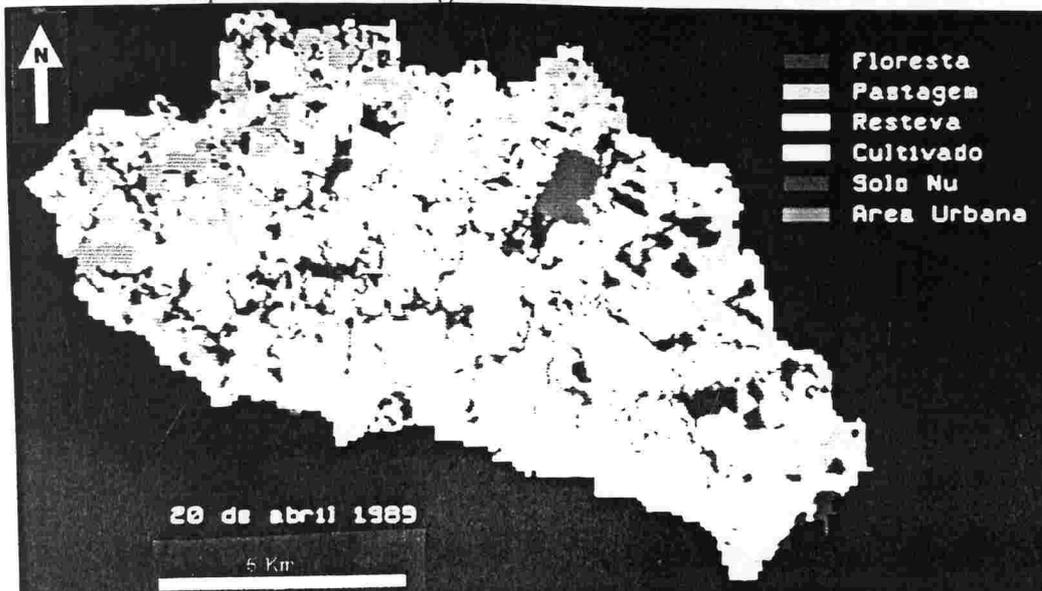


Fig. VII.14 - Imagem temática da cobertura do solo da bacia do arroio Taboão (abr/89).

A imagem temática apresentada na figura VII.14, é válida somente para estudos efetuados em um intervalo de tempo próximo a data de imageamento do satélite. As áreas estimadas de cada classe de cobertura são:

Floresta	10,3 Km ²
Pastagem	32,5 Km ²
Resteva	33,1 Km ²
Cultivado	19,9 Km ²
Solo Nú	8,1 Km ²
Área Urbana	1,4 Km ²

Para a geração de uma imagem temática da cobertura anual da bacia, foram fundidas as classes: resteva, solo nú e área com cultivo, em uma só classe: área agrícola. A figura VII.15, apresenta a imagem temática, com quatro classes de cobertura do solo anual, da área de estudo.

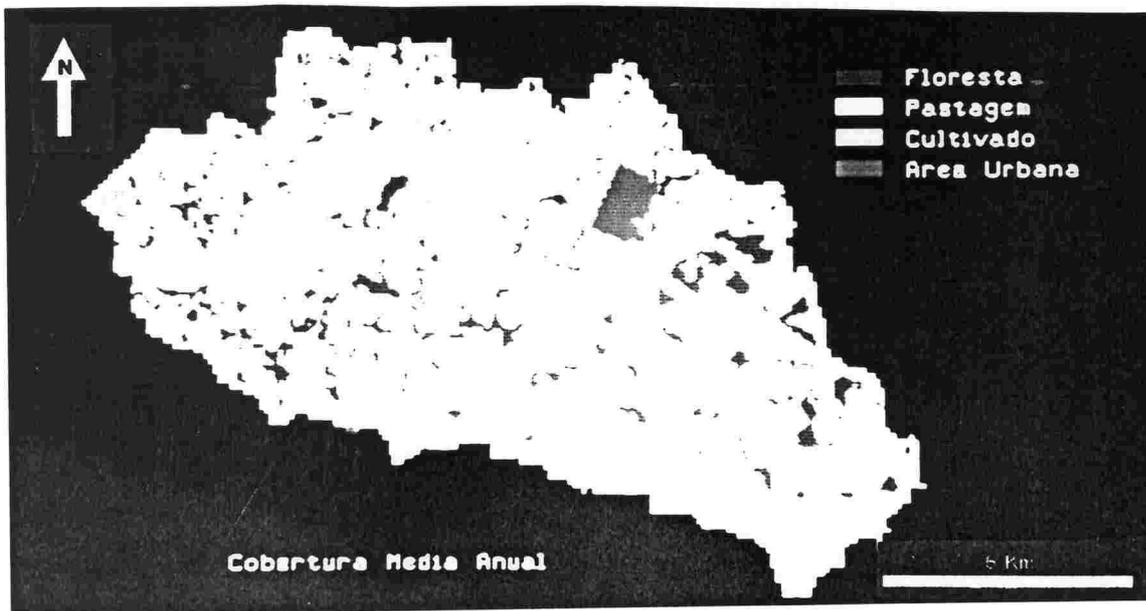


Fig. VII.15 - Imagem temática da cobertura do solo anual da bacia do arroio Taboão

A fusão de classes foi executada pela rotina Reclassificar por Classes do módulo Manipulação do sistema SGI. Para cada classe de cobertura média do solo anual, foram estimadas as seguintes áreas:

Área Agrícola	61,2 Km ²
Floresta	10,3 Km ²
Pastagem	32,5 Km ²
Área Urbana	1,4 Km ²

7.3. Análise da Produção de Sedimentos Para um Modelo Distribuído por Bacia (Modelo Cacho de Uva)

A análise da produção de sedimentos a partir de um modelo distribuído por sub-bacia (modelo cacho de uva), visa principalmente agrupá-las de acordo com as suas características fixas e mutáveis que mais condicionam o escoamento hídrico superficial e a produção de sedimentos. Estas características estão aqui representadas pelos fatores da USLE/MUSLE.

