

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA

PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA
PARA PLANEJAMENTO URBANO,
UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO,
MODELAGEM NUMÉRICA DO TERRENO (MNT) E
SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)**

por

Antônio Luís Schifino Valente

Dissertação submetida como requisito parcial
para a obtenção do grau de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Prof. Dr. Vitor Haertel
Orientador

Porto Alegre, março de 1995

AGRADECIMENTOS

Ao professor Vitor Haertel, meu orientador, pelas sugestões e críticas que contribuíram para a realização desta dissertação.

Aos professores Regina Davison Dias, do curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Egon Klamt, Dirce Suertegaray, Francisco Magro e, em especial, ao professor Nelson Amoretti Lisboa, do Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelas sugestões e apoio recebido em suas diferentes áreas.

Aos demais professores deste Curso de Pós-graduação que, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu concluísse meu mestrado.

À Fundação de Planejamento Metropolitano e Regional - METROPLAN e aos seus técnicos e funcionários pela atenção e fornecimento dos dados indispensáveis à elaboração desta pesquisa, em especial aos eng. Francisco Bragança de Souza, arq. Margareth Vasata Macchi Silva, arq. Maria Celina Eskinazi, arq. Maria Conceição e eng.^a civil Nanci Begnini Giugno.

Ao pesquisador Alfonso Risso pelas sugestões e incansável auxílio junto ao SIG.

Aos técnicos do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM): Régis Alexandre Lahn, José Carlos Rodrigues Nunes e Laurindo Guasselli pelas valiosas sugestões e orientações técnicas, inestimável apoio e amizade dispensados ao longo de todo o curso.

Aos funcionários do CEPSRM, Maria Magdalena Assaf, Mônica Kreling, Nei da Rocha Cardoso, Leda dos Reis de Royá, Luciane Silva da Silva e Maria Rodrigues pela permanente paciência e disposição em atender minhas solicitações.

Aos meus colegas do curso de mestrado Eduardo Juan Ruiz Posse, Elaine Soares de Lima Nunes, Eliseu José Weber, Marcelo de Almeida Bastos pelo incentivo, ajuda e idéias durante a elaboração desse trabalho e a Glauber Acunha Gonçalves, João Paulo Umpierre Pohlmann, Luis Otávio Thomson Claro, Marcelo Romero de Moraes, Rosemary Hoff e Ulisses Bremer pelo incentivo e companherismo permanente.

A Dagoberto Weimer e Paulo Ricardo Freitas pelos desenhos realizados.

A CAPES pela bolsa concedida.

Aos colegas e amigos professores do Departamento de Matemática da Universidade do Rio Grande pelo apoio e pela minha substituição durante o período do mestrado.

Aos amigos Luiz Carlos Guerreiro Lopes e Mário Chaves por toda a ajuda recebida.

Aos meus pais pelo incentivo permanente e ajuda constante para que eu realizasse o mestrado

E aos meus amigos maiores pela eterna compreensão.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Generalidades.....	1
1.2 - Objetivo.....	2
1.3 - Relevância do trabalho.....	4
1.4 - Organização da dissertação.....	4
1.5 - A área teste.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 - Sensoriamento Remoto a nível orbital e estudos urbanos.....	7
2.1.1 - Generalidades.....	7
2.1.2 - Áreas urbanas e resolução espacial.....	10
2.1.3 - Áreas urbanas e natureza espectral dos alvos.....	15
2.1.4 - Áreas urbanas e resolução temporal.....	18
2.1.5 - Sensoriamento Remoto a nível orbital e monitoramento da expansão urbana.....	18
2.1.6 - Sensoriamento Remoto a nível orbital e estudos intra- urbanos.....	21
2.1.7 - Outros trabalhos sobre crescimento e uso do solo urbano, utilizando Sensoriamento Remoto.....	27
2.2 - Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Modelagem Numérica do Terreno (MNT) em estudos urbanos.....	29
2.3 - Sensoriamento Remoto a nível sub-orbital e estudos urbanos - aerofotografias.....	32
3. AS FERRAMENTAS BÁSICAS UTILIZADAS NA PESQUISA.....	37
3.1 - Sensoriamento Remoto.....	37
3.1.1 - Generalidades.....	37

3.1.2 - O Sol como fonte de radiação em Sensoriamento Remoto.....	39
3.1.3 - O Espectro Eletromagnético.....	40
3.1.4 - Interação da radiação eletromagnética com a matéria.....	41
3.1.5 - Assinatura e comportamento espectral de alvos.....	43
3.1.6 - Sistemas Sensores.....	48
3.1.7 - Níveis de aquisição de dados em Sensoriamento Remoto.....	52
3.1.8 - O sistema orbital LANDSAT.....	53
3.1.9 - Processamento digital de imagens em Sensoriamento Remoto.....	57
3.1.9.1 - A imagem digital.....	57
3.1.9.2 - Técnicas de processamento e classificação de imagens digitais.....	57
3.2 - Sistema de Informações Geográficas - SIG.....	64
3.2.1 - Breve histórico.....	64
3.2.2 - Características dos Sistemas de Informações Geográficas.....	65
3.2.3 - Planos de informação e categorias.....	66
3.2.4 - Componentes dos Sistemas de Informações Geográficas.....	68
3.2.5 - Formato de representação dos dados nos SIGs.....	71
3.2.6 - Operações de análise disponíveis nos SIGs.....	74
3.2.7 - O sistema de informações geográficas do INPE - SGI.....	75
3.3 - Modelagem Numérica do Terreno - MNT.....	77
3.3.1 - Aspectos Gerais.....	77
3.3.2 - Representação de MNT.....	77
4. METODOLOGIA.....	84
4.1 - Etapa 1 - Seleção do material e delimitação da área de estudo.....	85
4.2 - Etapa 2 - Processamento e classificação de imagens orbitais.....	87
4.2.1 - Aspectos gerais.....	87
4.2.2 - Procedimento 1: classificação visual, utilizando a banda 3 filtrada e composição colorida.....	89
4.2.3 - Procedimento 2: classificação digital.....	91
4.2.4 - Procedimento 3: classificação visual, empregando técnicas de componentes principais.....	92
4.3 - Etapa 3 - Implementação de técnicas de Modelagem Numérica do Terreno (MNT) e Sistema de Informações Geográficas (SIG)	95
4.3.1 - Aspectos Gerais.....	95

4.3.2 - Plano de informação contorno da sub-bacia — PI - CONT...	95
4.3.3 - Plano de informação Modelo Numérico do Terreno — PI - MNT.....	100
4.3.4 - Plano de informação Declividade — PI - D.....	101
4.3.5 - Plano de informação Isodeclividades 1 — PI - D1.....	102
4.3.6 - Plano de informação Isodeclividades 2 — PI - D2.....	103
4.3.7 - Plano de informação Relevo — PI - REL.....	105
4.3.8 - Plano de informação Geológico — PI - GEO.....	107
4.3.9 - Plano de informação Pedológico — PI - PED.....	109
4.3.10 - Plano de informação Geomorfológico — PI -GF.....	115
4.3.11 - Plano de informação Inundação — PI - INUM.....	118
4.3.12 - Plano de informação Rede de Drenagem — PI - DREN.....	118
4.3.13 - Plano de informação Sistema Viário — PI - VIAR.....	119
4.3.14 - Plano de informação Limites Municipais — PI - LIM.....	119
4.3.15 - Plano de informação Área Urbana 1975 — PI - AU75.....	120
4.3.16 - Plano de informação Área Urbana 1993 — PI - AU93.....	120
4.4 - Etapa 4 - Cruzamento de informações no SGI.....	132
4.4.1 - Aspectos gerais.....	132
4.4.2 - Expansão da Área Urbana — PI - EXAU.....	133
4.4.3 - Área Urbana em 1975 x Limites Municipais — PI - 75XL....	134
4.4.4 - Área Urbana em 1993 x Limites Municipais — PI - 93XL....	136
4.4.5 - Suscetibilidade Preliminar à Erosão Laminar — PI - ERL.....	137
4.4.6 - Áreas Com Restrição ao Uso Urbano — PI - RUU.....	141
4.4.7 - Área Urbana em 1975 x Áreas Com Restrição ao Uso Urbano — PI - 75XR.....	146
4.4.8 - Área Urbana em 1993 x Áreas Com Restrição ao Uso Urbano — PI - 93XR.....	148
4.4.9 - Áreas Com Probabilidade de Ocorrência de Eventos Perigosos — PI - EVP.....	150
4.4.10 - Áreas de Risco em 1993 — PI - RISC-93.....	152
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	154
ANEXO.....	163
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	173