Neste enfoque são analisados três distintos grupos de bacias quanto a área:

- bacias elementares 1 a 2 Km²;
- sub-bacias de 15 a 20 Km²;
- bacia do arroio Taboão.

Com a escolha de três intervalos diferentes de área, verificou-se o comportamento da USLE quanto a homogeneidade na estimativa dos seus parâmetros em diferentes escalas de bacias.

A localização dos exutórios das bacias elementares e sub-bacias é realizada automaticamente a partir da rotina ACAB. Como entrada, deve-se fornecer a esta rotina os limites inferior

e superior de área. De posse destes dois valores, primeiramente o algoritmo marca todas as células do plano gerado pela rotina ACUMULAÇÃO que possuam um valor igual ou superior ao limite inferior de área. Uma vez determinados esses pontos, o algoritmo segue recursivamente através das células marcadas, e de posse da orientação e o valor do acúmulo dessas células, localiza aquelas que possuam um valor igual ou imediatamente inferior ao limite superior de área. Na posição (linha, coluna) destas células é onde se localizam os exutórios das bacias.

Utilizando a posição das células exutório como entrada da rotina DIVISÃO, pode-se delimitar as bacias que fazem parte do modelo "cachos de uva".

A ponderação dos parâmetros K e CP para cada bacia célula do modelo, também é feita automaticamente. Para isso foram desenvolvidas duas rotinas.

A rotina CRUZAREA, encarrega-se de contar, para um dos fatores da USLE (CP ou K), quantas células de cada classe existem dentro de cada bacia do modelo.

Na rotina PONDER, entra-se com os valores do fator para cada classe e executa-se a sua ponderação pela área de cada bacia. Nestas rotinas os planos de informação cruzados são os correspondentes ao fator de interesse (CP ou K) e o plano com o conjunto de bacias.

Tendo-se ponderado pela área de cada bacia os fatores CP e K , calculado o fator LS de cada uma através da rotina FATOP, e sabendo-se a erosividade das chuvas da região R , basta multiplicar todos estes fatores da USLE e temos uma estimativa quantitativa da produção de sedimentos de cada bacia do modelo.

7.3.1. Produção de Sedimentos nas Bacias Hidrográficas Elementares (1 a 2 Km²)

Dentro do sistema hidrológico da bacia do arroio Taboão foram localizadas 26 bacias elementares (1 a 2 Km² - figura VII.16). A tabela VII.10 apresenta os fatores da USLE ponderados pela área de cada bacia elementar. O valor estimado para produção de sedimentos (através das rotinas já citadas), representa a produção anual em toneladas por hectare de cada bacia.

Tabela VII.10. Análise de Produção de Sedimentos (bacias de 1 a 2 Km²)

Bacia	CP	K	LS	R	A (t/ha/a)
1	0,076	0,130	1,56	504	7,77
2	0,056	0,130	1,67	504	6,11
3	0,049	0,131	1,63	504	5,26
4	0,078	0,138	1,52	504	8,22
5	0,057	0,147	1,44	504	6,08
6	0,082	0,140	1,70	504	9,84
7	0,082	0,136	1,90	504	10,68
8	0,060	0,151	1,57	504	7,15
9	0,073	0,139	1,66	504	8,47
10	0,089	0,240	2,31	504	24,82
11	0,089	0,158	1,62	504	11,48
12*	0,098	0,144	1,34	504	9,50
13	0,081	0,159	1,62	504	10,52
14	0,045	0,148	1,30	504	4,35
15	0,080	0,134	1,71	504	9,21
16	0,085	0,131	1,24	504	6,96
17	0,064	0,149	1,24	504	5,96
18	0,089	0,166	1,54	504	11,47
19	0,047	0,154	1,99	504	4,34
20	0,069	0,144	1,26	504	6,29

* Donato

continua ...

...continuação

Bacia	CP	K	LS	R	A (t/ha/a)
21	0,076	0,164	1,21	504	7,57
22	0,042	0,152	1,49	504	4,80
23	0,086	0,142	1,37	504	8,43
24	0,088	0,115	1,67	504	8,49
25	0,060	0,162	1,17	504	5,73
26	0,075	0,139	1,36	504	7,15
média	0,070	0,150	1,51	504	8,33

São consideradas bacias elementares as bacias hidrográficas com áreas entre 1 e 2 Km², por ser este o menor intervalo de área, onde normalmente começa-se a observar a ocorrência de todos os processos hidrossedimentológicos. Por serem bacias com áreas pequenas são de fácil monitoramento no estudo da erosão superficial.

Os valores estimados para o fator *LS*, são os mesmos estimados pela rotina FATOP e apresentados na tabela VII.4 (p.129). No entanto estes valores sofreram uma redução de 50% em sua ordem de grandeza, em função das considerações já feitas (p.128), relativas aos erros sistemáticos observados na metodologia expressa pela rotina FATOP e na metodologia convencional. Como já foi dito, a finalidade deste procedimento é uniformizar a ordem de grandeza do valor de *LS*, a fim de permitir que sejam feitas comparações dos valores estimados de produção de sedimentos perante valores estabelecidos de tolerância de perda de solos, considerando que estes últimos normalmente são obtidos a partir de metodologias convencionais.

Os fatores *K* e *LS* são considerados ao longo do tempo, tanto a tabela VII.11 como os gráficos da figura VII.17 revelam que o

↓
107

comportamento do fator K é homogêneo para a maioria das bacias elementares caracterizando uma predominância de solos do tipo latossólico e terra roxa, cujos fatores K se assemelham. O fator LS também revela-se homogêneo na região. Isto destaca uma malha geomorfológica homogênea e representativa da região.



Fig. VII.16 - Localização espacial das bacias elementares.

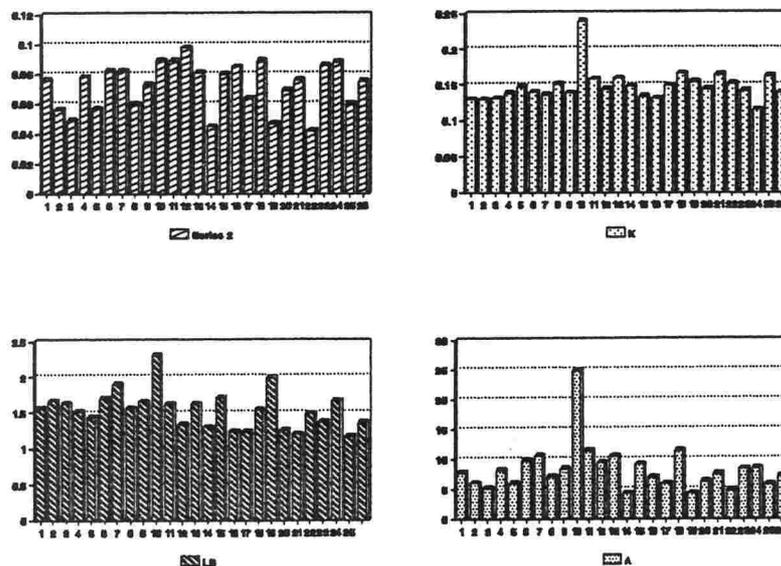


Fig. VII.17 - Gráficos do comportamento de cada fator e da produção de sedimentos em cada bacia elementar

Pode-se observar que a região correspondente a bacia B 10 apresenta uma certa discrepância do conjunto. Isso se deve, à presença predominante de solo litólico, pouco freqüente nas outras bacias elementares e cujo valor para o fator K é elevado ($K=0,51$), visto que são solos que apresentam uma textura e estrutura granular fracamente desenvolvidos, e as grandes declividades identificadas no MNT.

Os valores obtidos para o fator combinado de cobertura CP refletem o uso agrícola intenso praticado na região. As bacias B 3, B 19, e B 22 apresentam os baixos índices de CP por serem cobertas em sua maior parte por pastagem e a bacia B 14 tem baixo CP devido a presença de mata de porte (floresta).

Considerando que o solo característico da região seja do tipo latossólico e terra roxa, pode-se dizer que a tolerância de perda de solos média para a região é na ordem de 12,3 t/ha/ano, conforme os valores de tolerância de perda para solos paulistas estimados por *Bertoni e Lombardi (1985)*.

Assim sendo, se for considerado que a uniformização da ordem de grandeza do fator LS , para a comparação entre valores estimados de produção de sedimentos obtidos pela metodologia exposta nesta pesquisa e os valores de tolerância de perda de solos, determinados provavelmente segundo o método tradicional apresentado por *Williams e Berndt (1976)*, esteja correta tem-se que: somente 4% das bacias elementares (bacia B 10) apresenta uma produção de sedimentos de 100% acima do tolerado, perto de 15% das bacias elementares apresentam uma produção de sedimentos de aproximadamente 80% do valor de tolerância, sendo elas as bacias B 7, B 11, B 12 e B 13 com 88%, 95%, 79% e 87% do tolerado respectivamente e 81% das bacias elementares apresentam um valor para produção de sedimentos abaixo de 80% do valor tolerado.

Em uma primeira abordagem, é aconselhável que os resultados acima obtidos, sejam utilizados para comparações qualitativas, a fim de avaliar a regionalização da função de produção de sedimentos. Para proceder a uma análise quantitativa é necessário que se estabeleçam mais estudos comparativos entre a metodologia apresentada neste trabalho (geoprocessamento), a metodologia convencional de *Williams e Berndt (1976)* e valores de perda de solos medidos em campo.

7.3.2. Produção de Sedimentos em Bacias Hidrográficas entre 15 e 20 Km²

Da mesma forma que foram estimados os fatores da USLE para as bacias elementares e a sua perda de solo anual, estes valores foram estimadas para três sub-bacias entre 15 e 20 Km² pertencentes a bacia do arroio Taboão (figura VII.18).