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Área da sub-bacia do Arroio Feijó.....	6
Figura 2.1	- Classificação dos estudos urbanos através de Sensoriamento Remoto a nível orbital.....	8
Figura 2.2	- Frequência espacial relativa e contraste de estruturas urbanas nos Estados Unidos e na China.....	12
Figura 2.3	- Resolução (IFOV) para mapeamento do uso do solo em função dos níveis de classificação propostos por Anderson <i>et al.</i> 1976).....	13
Figura 2.4	- Comparação entre as dimensões de parcelas representativas do solo urbano em diferentes países e IFOVs para os sistemas sensores em satélites.....	13
Figura 2.5	- IFOVs contido dentro de parcelas respresentativas do solo urbano em diferentes países e IFOVs dos sistemas sensores dos satélites.....	14
Figura 2.6	- Curvas de reflectância espectral de materiais encontrados nas áreas urbanas.....	17
Figura 3.1	- Elementos integrantes na fase da aquisição de dados.....	38
Figura 3.2	- Curva de irradiância solar.....	39
Figura 3.3	- O Espectro Eletromagnético.....	40
Figura 3.4	- Regiões do Espectro Ótico.....	41
Figura 3.5	- Fenômenos da interação da radiação eletromagnética com a matéria.....	42

Figura 3.6 -	a) Valores médios da reflectância de uma folha verde nas faixas do espectro correspondente ao azul, verde, vermelho e infravermelho. b) valores de reflectância espectral em intervalos espectrais mais estreitos, constituindo-se no gráfico da assinatura espectral da folha.....	43
Figura 3.7 -	Comportamento espectral da vegetação fotossinteticamente ativa.....	44
Figura 3.8 -	a) Curvas de reflectância espectral para três diferentes tipos de solos. b) Reflectância de um solo argiloso com diferentes teores de umidade.....	46
Figura 3.9 -	Comportamento espectral da água em seus diferentes estados físicos.....	47
Figura 3.10 -	Comportamento espectral da água limpa e água com a presença de sedimentos.....	48
Figura 3.11 -	Níveis de aquisição de dados por Sensoriamento Remoto...	52
Figura 3.12 -	A órbita dos satélites LANDSAT 4 e 5.....	54
Figura 3.13 -	Configuração dos satélites LANDSAT.....	56
Figura 3.14 -	Exemplos de filtros passa-alta e passa-baixa.....	58
Figura 3.15 -	Espaço espectral bidimensional mostrando a sua relação com as características de reflectância espectral de diferentes tipos de cobertura da superfície terrestre.....	60
Figura 3.16 -	Representação das classes de cobertura do terreno por um conjunto de agrupamentos de classes espectrais.....	60
Figura 3.17 -	Esquema de rotulação de pixels de uma imagem LANDSAT MSS.....	61
Figura 3.18 -	Regiões de decisão em um espaço bidimensional.....	62
Figura 3.19 -	Algoritmos de classificação definidos em termos de função discriminante.....	63
Figura 3.20 -	Conceito de superposição dos SIGs.....	66

Figura 3.21 - Componentes do hardware dos SIGs.....	68
Figura 3.22 - Principais componentes do software dos SIGs.....	69
Figura 3.23 - A transformação para o formato raster apresenta pequenos erros na estimativa das distâncias e das áreas devido ao tamanho da célula.....	73
Figura 3.24 - Comparação entre o formato raster e o formato vetorial.....	74
Figura 3.25 - Matriz de altitude ou grade regular retangular.....	79
Figura 3.26 - Método de procura normal.....	82
Figura 3.27 - Método de procura por quadrante e por octante.....	82
Figura 3.28 - Procura dos "n vizinhos mais próximos por quadrante e por cota".....	83
Figura 4.1 - Etapas da metodologia.....	84
Figura 4.2 - Esquema geral da metodologia proposta.....	85
Figura 4.3 - Imagem LANDSAT/TM5, banda 3 filtrada, setembro de 1993, com a área da sub-bacia do Arroio Feijó.....	93
Figura 4.4 - Composição colorida (7R, 4G, 3B filtrada), setembro de 1993, mostrando a sub-bacia do Arroio Feijó.....	93
Figura 4.5 - Classificação supervisionada da imagem LANDSAT/TM 5 de setembro de 1993, mostrando as três classes de uso do solo na área teste.....	94
Figura 4.6 - Classificação supervisionada da imagem LANDSAT/TM 5, de julho de 1984 com a área inundável na área teste.....	94
Figura 4.7 - Primeira componente principal da imagem de setembro de 1993, mostrando a área teste.....	95
Figura 4.8 - PIs integrantes da etapa 3 da metodologia proposta.....	97
Figura 4.9 - Região inadequada (rachurada) para inserção de centróide.....	98

Figura 4.10 -	PI-CONT com os limites topográficos da sub-bacia do Arroio Feijó.....	122
Figura 4.11 -	PI-MNT, mostrando as isolinhas de altitude da sub-bacia do Arroio Feijó.....	122
Figura 4.12 -	PI-D, declividades, gerado no SGI a partir do MNT.....	123
Figura 4.13 -	PI-D1, isodeclividades 1, obtido no SGI pelo fatiamento do MNT.....	123
Figura 4.14 -	PI-D2, isodeclividades 2, obtido no SGI pelo fatiamento do MNT.....	124
Figura 4.15 -	PI-REL, mostrando o mapeamento das áreas da sub-bacia do Arroio Feijó em função do relevo de acordo com a classificação de Lemos & Santos (1984).....	124
Figura 4.16 -	PI-GEO, apresentando as unidades litológicas da sub-bacia do Arroio Feijó.....	125
Figura 4.17 -	PI-PED com as unidades de mapeamento de solos da sub-bacia do Arroio Feijó.....	125
Figura 4.18 -	PI-GF com as unidades geomorfológicas existentes na sub-bacia do Arroio Feijó.....	126
Figura 4.19 -	PI-INUM com a área inundada na sub-bacia do Arroio Feijó.....	126
Figura 4.20 -	PI-DREN, mostrando a rede de drenagem da sub-bacia do Arroio Feijó.....	127
Figura 4.21 -	PI-VIAR com o sistema viário principal existente na sub-bacia do Arroio Feijó.....	127
Figura 4.22 -	PI-LIM, mostrando os limites, dentro da sub-bacia do Arroio Feijó, dos municípios de Alvorada, Porto Alegre e Viamão.....	128
Figura 4.23 -	PI-AU75 com as classes área urbana, loteamento e área não urbana obtidas a partir da carta topográfica da DSG de 1977.....	128

Figura 4.24 -	PI-AU93 com as classes área urbana, loteamento e área não urbana resultantes da classificação visual (procedimento 1, etapa 2) da imagem LANDSAT/TM5 de 8 de setembro de 1993.....	129
Figura 4.25 -	Vista parcial da classe área urbana (município de Viamão) na sub-bacia do Arroio Feijó.....	129
Figura 4.26 -	Vista parcial da classe área urbana (município de Alvorada) na sub-bacia do Arroio Feijó.....	130
Figura 4.27 -	Vista parcial da classe loteamento (Loteamento Algarve, situado no município de Alvorada).....	130
Figura 4.28 -	Vista parcial da classe área não urbana pertencente ao município de Viamão, situada ao sul da sub-bacia do Arroio Feijó.....	131
Figura 4.29 -	Vista parcial da classe não urbana, situada ao norte da sub-bacia do Arroio Feijó, junto ao município de Alvorada.....	131
Figura 4.30 -	Modelo de cruzamento dos PIs para análise da expansão da área urbana na área teste.....	133
Figura 4.31 -	Área urbana existente na área teste em 1975 a 1993.....	133
Figura 4.32 -	PI-EXAU, apresentando a área urbana existente na sub-bacia do Arroio Feijó até 1975 e a área urbana acrescida no período de 1975 a 1993.....	134
Figura 4.33 -	Modelo de cruzamento para a obtenção do PI-75XL.....	134
Figura 4.34 -	PI-75XL, mostrando a área urbana existente em 1975 nos municípios de Alvorada, Porto Alegre e Viamão, dentro dos limites da sub-bacia do Arroio Feijó.....	135
Figura 4.35 -	Resultados obtidos pela quantificação das áreas do PI-75XL.....	135
Figura 4.36 -	Modelo de cruzamento para a obtenção do PI-93XL.....	136
Figura 4.37 -	PI-93XL, mostrando a área urbana na área teste em 1993 em função dos municípios que a integram.....	136

Figura 4.38 - Resultados obtidos pela qualificação das áreas do PI-93XL.....	137
Figura 4.39 - Modelo de cruzamento dos PIs para a determinação da suscetibilidade preliminar à erosão laminar, baseado na metodologia proposta por Salomão (1992).....	138
Figura 4.40 - PI-ERL com a distribuição espacial das classes de suscetibilidade preliminar à erosão laminar para a área teste.....	139
Figura 4.41 - Área de implantação do loteamento Algarve, município de Alvorada.....	140
Figura 4.42 - Avançado estágio de erosão em sulcos junto ao loteamento Algarve.....	140
Figura 4.43 - Arruamento no município de Viamão, ao sul da sub-bacia.....	141
Figura 4.44 - Modelo de cruzamento de PIs para a identificação de áreas com restrição ao uso urbano.....	145
Figura 4.45 - PI-RUU com a distribuição espacial das áreas com restrição ao uso urbano na sub-bacia do Arroio Feijó.....	146
Figura 4.46 - Modelo de cruzamento para a análise da área urbana em 1975 em função das áreas com restrição ao uso urbano na área teste	147
Figura 4.47 - PI-75XR apresentando a distribuição espacial da área urbana existente em 1975 na sub-bacia do Arroio Feijó em função das áreas com restrição ao uso urbano.....	147
Figura 4.48 - Modelo de cruzamento para a análise da área urbana em 1993 em função das áreas com restrição a esse tipo de uso na área teste.....	148
Figura 4.49 - PI-93XR com a distribuição espacial da área urbana existente em 1993 na sub-bacia do Arroio Feijó em função das áreas de restrição ao uso urbano.....	149
Figura 4.50 - Modelo para o cruzamento de PIs para a determinação das áreas com probabilidade de ocorrência de eventos perigosos.....	150

Figura 4.51 - PI-EVP com as áreas com probabilidade de ocorrência de eventos perigosos na sub-bacia do Arroio Feijó.....	151
Figura 4.52 - Modelo de cruzamento de informações para a determinação das áreas de risco na área teste.....	152
Figura 4.53 - PI-RISC, mostrando a distribuição espacial das áreas de risco consideradas na área teste.....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela	2.1	- Dimensões relativas do tamanho das áreas urbanas das cidades com populações entre 50.000 e 500.000 habitantes.....	11
Tabela	2.2	- Densidade relativa aproximada das edificações nas áreas urbanas em diferentes países.....	11
Tabela	2.3	- Níveis de classificação do Uso da Terra segundo Anderson <i>et al</i> , 1976.....	22
Tabela	2.4	- Sistema de Classificação (níveis I e II) para Uso e Cobertura do Solo através de Sensoriamento Remoto segundo Anderson <i>et al</i> , 1976.....	23
Tabela	2.5	- Características do Sistema de Classificação do Uso da Terra por Sensoriamento Remoto - Universidade de Michigan.....	24
Tabela	3.1	- Classes texturais do solo.....	46
Tabela	3.2	- Classificação dos sistemas sensores.....	49
Tabela	3.3	- Satélites da série LANDSAT.....	54
Tabela	3.4	- Características das órbitas da série LANDSAT.....	55
Tabela	3.5	- Principais características do sensor TM.....	56
Tabela	3.6	- Exemplos de planos de informação e categorias.....	67
Tabela	3.7	- Elementos da representação vetorial.....	72
Tabela	4.1	- Imagens digitais LANDSAT/TM 5 usadas na pesquisa.....	87
Tabela	4.2	- Classes de isodeclividades 1 para a sub-bacia do Arroio Feijó.....	102
Tabela	4.3	- Quantificação de áreas ocupadas pelas classes de isodeclividades 1 na sub-bacia do Arroio Feijó.....	103

Tabela	4.4	-	Quantificação de áreas referentes às classes de isodeclividades 2 na sub-bacia do Arroio Feijó.....	105
Tabela	4.5	-	Classes de relevo.....	106
Tabela	4.6	-	Quantificação de áreas referentes às classes de relevo na sub-bacia do Arroio Feijó.....	107
Tabela	4.7	-	Quantificação de áreas ocupadas pelas unidades geológicas na sub-bacia do Arroio Feijó.....	109
Tabela	4.8	-	Características gerais dos solos das unidades de mapeamento da sub-bacia do Arroio Feijó.....	114
Tabela	4.9	-	Quantificação de áreas ocupadas pelas unidades de mapeamento de solos na sub-bacia do Arroio Feijó.....	115
Tabela	4.10	-	Quantificação de áreas referentes às unidades geomorfológicas da sub-bacia do Arroio Feijó.....	117
Tabela	4.11	-	Quantificação de áreas referentes aos municípios de Porto Alegre, Alvorada e Viamão no interior da sub-bacia do Arroio Feijó.....	119
Tabela	4.12	-	Quantificação de áreas referentes às classes área urbana, loteamento e área não urbana na sub-bacia do Arroio Feijó, no ano de 1975.....	120
Tagela	4.13	-	Quantificação de áreas referentes às classes área urbana, loteamento e área não urbana na sub-bacia do Arroio Feijó, no ano de 1993.....	121
Tabela	4.14	-	Graus de suscetibilidade preliminar à erosão laminar para a área teste.....	138
Tabela	4.15	-	Quantificação de áreas referentes às classes de suscetibilidade preliminar à erosão laminar na sub-bacia do Arroio Feijó.....	139
Tabela	4.16	-	Quantificação de áreas referentes às classes com restrições ao uso urbano na sub-bacia do Arroio Feijó.....	145

Tabela	4.17 -	Quantificação de áreas resultantes do cruzamento das áreas com restrição ao uso urbano e área urbana existente em 1975 na sub-bacia do Arroio Feijó.....	148
Tabela	4.18 -	Quantificação de áreas com restrição ao uso urbano x área urbana existente em 1993 na sub-bacia do Arroio Feijó.....	149
Tabela	4.19 -	Quantificação de áreas com probabilidade de ocorrência de eventos perigosos estudados na sub-bacia do Arroio Feijó.....	151
Tabela	4.20 -	Quantificação das áreas de risco na sub-bacia do Arroio Feijó.....	153

RESUMO

O monitoramento da expansão das áreas urbanas e a análise da sua interação com o meio físico têm sido um grande desafio para os técnicos de planejamento urbano.