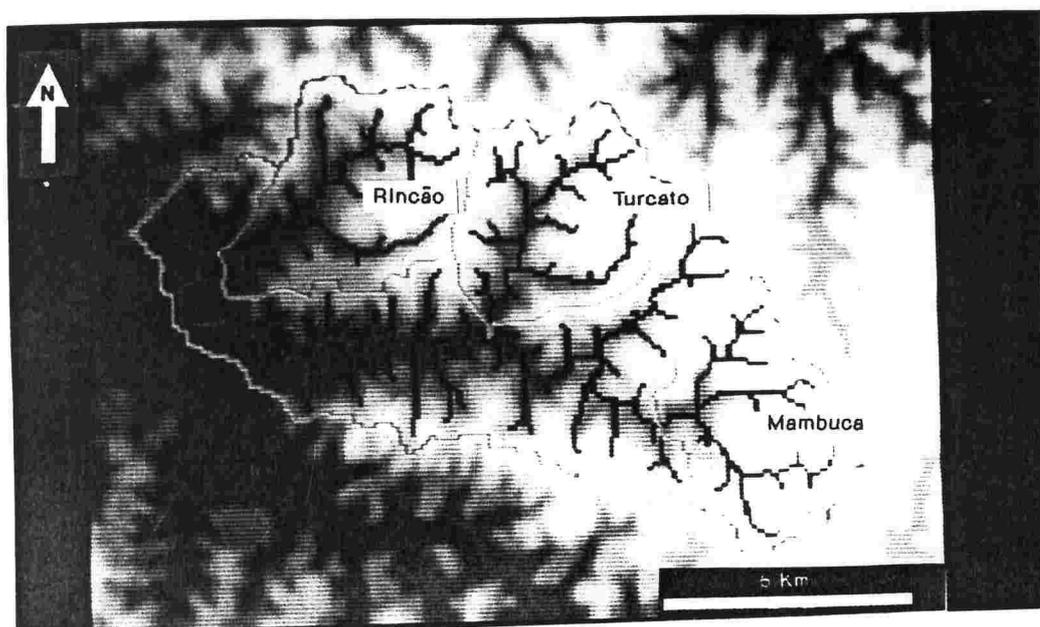


Fig. VI.18 - Localização das sub-bacias entre 15 e 20 Km².

A tabela VII.11 apresenta os valores estimados para cada um dos fatores da USLE em cada bacia. Como se pode ver a homogeneidade dos fatores é bem mais acentuada.

O fator *LS* foi reduzido em 50%, por razões já expressas anteriormente (7.3.1.)

Tabela VII.11 - Análise da produção de sedimentos.
(bacias de 15 a 20 Km²)

Bacia	CP	K	LS	R	A (t/ha/a)
Rincao	0,075	0,135	1,46	504	7,45
Turcato	0,077	0,134	1,48	504	7,70
Mambuca	0,072	0,145	1,11	504	5,84
média	0,075	0,138	1,35	504	7,00

Novamente o fator *K* caracteriza, a predominância de solos do tipo latossólico e terra roxa. O fator *LS* é menor para as bacias de 15 a 20 Km², pois estas possuem mais área com baixas declividades.

Os valores de *CP*, continua refletindo e de forma mais forte, o intenso uso agrícola praticado na região. A homogeneidade do fator de cobertura *CP* é mais forte em bacias maiores, pois quanto maior a área maior a variação de classes.

Novamente, se for considerado que a uniformização da ordem de grandeza do fator *LS* esteja correta, tem-se que todas as sub-bacias entre 15 e 20 Km² apresentam uma produção de sedimentos abaixo de 65% do valor de tolerância de perda de solos estabelecido para a região.

Mais uma vez é recomendado que em uma primeira abordagem estes resultados sejam utilizados somente para análises qualitativas, para avaliação da regionalização da função de produção de sedimentos.

7.3.3. Produção de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Arroio Taboão (100 Km²)

Para a bacia hidrográfica do arroio Taboão também foram calculados os parâmetros médios da USLE, conforme tabela VII. 12:

Tabela VII.12 - Análise da produção de sedimentos.
(bacia do arroio Taboão - 105 Km²)

Bacia	CP	K	LS	R	A (t/ha/a)
Taboão	0,074	0,142	1,42	504	7,50

A ordem de grandeza do fator *LS* estimado pela rotina FATOP está reduzida em 50%, por razões já expressas nos itens 7.3.1. e 7.3.2..

A partir destes valores pode-se caracterizar a bacia do arroio Taboão, como sendo uma bacia com intenso uso agrícola, em função do valor de *CP*, com predominância de solos latossólicos e terra roxa.

Quanto a produção de sedimentos, a bacia do arroio taboão produz aproximadamente 60% abaixo do tolerado, para o tipo de solos que predominam na região.

É interessante perceber, que apesar das escalas distintas (2, 20 e 100 Km²), ocorreu uma homogenidade nas estimativas de cada parâmetro, principalmente entre as bacias de 20 e 100 Km². Isto fortalece a definição da bacia do arroio Taboão, como bacia piloto para a avaliação do comportamento hidrossedimentológico da região. Deve-se no entanto observar, que isto unicamente é válido, se e somente se, a uniformização dos valores estimados para o fator *LS* esteja correta.

7.4. Análise da Produção de Sedimentos para um dado Evento de Chuva

A finalidade desta seção, é comparar as ordens de grandeza dos valores de perda de solo estimados por esta metodologia utilizando a MUSLE com a ordem de grandeza dos valores obtidos a partir de medições de concentração de sedimentos feitas em duas das bacias do sistema Taboão. Não se pretende com a comparação com somente dois valores validar o modelo, mas apreciar o quão próximo da realidade física do evento está o valor estimado.

Os dois eventos analisados foram medidos por *Castro (1992)*, nas bacias do Turcato, entre 04 e 06 de junho de 1991 e Donato, entre 17 e 60 de julho de 1991.

Para a bacia do Turcato, com 19,3 Km² de área foi medida uma produção de sedimentos de 0,15 t/ha. O volume escoado superficialmente medido foi de 245.600 m³ e a vazão de pico 5,81 m³/s.

Utilizando a equação (III.13) desenvolvida por *Williams (1975 e 1977)* temos:

$$\begin{array}{ll} Q = 245.600 \text{ m}^3 & CP = 0,087 \\ q_p = 5,81 \text{ m}^3/\text{s} & K = 0,134 \\ & LS = 1,46 \end{array}$$

A estimativa de produção de sedimentos pela MUSLE é:

$$A = 569,2 \text{ t ou } 0,29 \text{ t/ha}$$

Para a bacia do Donato, com $1,38 \text{ Km}^2$ de área foi medida uma produção de sedimentos de $0,38 \text{ t/ha}$. O volume escoado superficialmente medido foi de 12.850 m^3 e a vazão de pico $1,73 \text{ m}^3/\text{s}$.