No Brasil, em especial, dada a velocidade com que o fenômeno se processa e graças a um crescimento desordenado das cidades nas últimas décadas, esses estudos, que envolvem um elevado número de informações, tem exigido decisões e diagnósticos urbanos cada vez mais rápidos.

Esta dissertação propõe uma metodologia para o planejamento racional do uso do solo urbano através do emprego integrado de tecnologias recentes como Sistema de Informações Geográficas (SIG), Modelagem Numérica do Terreno (MNT) e Sensoriamento Remoto através de imagens orbitais. Para isso, são implementados no SIG desenvolvido pelo INPE dados provenientes de cartas topográficas, de mapas temáticos do meio físico e de imagens orbitais LANSAT/TM da região estudada. A partir desses dados iniciais são geradas, também num SIG, outras informações com objetivo de estudar a evolução da área urbana, identificar áreas com suscetibilidade preliminar à erosão laminar, áreas com restrição ao uso urbano e áreas de eventos perigosos e riscos.

O trabalho apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de Sensoriamento Remoto, Modelagem Numérica do Terreno (MNT) e Sistema de Informações Geográficas (SIG) em estudos urbanos. Segue-se a conceituação e aspectos teóricos dessas três ferramentas básicas utilizadas. A metodologia propriamente dita traz os planos de informações originais e as suas respectivas fontes de informações, os processos de classificação de imagens digitais empregados e os modelos de cruzamentos desenvolvidos para um SIG.

A área teste escolhida é a sub-bacia do Arroio Feijó, localizada na região metropolitana de Porto Alegre, na porção centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul. A região é caracterizada por uma elevada densidade populacional, pela presença de áreas inundáveis e pela ocorrência de processos erosivos.

Os resultados mostram que a metodologia proposta é adequada e eficiente para agilizar as atividades de planejamento urbano, subsidiando a elaboração de Planos Diretores de Desenvolvimento Integrado e orientando o crescimento das cidades para regiões mais favoráveis. Além disso, contribui para a prevenção de parcela dos riscos e problemas geotécnicos relacionados ao meio físico nas áreas urbanas.

ABSTRACT

DEVELOPING OF A METHODOLOGY FOR URBAN PLANNING USING REMOTE SENSING TECHNIQUES, DIGITAL TERRAIN MODELING (DTM) AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)

Monitoring the expansion of urban areas and analyzing the interaction with the environment has been a challenging task to urban planners. Specially in Brazil, in view of the velocity of urban expansion and the disordered enlarging of the cities in the last decades, these studies, which process a great amount of data, demand decisions and urban diagnoses more and more quick.

This dissertation proposes a methodology for planning the rational use of urban land through the integration of recent technologies as Geographic Information System (GIS), Digital Terrain Model (DTM) and orbital remote sensing data. Thereby, data from topographic charts, thematic maps of the environment and TM LANDSAT 5 satellite images of the region are integrated in the GIS developed by INPE (National Institute of Spatial Research). From these data, other information are produced, also in the GIS, aim at studying the evolution of the area, identifying areas with preliminary susceptibility to laminar erosion, areas restricted against urban use and areas under potential risk.

This work begins by a bibliographic review about the use of Remote Sensing, Digital Terrain Model (DTM) and Geographic Information Systems (GIS) in urban studies. Afterwards, theoretical aspects and concepts about these three basic tools are presented. The methodology itself shows the original information plans and its sources, the procedures used in digital image classification and the models for data integration used in the GIS.

The test area chosen is the sub-basin of Feijó rivulet, located in the metropolitan region of Porto Alegre, in the East-central part of Rio Grande do Sul State. The region is characterized by a high populational density, inundation areas and erosive processes.

The results show that the proposed methodology is suitable and efficient for improving the urban planning activity and is a good subsidy to preparing Directive Plans for Integrate Development. The methodology also can orient the expansion of cities to more favorable regions. In addition, the proposed methodology can help preventing against geotechnical risks related to the environment of urban areas.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - GENERALIDADES

As cidades brasileiras, durante a década de 60, a exemplo do que ocorreu no restante do mundo, passaram a sofrer um processo de crescimento acelerado. Na década seguinte, intensificou-se o fenômeno da ocupação urbana, muitas vezes de forma desordenada, atingindo áreas problemáticas até então não ocupadas pela urbanização antiga ou avançando sobre regiões inadequadas a esse tipo de uso do solo. Atualmente, os aglomerados urbanos abrigam cerca de 80% da população do país, praticamente o dobro do verificado na década de 50 (Prandini & Nakazawa, 1993).

Nesse cenário, os problemas decorrentes da ocupação desordenada e irregular provocam o desequilíbrio dos sistemas ambientais, causam pesado ônus ao Poder Público e riscos às populações. Entre eles destacam-se aqueles relacionados ao meio físico e às atividades antrópicas indiscriminadas como a ocupação de áreas de várzeas, áreas sujeitas a inundações, áreas com elevadas declividades e áreas com alta suscetibilidade a processos erosivos.

Logo, para o planejar o crescimento das cidades é de fundamental importância o conhecimento multitemporal das tendências de expansão da mancha urbana e sua interação com o meio físico. Normalmente, esses estudos têm sido realizados através da interpretação visual de aerofotografias e sua posterior comparação com as cartas existentes (Jensen *et al.*, 1983). No entanto, essa técnica em geral apresenta elevado custo e os dados resultantes frequentemente estão desatualizados. Além disso, à medida que os aglomerados urbanos crescem e tornam-se mais complexos, outros sistemas tradicionais de obtenção e manipulação de dados, como levantamentos de campo, mostram-se ineficientes diante do grande volume de informações envolvidas e da necessidade de rápidas tomadas de decisões.

No Brasil, em especial, essas técnicas convencionais, quando aplicadas para monitorar a expansão das cidades não têm conseguido acompanhar a velocidade com que o fenômeno se efetua. Por isso, Foresti (1986) alerta para a necessidade da busca de novos métodos, empregando tecnologias mais adequadas, para detectar, em tempo quase real, a expansão urbana e as alterações ambientais decorrentes, contribuindo para uma maior eficiência da ação dos órgãos de planejamento.

Nesse sentido, o aprimoramento das resoluções espacial, espectral e radiométrica dos sensores orbitais propiciou novo campo de pesquisa aos estudos urbanos. Tornou possível, por exemplo, a visão global das áreas metropolitanas. As informações passaram a ser obtidas com regularidade constante, graças à repetitividade das imagens e o recobrimento de grandes áreas. Por outro lado, o desenvolvimento das técnicas de processamento e classificação de imagens digitais têm permitido realçar e detectar as alterações sofridas no contexto urbano e, conseqüentemente, viabilizam a extração de um volume maior de informações do que diretamente na imagem original. É o caso dos modelos de " pixel mistura", que através da classificação a nível de sub-pixel, permitem a melhor identificação dos alvos urbanos. Paralelamente, o surgimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) proporcionou uma ferramenta poderosa, rápida e eficiente para a manipulação e uso integrado de grandes volumes de dados georeferenciados.

Dessa forma, as técnicas de Sensoriamento Remoto aliadas aos recursos dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) constituem cada vez mais instrumentos fundamentais na análise dos fenômenos urbanos e na elaboração de programas precisos de gerenciamento e planejamento. Através dessas tecnologias de ponta resultados relevantes são obtidos no mapeamento do uso do solo, nas atividades de transporte, em projetos de engenharia, fiscalização municipal, estimativa de população e análise da qualidade de vida.

1.2 - OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia, visando o planejamento racional do uso do solo urbano tendo em vista o processo de expansão da área urbana e sua interação com o meio físico.