Utilizando a equação (III.13) temos:

$$\begin{array}{ll} Q = 12.850 \text{ m}^3 & CP = 0,089 \\ q_p = 1,73 \text{ m}^3/\text{s} & K = 0,144 \\ & LS = 1,34 \end{array}$$

A estimativa de produção de sedimentos pela MUSLE é:

$$A = 55,1 \text{ t ou } 0,40 \text{ t/ha}$$

O fator CP foi estimado em 1989, enquanto que as medidas de campo foram feitas em 1991, no entanto, as condições de cobertura eram semelhantes.

Embora tenham sido feitas só duas comparações e exista o problema da data da estimativa do fator CP , pode-se notar que a ordem de grandeza do valor estimado é consistente.

Seria de esperar que quanto menor a bacia mais próximos fossem os valores de perda de solo entre estimado e medido, visto que a MUSLE da forma em que está sendo manipulada não leva em conta a deposição de sedimento, mas somente a erosão. Quanto maior a bacia maior será a deposição de sedimentos em sua superfície. Por outro lado quanto menor a bacia, maior será o erro na avaliação dos parâmetros ligados ao tamanho das células do MNT. É recomendável a elaboração de um estudo posterior, para definição do tamanho máximo aceitável para a célula de um MNT, em função da área de uma bacia hidrográfica.

7.5. Análise da Produção de Sedimentos Para um Modelo de Fontes Não Pontuais

Uma outra abordagem na análise do comportamento hidrossedimentológico da região é a Modelagem de Fontes Não Pontuais.

Neste tipo de análise, a base para a aplicação da modelagem é uma malha regular, onde para cada célula da malha se estima os parâmetros de interesse. Desta forma não será mais uma bacia elementar, como no modelo "cacho de uva", o elemento fundamental, mas a célula de uma malha regular.

Este tipo de abordagem tem a vantagem de permitir uma maior sensibilidade na percepção da distribuição espacial do fenômeno estudado.

A malha fundamental deste trabalho, foi dimensionada a partir do MNT da área da bacia do arroio Taboão. Trata-se de uma malha de 139 linhas por 201 colunas, com uma resolução geométrica de 100x100 metros. As suas coordenadas envolventes na projeção UTM (Universal Transversal de Mercator) são:

- coord. X mín.= 228.000 m coord. X máx.= 248.000 m
- coord. Y mín. = 6.844.204 m coord. Y máx.= 6.858.003 m

Todas as malhas manipuladas neste trabalho foram geradas no formato grade do sistema SGI/INPE. No entanto nada impede que estas sejam manipuladas em um outro SIG (desde que se saiba a arquitetura dos arquivos grade do SIG de interesse).

Para cada parâmetro da USLE/MUSLE, com exceção dos fatores climáticos (R ou a expressão para escoamento superficial), foram estimadas malhas com as mesmas características geométricas da malha do MNT.

O fator *LS* foi estimado diretamente a partir do MNT, como já foi demonstrado na seção 7.2.4. deste capítulo (figura VII.9).

A obtenção da malha para o fator *K* deu-se da seguinte forma. Uma vez digitalizado o mapa de solos este sofreu uma transformação de para o formato, de vetorial para varredura, no sistema SGI/INPE. A imagem temática resultante possui pixels com uma resolução de 30 x 30 metros. Nas imagens temáticas geradas no sistema SGI/INPE, cada pixel possui por atributo de classe um valor, que varia em um intervalo entre 0 e 127.

Para a obtenção de um arquivo no formato grade, onde cada célula é representada por um número real, primeiramente converteu-se a resolução da imagem do mapa de solos, para que esta fica-se com a mesma resolução e numero de linhas e colunas da malha do modelo. Esta conversão foi processada no sistema SGI/INPE, através da rotina CONVERSAO DE RESOLUCAO no módulo CONVERSAO.

Após a conversão de resolução, executa-se a transformação da imagem em grade (ou malha). Através da rotina IMAGRAD, desenvolvida neste trabalho, a imagem é lida e é gerado um arquivo ASCII no qual é atachado para cada classe o valor do coeficiente de erodibilidade. Feito isso, o sistema SGI/INPE lê o arquivo ASCII e gera a grade do fator *K*.

Para o fator *CP* o princípio é o mesmo. A partir de uma imagem temática gerada no sistema SITIM-150/INPE, que tem o mesmo formato das imagens temáticas do sistema SGI/INPE, é gerada uma grade para fator *CP*.

Basta então operar matematicamente célula a célula das malhas, para estimar a produção de sedimentos média anual, por exemplo. Para isso, foram utilizadas as rotinas do SGI/INPE;

OPERAR GRADE e COMBINAR GRADES. A primeira rotina, permite gerar uma nova grade, a partir de operações aritméticas sobre cada ponto da grade regular. A rotina COMBINAR GRADES gera uma nova grade, a partir de operações aritméticas poderadas entre duas grades.

Dessa forma, combinando as grades dos fatores *LS*, *CP* e *K*, foi gerada uma grade intermediária que uma vez multiplicada pelo valor de *R* para a região obteve-se a grade representativa da produção anual média de sedimentos da bacia do arroio Taboão.

A grade da produção anual média de sedimentos da bacia do arroio Taboão, está representada em seis intervalos discretos, em cores distintas, para melhor visualização na figura VII.19.



Fig. VII.19 - Malha da produção média anual de sedimentos na bacia do arroio Taboão.

7.6. Mapeamento de Áreas Críticas em Confronto com o Mapa de Tolerância de Perda dos Solos da Região

O mapeamento das áreas críticas, quanto a perda de solos na região da bacia do arroio Taboão, foi feito através do confronto entre a grade da produção média anual de sedimentos e a grade de tolerância a perda de solos da região.

A grade de tolerância a perda de solos, foi gerada da mesma forma com que se gerou a grade do fator K . No entanto, em vez de atribuir a cada célula da malha o valor da erodibilidade do solo, atribuiu-se os limites de tolerância a perda de solos, definidos por *Bertoni e Lombardi (1985)* para os solos de São Paulo. A figura VII.20, apresenta o mapa de tolerância a perda de solos em quatro intervalos discretos nas unidades t/ha/ano.