Para essa finalidade é escolhida como área teste a sub-bacia do Arroio Feijó, caracterizada por um intenso processo de ocupação urbana, e são empregadas as seguintes ferramentas básicas:

1 - Modelagem Numérica do Terreno (MNT), viabilizando:

- a) o estabelecimento de áreas com isodeclividades;
- b) a identificação de fatores limitantes ao desenvolvimento urbano tendo em vista a declividade do relevo;
- c) a integração de informações de isodeclividades com outros dados disponíveis sobre o meio físico da região de estudo.

2 - Sensoriamento Remoto através de imagens orbitais, para os fins seguintes:

- a) mapeamento da cobertura do solo segundo às classes área urbana, loteamento e área não urbana;
- b) identificação das tendências de expansão urbana;
- c) mapeamento de áreas sujeitas a inundações.

3 - técnicas de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) para as finalidades abaixo:

- a) cruzamento de dados georeferenciados obtidos nos itens 1 e 2 acima e outras informações de diversas fontes, visando a identificação de áreas com suscetibilidade preliminar a erosão laminar, áreas com restrição ao uso urbano, áreas de eventos perigosos e áreas de risco;
- b) análise multitemporal da ocupação do solo e sua interação com o meio físico;
- c) previsão de cenários;

1.3 - RELEVÂNCIA DO TRABALHO

As atividades de planejamento urbano, em especial os estudos sobre a ocupação do solo, utilizam-se de informações georeferenciadas, isto é geograficamente localizadas. Essas informações necessitam de atualizações rápidas e de integrações com outros dados já existentes. Por outro lado, é de fundamental importância nesses estudos o estabelecimento de modelos que retratem o meio físico da área estudada. Nesse caso, a modelagem de dados, quando executada por processos manuais, além de demorada e exaustiva pode apresentar consideráveis imperfeições devido ao grande volume de dados envolvidos.

Atualmente, as técnicas de Sensoriamento Remoto têm permitido a obtenção regular de determinadas informações sobre o meio urbano. Essas informações integradas com o recurso da Modelagem Numérica do Terreno (MNT) e dados oriundos de outras fontes através de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) podem propiciar a elaboração rápida e precisa de diagnósticos urbanos.

Portanto, acreditamos que a metodologia proposta na presente dissertação permite, com redução de custos e tempo, a obtenção regular e atualizada de informações sobre a mancha urbana e sua interação com meio físico. Serve também como subsídio à elaboração de legislações urbanísticas de modo a orientar o crescimento das cidades para áreas mais favoráveis. Finalmente, esperamos que a utilização conjunta de Sensoriamento Remoto, MNT e SIG no planejamento urbano possa prevenir ou minimizar grande parte dos problemas geotécnicos verificados nas cidades, eliminando consequentemente parcela de riscos às populações.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este estudo caracteriza-se pela sua multidisciplinariedade na medida em que a metodologia proposta utiliza conhecimentos das mais variadas áreas como Geografia, Pedologia, Geologia, Engenharia, Urbanismo, entre outras. Portanto, seu desenvolvimento contou com a consulta e colaboração de professores e técnicos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e da Fundação de Planejamento Metropolitano e Regional (METROPLAN) cujos nomes estão relacionados no início deste trabalho.

O estudo foi realizado no Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia - CEP SRM, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, e está apresentado em cinco capítulos.

O Capítulo 2, denominado Revisão Bibliográfica, tem por finalidade apresentar alguns trabalhos, publicados no Brasil e no Exterior, que aplicaram Sensoriamento Remoto, Modelagem Numérica do Terreno (MNT) e (ou) Sistema de Informações Geográficas (SIG) em estudos urbanos. Inicialmente, é destacada a importância e os principais aspectos relacionados ao emprego das técnicas de Sensoriamento Remoto a nível orbital nas áreas urbanas. O tema está subdividido didaticamente em dois enfoques: monitoramento da expansão urbana e estudos intra-urbanos. Segue-se uma revisão bibliográfica sobre Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Modelagem Numérica do Terreno (MNT) voltados também às áreas urbanas. Finalmente, complementando o Capítulo 2, não poderia faltar uma ligeira abordagem sobre aerofotografias, pois trata-se da técnica tradicionalmente utilizada pelos órgãos de planejamento urbano.

A conceituação e os aspectos teóricos das três ferramentas básicas: Sensoriamento Remoto, Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Modelagem Numérica do Terreno (MNTs), são encontrados no Capítulo 3. Esse Capítulo enfoca também as principais características do Sistema Orbital LANDSAT, sensor TM, a partir do qual são obtidas as imagens digitais envolvidas na pesquisa.

O Capítulo 4 constitui-se na metodologia propriamente dita. Nele estão relacionadas todas as informações empregadas e as suas respectivas fontes. Estão descritos os processos de classificação de imagens orbitais utilizados, os planos de informações definidos e os diversos modelos de cruzamentos estabelecidos para um SIG, visando o estudo da expansão urbana e sua interação com determinados aspectos do meio físico.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações quanto à metodologia proposta e o resultado da sua aplicação na área teste.

1.5 - A ÁREA TESTE

A área teste escolhida para a aplicação da metodologia é a sub-bacia do Arroio Feijó, pertencente à bacia do Rio Gravataí, na Região Metropolitana de Porto Alegre, porção centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul. A sub-bacia situa-se entre os pontos de coordenadas A (N = 6686000; E =

496000), B (N = 6670000; E = 496000), C (N = 6670000; E = 488000) e D (N = 6686000; E = 488000), conforme mostra a Figura 1.1.

De acordo com Silva *et al.* (1992) a população da sub-bacia, que tem uma área de 5.712 ha, é de 205.000 habitantes, distribuídos entre os municípios de Alvorada, Porto Alegre e Viamão. Caracteriza-se, portanto, por uma elevada densidade populacional. A área é marcada pela implantação de grandes loteamentos como o Jardim Algarve, pela existência de vilas irregulares e áreas inundáveis e pela ocorrência de processos erosivos que contribuem para o assoreamento do Arroio Feijó.