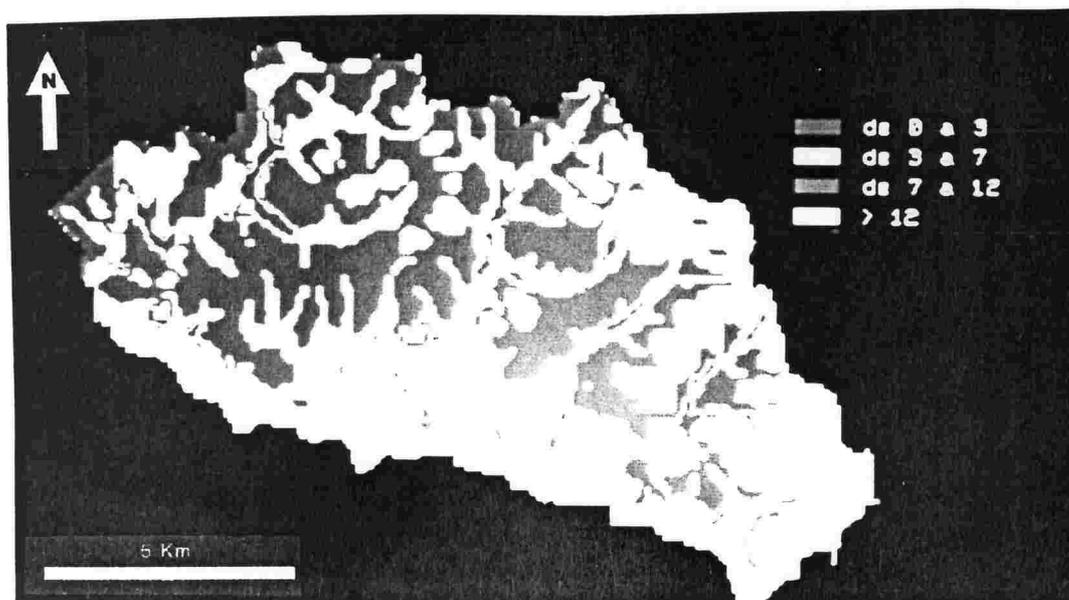


Fig. VII.20 - Malha da tolerância a perda de solos da bacia do arroio Taboão.

As estimativa de áreas críticas, foi feita simplesmente subtraindo-se a grade de tolerância da grade de produção de sedimentos. A partir desta operação estimou-se que

aproximadamente 77% da área da bacia do arroio Taboão tem uma perda de solos entre 7 e 14 t/ha/ano abaixo do tolerado, 18% tem uma perda de solos entre de 0 e 7 t/ha/ano abaixo do tolerado, 4% da área da bacia produz até 15 t/ha/ano acima do tolerado e 1% da bacia tem perdas de mais de 15 t/ha/ano acima do tolerado. A figura VII.21, apresenta a malha fatiada das áreas críticas.

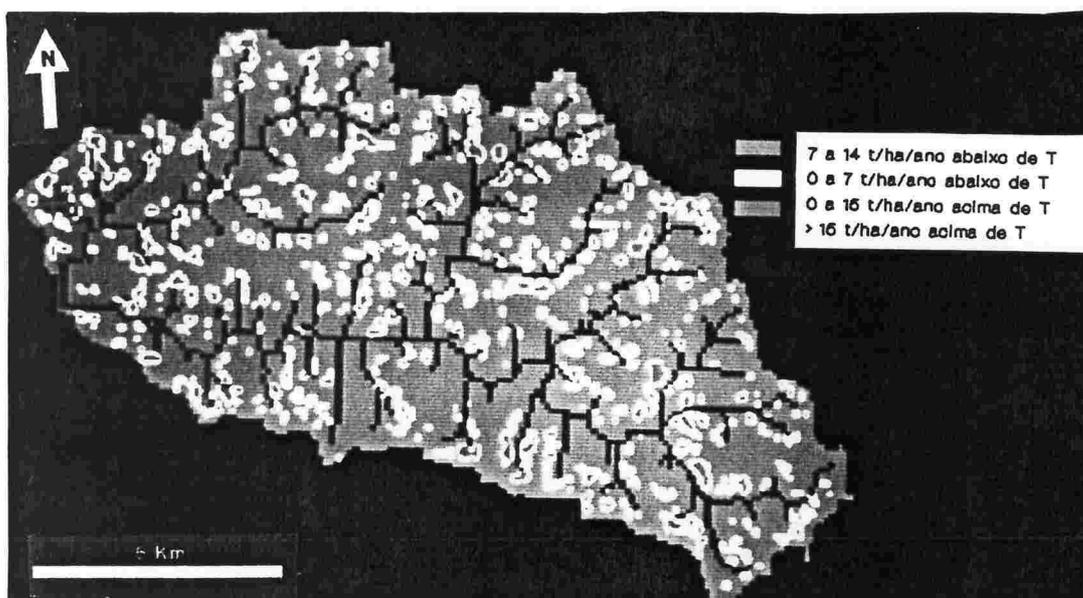


Fig. VII.21. Malha das áreas críticas quanto a perda de solos.

Na carência de correlações com dados de campo, a metodologia proposta por *Williams e Berndt (1975)* e a atual metodologia, dentro de um ponto de vista quantitativo, os valores obtidos para a distribuição espacial da produção média anual de sedimentos da bacia do arroio Taboão, representada na figura VII.19 e conseqüentemente para a distribuição espacial das áreas críticas (figura VII.21), devem ser considerados com reserva, em função das observações já feitas, associadas aos erros sistemáticos na estimativa dos parâmetros ligados ao tamanho das células do MNT. No entanto, qualitativamente, esta metodologia é uma excelente ferramenta para definir sinopticamente os pontos com maior produção de sedimentos.