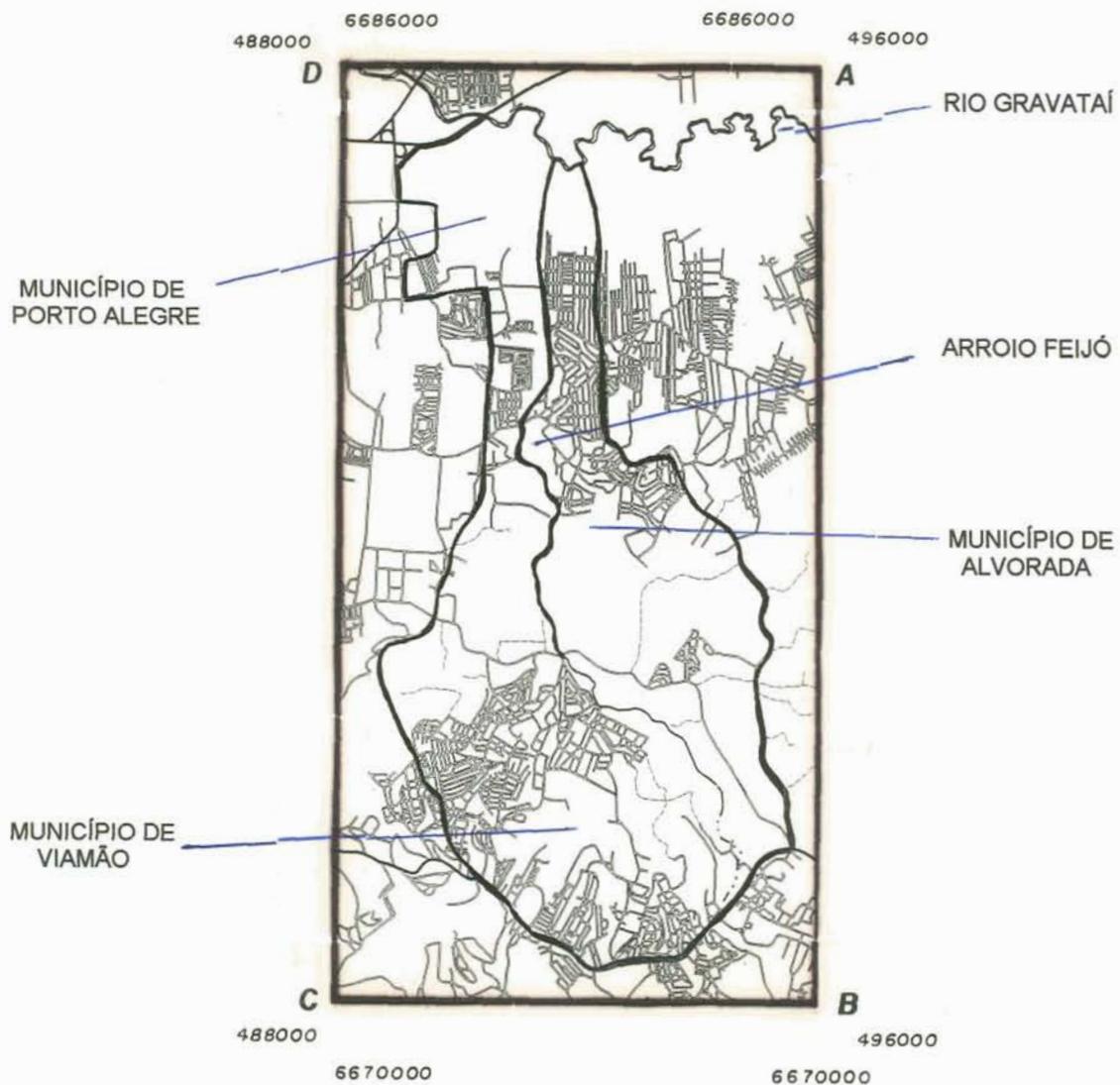


Figura 1.1 - Área da sub-bacia do Arroio Feijó.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - SENSORIAMENTO REMOTO A NÍVEL ORBITAL E ESTUDOS URBANOS

2.1.1 - GENERALIDADES

A importância do emprego das técnicas de Sensoriamento Remoto a nível orbital na elaboração das políticas de planejamento urbano e regional é destacada por Vieira *et al.* (1990). Segundo os autores, a tomada de decisões e a elaboração de propostas para a melhoria da qualidade de vida nas cidades depende do conhecimento das tendências e das alterações ocorridas no contexto urbano.

Nesse sentido, os dados obtidos através de sensores orbitais, permitem graças à sua repetitividade e resoluções espacial e espectral captar as tendências de expansão das áreas urbanas com boa precisão, registrar, periodicamente, as relações indiretas entre os fenômenos urbanos e seu ambiente regional e identificar o desenvolvimento urbano em locais inadequados, como por exemplo, a ocupação de áreas de relevo com alta declividade (Foresti *et al.*, 1989).

No entanto, conforme França *et al.* (1993), essa tecnologia quando aplicada em análises urbanas pode ser dividida em dois grandes grupos de estudos: estudos intra-urbanos e estudos inter-urbano (Figura 2.1)

Atualmente, a maioria dos trabalhos com abordagem inter-urbana diz respeito ao exame do crescimento e da expansão das áreas metropolitanas.

Já os estudos realizados com enfoque intra-urbano preocupam-se, sobretudo, em definir o uso do solo.

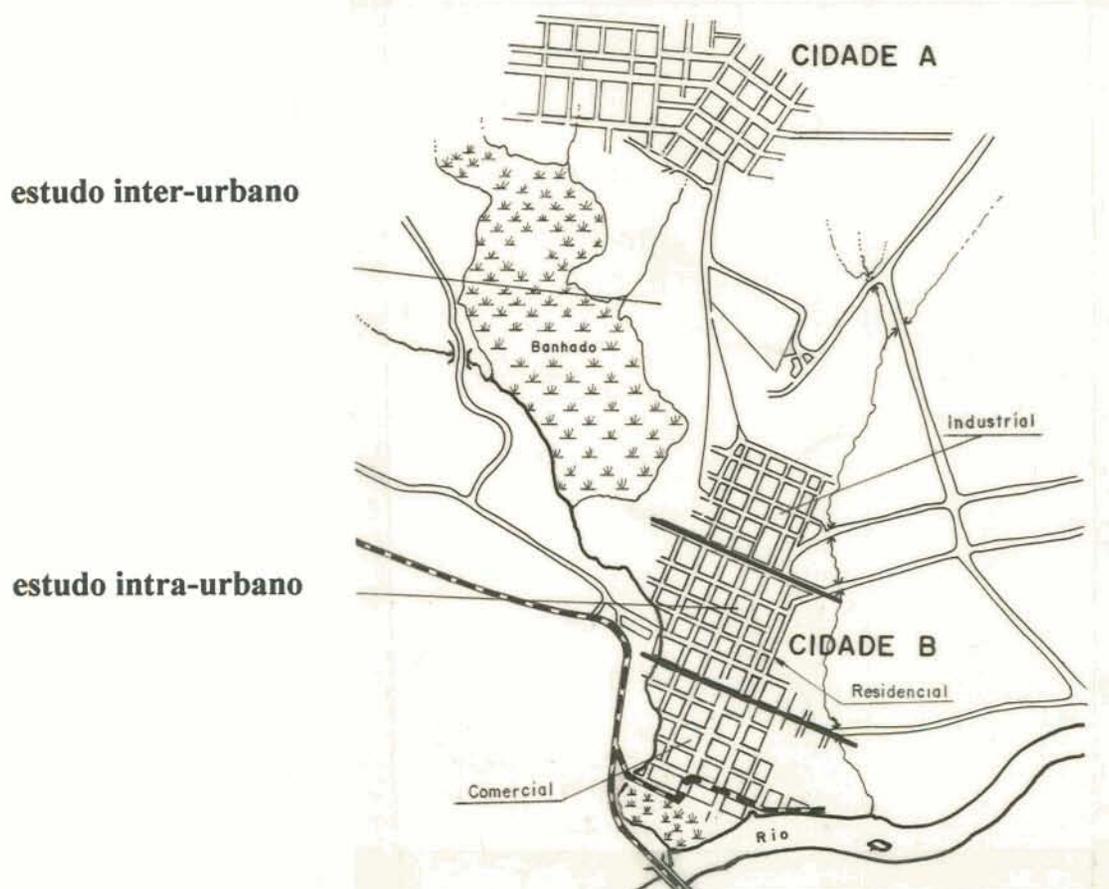


Figura 2.1 - Classificação dos estudos urbanos através de Sensoriamento Remoto a nível orbital.

Fonte: baseado em França *et al.* (1993).