VIII. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver uma metodologia que permita estimar e manipular as características de uma bacia piloto, através da análise qualitativa e quantitativa de fatores hidrológicos (naturais e antrópicos) presentes em modelos de produção de sedimentos, mais especificamente a USLE/MUSLE, utilizando-se técnicas de SIG e Sensoriamento Remoto.

Quanto aos objetivos específicos, pode-se dizer que, em maior ou menor grau, todos foram alcançados.

Os programas desenvolvidos para a manipulação de Modelos Numéricos do Terreno (MNT) com a finalidade de identificar fatores geomorfológicos da MUSLE, mostraram-se extremamente eficientes. Recomenda-se, porém, o uso de malhas mais finas com células de no máximo 50x50 metros, para ter um universo maior de classes tanto de declividade de vertente como do seu comprimento.

Da mesma forma que se recomenda malhas mais finas para o MNT, no caso da sua geração via interpolação é conveniente que se obtenha os dados de altimetria em uma carta com o dobro da escala do projeto final, por duas razões: uma maior controle na digitalização das isolinhas e um menor intervalo de discretização altimétrica (ex.: 1:50.000 isolinhas de 20 em 20 metros, 1:25.000 isolinhas de 10 em 10 metros).

Quanto ao fator combinado de cobertura do solo, não foi possível uma melhor estimativa em função da carência de dados relativos as taxas de perda de solo para as práticas agrícolas no Estado do Rio Grande do Sul.

Com a aquisição de imagens mais recentes associadas a outros intervalos quanto aos estágios dos cultivos, recomenda-se

analisar a dinâmica espacial e temporal da cobertura do solo da bacia, durante as diferentes épocas do ano, através de técnicas de análise multitemporal.

Quanto a estimativa do fator K , ocorre o mesmo problema do fator de cobertura; a carência e desatualização de informações relativas aos solos do Estado.

Para validar a caracterização de bacias a partir de modelos como a MUSLE, é imprescindível um número maior de dados de campo.

Para minimizar a discrepância entre valores estimados e valores medidos de produção de sedimentos, principalmente em bacias com áreas superiores a 5 Km^2 , recomenda-se uma análise estatística (entre estimativas e medidas), que permita estimar o fator taxa de transferência (Williams e Berndt, 1977) para as bacias da região deste estudo e de regiões.

No caso de bacias agrícolas há necessidade de melhor caracterizar o efeito das práticas conservacionistas. Técnicas de Sensoriamento Remoto a nível orbital não são eficientes para caracterizar esse fator principalmente em áreas de minifúndio.

Também dentro do fator de práticas conservacionistas, seria conveniente analisar o efeito de obras como o terraceamento no comportamento dos fatores topográficos, visto que os terraços diminuem o comprimento das vertentes. O comportamento do fator LS diante de diferentes práticas de conservação pode ser analisado através de MNT com uma malha de resolução de no máximo 10×10 metros. Recomenda-se um estudo a ser aplicado em pequenas bacias (aproximadamente 1 Km^2).

Este estudo também pretende estimular a aplicação de técnicas de geoprocessamento a outros modelos, não só para a

estimativa de produção de sedimentos, como também para análise de vazões, controle de fontes poluentes, entre outros. O geoprocessamento dos fatores manipulados nesta dissertação permitiu percepção mais global do modelo, em função da rápida resposta das operações.

IX. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- BAND, L. 1986. *Topographic Partition of watersheds with digital elevation models*. Water Resources Research, v.22, n.1, p.15-24.
- BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F. 1975. *Erodibilidade dos solos paulistas*. Boletim Técnico IAC n.27, Campinas-SP.
- BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F. 1985. *Conservação do Solo*. Piracicaba: Livro Ceres. 392p.
- BORDAS, M. P., LANNA, A. E. e SEMMELMANN, F. R. 1988. *Evaluation des risques d'érosion et de sédimentation au Brésil à partir de bilans sédimentologiques élémentaires*. Sediment Budgets. Wallingford: IAHS. 591p. p.21-33. (International association of Hydrological Sciences. Publication n.174)
- BORDAS, M. P., LANNA, A. E. e LUCA S. J. de 1990. *Projeto Potiribu. Avaliação e controle dos impactos da agricultura sobre os recursos hídricos do derrame basáltico sulamericano*. 42º Reunião Anual da SBPC. Porto Alegre RS. Comunicação. 09-A1-vol.1 p.15-16.
- BORDAS, M. P. e VACAS, A. 1990. *Mapa de solos da bacia do Arroio Taboão*. Publicação interna. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Porto Alegre.
- BORGES, A. L. e BORDAS, M. P. 1990. *Escolha de bacias representativas e experimentais para estudo da erosão no planalto basáltico sulamericano*. Porto Alegre: IPH/UFRGS/7f. Trabalho apresentado no 8. Congresso Brasileiro e Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo, 1990, Londrina.
- BURROUGH, P. A. 1986. *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford, Claredon Press.

- CASTRO, N. M. R. 1992. *Formação das cargas sólidas em suspensão em pequenas bacias rurais do derrame basáltico sulriograndense*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Porto Alegre. 101p.
- CHEVALLIER, P. 1990. *As precipitações na região de Cruz Alta e Ijuí (RS-Brasil)*. Publicação interna. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Porto Alegre. 26p.
- CHEVALLIER, P. e CASTRO, N. M. R. 1991. *As precipitações na região de Cruz Alta e Ijuí (RS-Brasil)*. V Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABRH/APRH 4.v v3, p.183-192.
- COLLINS, S. H. 1975. *Terrains parameters directly from digital terrain model*. The Canadian Surveyor, v29, p.507-518.
- DE MORAES NOVO, E. M. L. 1989. *Sensoriamento Remoto - Princípios e Aplicações*. Edgard Blücher. 307 p.
- FELGUEIRAS, C. 1988. *Aplicações de modelos numéricos de elevação e integração com imagens digitais*. V. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal RN.
- GONDIM, C. A. A. 1990. *Sistema de estruturas de drenagem*. Curitiba. Simpósio de Cartografia.
- HOFFER, R. M. 1978. *Remote Sensing: the quantitative approach*. West Lafayette-USA, McGraw-Hill, inc., pp.227-288.
- HUTCHINSON, M. F. 1988. *A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits*. Journal of hydrology, 106, p.211-232.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TÉCNICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (ITC), 1987. *Orientação para o combate à erosão no Estado de São Paulo (Bacia do Peixe-Paranapanema)*. São Paulo, Relatório n.24.739 vol.3.
- JENSON, S. K. e DOMINGUE, D. O. 1988. *Extracting Topographic Structures from Digital Elevation Data, for Geographic Information Analysis - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v.11

- LANDGREBE, D. A. 1978. *Remote Sensing: the quantitative approach*. West Lafayette-USA, McGraw-Hill, inc., pp.1-16.
- LEE, M. T. e CAMACHO, R. 1986. *Sediment source and yield assessment - Applications of hydrologic model and Geographic Information System*. Third International Symposium on River Sedimentation. The University of Mississippi.
- LEPRUN, J. C. 1981. *A erosão, conservação e o manejo dos solos no Nordeste Brasileiro: balanço, diagnóstico e novas linhas de pesquisa*. Recife: SUDENE. 107p.
- LEVANTAMENTO de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul. 1973. Recife: Divisão de Pesquisa pedológica do Ministério de Agricultura.
- MARK, D. M. 1984. *Automated detection of drainage networks from digital elevation models*. Cartographica, v.21, p.168-178.
- MARKS, D., DOZIER, J. e FREW, 1984. *Automated basin delination from digital elevation data*. Geoprocessing 2, p.299-311.
- MEIJERE, J. C., MARDANUS, B. e VAN DE KASTEELE, A. M. 1988. *Land use modelling for the upper Komering watershed*. ITC Publication n.7 p. 91-95.
- MITCHELL, J. K. e BUBENZER, G. D. 1980. *Soil Loss Estimation*. Soil Erosion. Interscience Publication. p.17-56.
- NEIMANN, J. B. et all, 1987. *Results of the Dane County land records project*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol.53, n.10, p.1371-1378.
- PAVLIDIS, T. 1982. *Algorithms for graphics and image processing*. Springer-verlag, Berlin.
- PEUKER, T. K. e DOUGLAS, D. H. 1975. *Detection of surface specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data*. Comput Graph. Image Process. v.4, p.375- 387.
- POMBO, L. C. A., GIANLUPPI, D. e KLAMPT, E. 1981. *Determinação do fator K de erodibilidade dos solos do Rio Grande do sul através de características, físicas, químicas e microbiológicas*. In.: III Encontro Nacional de Pesquisa

- sobre Conservação do solo, 1981. Recife. Anais. p.220-235.
- RICHARDS, J. A. 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis - an introduction*. University of New South Wales.
- RISSE, A. e CHEVALLIER, P. 1991. *Uso de Modelo Numérico do Terreno para a obtenção dos parâmetros topográficos da Equação Universal de Perda de Solo Modificada*. V Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABRH/APRH 4.v v1, p.487-493.
- SCHOWENGERDT, R. A. 1993. *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*. New York. Academic Press.
- SIVERTUM, A., REINELT, L. e CASTENSSON, R. 1988. *A GIS method to aid non-point source critical area analysis*. International Journal Geographical Information System, vol.2, n.4, p.365-378.
- STOCKING, M. 1981. *A working model for the estimation of soil losses suitable for underdeveloped areas*. Development Studies Occasional Paper, n.15. University of East Anglia, UK.
- STUEBE, M. e JOHNSTON, D. M. 1990. *Runoff volume estimation using GIS techniques*. Water Resources Bulletin. vol.26, n.4, p.611-620.
- SWAIN, P.H. 1978. *Remote Sensing: the quantitative approach*. West Lafayette-USA, McGraw-Hill, inc., pp.137-185
- WILLIAMS, J. R. 1975. *Sediment routing for agricultural watersheds*. Water Resources Bulletin. American Resources Association. 10, 1975, vol.2, n.5, p.965-974.
- WILLIAMS, J. R. 1977. *Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models*. In: PARIS SYMPOSIUM, 1977. *Erosion and solid matter transport in inland waters*. Wallington: IAHS. 352p. p.168-179.
- WILLIAMS, J. R. e BERNDT, H. D. 1972. *Sediment yield computed with universal equation*. Journal of the Hydraulics Division. American Society of Civil Engineers. New York, v.98, n.12, p.2087-2099.

- WILLIAMS, J. R. e BERNDT, H. D. 1977. *Sediment yield prediction on watershed hydrology*. Transaction of ASAE, Saint Joseph, p.1100-1104.
- WISCHMEIER, W. H. 1959. *A rainfall erosion index for a universal soil loss equation*. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.23, p.246-249.
- WISCHMEIER, W. H. e SMITH, D. D. 1958. *Rainfall energy and its relationship to soil loss*. Transactions American Geophysical Union, Washington, D.C., v.39, n.2, p.285-291.
- WISCHMEIER, W. H. e SMITH, D. D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington: Departamento of Agriculture. 61p. (Agriculture Handbook, 537).
- YOELI, P. 1986. *Computer executed production of a regular grid of height points from digital contours*. The American Cartographer, v.13, n.3, p.219-229.