Por outro lado, as vantagens proporcionadas com o emprego das imagens orbitais na avaliação do crescimento urbano foram relacionadas por Kurkdjian (1988):

" a capacidade dos sistemas sensores orbitais gerarem produtos em diferentes faixas espectrais (MSS LANDSAT em 4 faixas, TM LANDSAT em 7 faixas, HRV SPOT em 4 faixas - 3 no modo multi-espectral e 1 no modo pancromático), torna possível estudar o crescimento das cidades através da análise de diferentes

elementos que compõem o espaço urbano e seu entorno, os quais são melhor identificados em determinadas faixas do espectro;

. a visão integrada do espaço urbano-regional conseguida, sobretudo, através das composições multiespectrais coloridas, que combinam até 3 faixas do espectro eletromagnético, permite perceber as inter-relações entre os diferentes componentes da paisagem;

. a visão sinótica da cidade e seu entorno, oferecida pelas imagens orbitais, geradas por equipamentos colocados a centenas de quilômetros da Terra, facilita apreender a distribuição espacial dos diferentes elementos da estrutura urbana e regional, como as ligações entre eles;

. a oportunidade de trabalhar com os dados orbitais em diferentes escalas, possibilita desde uma visão sinótica do espaço urbano até uma visão detalhada, compatível com a visão espacial do sistema sensor utilizado...;

. a possibilidade de análise temporal do fenômeno urbano-rural, graças ao recobrimento repetitivo de um mesmo ponto de superfície da Terra pelas passagens sucessivas do(s) satélite(s), permite acompanhar a expansão urbana e as alterações que ocorram em sua estrutura;

. a possibilidade de processamento digital de imagens, permite o uso de técnicas de realce e de registro de imagem facilitando a detecção das alterações de uso da terra e avaliar a expansão urbana de forma mais rápida e eficiente.

Françoso *et al.*(1993) descreveram, por sua vez, algumas limitações apresentadas pelas imagens de satélite nos estudos de delimitação de áreas urbanas:

". o fenômeno da conurbação existente nas áreas metropolitanas, impede a visualização nítida das partes que a constituem;

. cidades de tamanho reduzido dificultam as leituras de alguns sensores de baixa resolução;

. a irregularidade nas bordas e o relevo acidentado (sombreamento) dificultam a delimitação da área urbana;

. nas cidades litorâneas surge o problema de reflectância das areias, que em alguns casos podem ser confundidas com áreas construídas."

2.1.2 - ÁREAS URBANAS E RESOLUÇÃO ESPACIAL

A constituição do espaço intra-urbano apresenta grande complexidade. Além de apresentarem dimensões e espaçamentos variados, parques, estacionamentos, edifícios, sistema viário, construções, etc, são também formados por uma grande diversidade de materiais, exigindo alta resolução espacial dos sistemas sensores.

De acordo com Welch (1982), para a determinação das resoluções espaciais a fim de estudar as áreas urbanas é indispensável a análise do tamanho, da densidade e contrastes das feições tipicamente encontradas nos ambientes urbanos ao redor do mundo. Para o autor serão esses parâmetros que definirão a resolução espacial necessária para a análise das cidades nas diversas regiões geográficas do planeta.

Segundo Lo e Welch (1977), apud Jensen *et al.* (1983) e Welch (1982), as dimensões das áreas construídas e a densidade por unidade de área de edificações das cidades com população entre 50.000 e 500.000 habitantes variam de acordo com o país em que se localizam, conforme Tabelas 2.1 e 2.2, que tomam como unidade os valores encontrados para os Estados Unidos.

Observa-se assim, que as estruturas urbanas encontradas em diferentes países, quando comparadas com os Estados Unidos e Canadá por exemplo, são menores e/ou mais concentradas espacialmente, abrigando um número maior de habitantes por superfície equivalente (Jensen *et al.*, 1983). Portanto, estudos do uso do solo urbano na Europa ou na Ásia provavelmente necessitam de imagens com maior resolução espacial do que nos Estados Unidos e Canadá (Welch, 1982).

Um outro fator que influencia na resolução espacial, segundo Welch (1982), é o contraste existente entre os vários alvos urbanos, ou seja, a variação do brilho na resposta espectral entre os diferentes alvos existentes nas cidades e que tem comportamento distinto para países em diferentes estágios de desenvolvimento.

Dessa forma, em países desenvolvidos, esse contraste é mais acentuado tendo em vista a existência de grandes áreas verdes, extensos gramados, avenidas arborizadas ou limitadas por áreas gramadas e espelhos d'água, que destacam-se das edificações e demais elementos integrantes da paisagem urbana.

Já nos países em desenvolvimento o emprego em menor escala de áreas gramadas e os materiais normalmente utilizados nas edificações fazem com

que as estruturas urbanas sejam menos destacadas da paisagem de fundo, reduzindo o contraste e exigindo maior resolução espacial para a definição de detalhes intra-urbanos.

Tabela 2.1 - Dimensões relativas do tamanho das áreas urbanas das cidades com populações entre 50.000 e 500.000 habitantes.

PAÍS	DIMENSÕES RELATIVAS
Estados Unidos	1,00
Canadá	0,60
Suécia	0,15
Japão	0,11
China	0,03

Fonte: Tobler (1969), Lo e Welch (1977), apud Jensen *et al.* (1983)
Welch (1982)

Tabela 2.2 - Densidade relativa aproximada das edificações nas áreas urbanas em diferentes países

PAÍS	DENSIDADE RELATIVA APROXIMADA DENSIDADE/UNIDADE DE ÁREA
Estados Unidos	1,0
Canadá	1,6
Suécia	6,6
Japão	9,1
China	33,3

Fonte: Tobler (1969), Lo e Welch (1977), apud Jensen *et al.* (1983)
Welch (1982)

Welch (1982) exemplifica ainda a variação da frequência espacial, caracterizada pelas dimensões e pela densidade, e os contrastes das estruturas urbanas para os Estados Unidos e a China, países em estágios distintos de desenvolvimento (Figura 2.2).

Logo, é evidente a necessidade de variação da resolução espacial do sistema de sensoriamento utilizado em função da região imageada.

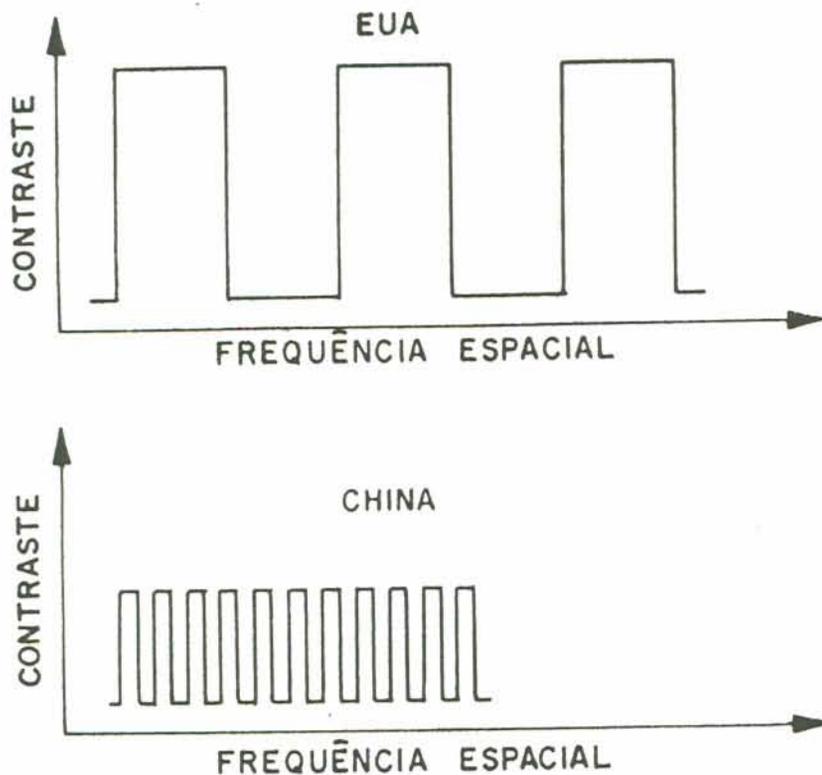


Figura 2.2 - Frequência espacial relativa e contraste de estruturas urbanas nos Estados Unidos e na China.
 Fonte: Welch (1982)

Welch (1982) realizou também estudos sobre relações entre resolução espacial, níveis de classificação para o mapeamento do uso do solo e IFOVs ("instantaneous field of view") para identificação de áreas urbanas em diferentes países (Figuras 2.3 e 2.4). Os valores de resolução espacial foram fornecidos em termos de IFOV a fim de facilitar comparações. Os níveis de classificação utilizados são padrões de classificação do uso da terra, baseado na capacidade de detecção das várias técnicas de Sensoriamento Remoto. No caso em questão, o autor empregou os níveis de classificação propostos por Anderson *et al.* (1976), apresentados na Tabela 2.4.

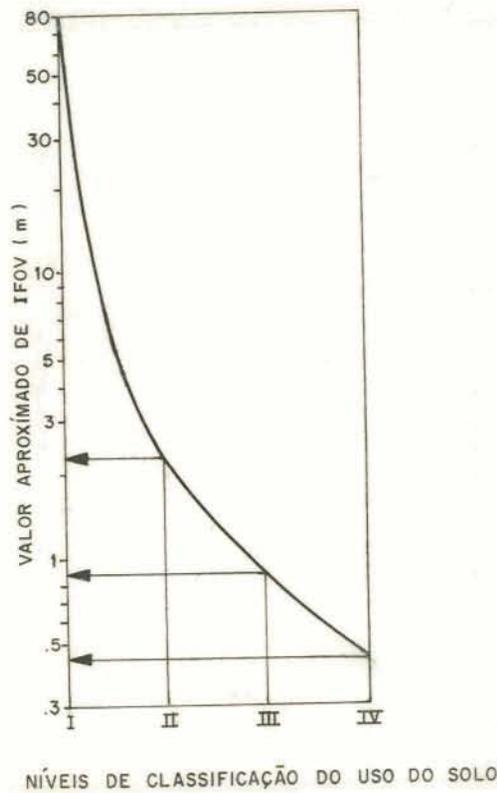


Figura 2.3 - Resolução (IFOV) para mapeamento do uso do solo em função dos níveis de classificação propostos por Anderson *et al.* (1976).
 Fonte: Welch (1982) e Jensen *et al.* (1983).

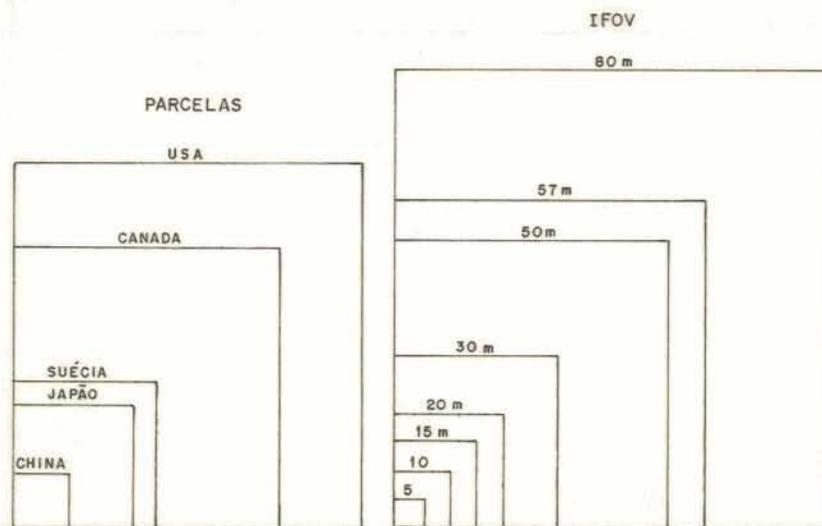


Figura 2.4 - Comparação entre as dimensões de parcelas representativas do solo urbano em diferentes países e IFOVs para os sistemas sensores em satélites
 Fonte: Welch (1982) e Jensen *et al.* (1983)

Welch (1982) e Jensen *et al.*(1983) ilustram ainda o problema na classificação do solo urbano através do gráfico mostrado na Figura 2.5.

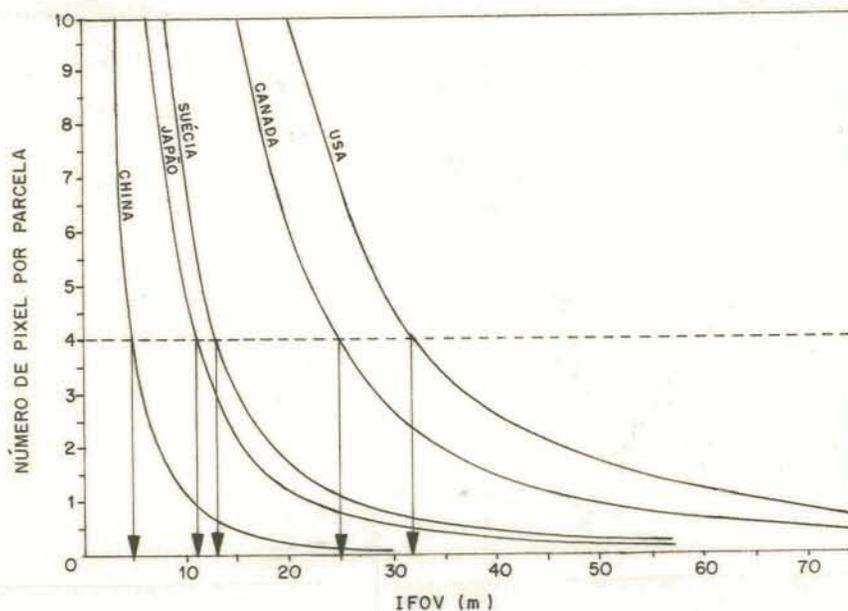


Figura 2.5 - IFOV contidos dentro de parcelas representativas do solo urbano em diferentes países e IFOVs dos sistemas sensores dos satélites.
Fonte: Welch (1982) e Jensen *et al.*(1983)

Welch (1982) exemplifica que se considerarmos como necessário um mínimo de 4 pixels para uma classificação correta de um alvo urbano, um sensor com um IFOV de 5 a 10 m será necessário para estudos nas cidades asiáticas, enquanto 30 m pode ser adequado para a análise de algumas áreas urbanas nos Estados Unidos.

Em geral, conclui Clark (1982), sensores com IFOVs de 0,5 a 10 m são necessários para capturar detalhes correspondentes às frequências espaciais altas e aos baixos contraste das feições características das áreas urbanas. Jensen (1983), por sua vez, sugere sistemas sensores com IFOV de 5 m, no mínimo, para a identificação de alvos intra-urbanos através de classificação visual de imagens.

Segundo França *et al.*(1993), o aumento da capacidade de resolução dos satélites e a evolução das pesquisas das técnicas de obtenção, tratamento e interpretação das imagens orbitais para planejamento urbano vem crescendo gradativamente. O satélite francês SPOT, por exemplo, lançado em

1986, apresenta uma resolução espacial (10 m no modo pancromático e 20 m no modo multiespectral) maior que o LANDSAT, (30m para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7), facilitando a interpretação de ocorrências intra-urbanas.

Uma outra abordagem possível para utilização de imagens a nível orbital em áreas urbanas é aquela fornecida pelos modelos de "mistura espectral". Esses modelos estimam a proporção com que duas ou mais classes espectrais entram na composição de um mesmo pixel. Em outras palavras, o modelo de mistura espectral permite estender o processo de classificação por computador ao nível de sub-pixel. Essa possibilidade abre caminhos extremamente interessantes no estudo de áreas urbanas (Campana, 1992).

2.1.3 - ÁREAS URBANAS E NATUREZA ESPECTRAL DOS ALVOS

É de fundamental importância para qualquer análise via Sensoriamento Remoto, o comportamento espectral do alvos existentes na cena em estudo.

No caso específico das áreas urbanas, os principais materiais encontrados podem ser diferenciados um dos outros na região visível do espectro e no infra-vermelho próximo (Jensen *et al.*, 1983).

No entanto, conforme Slater (1975), apud Jensen *et al.* (1983), a assinatura espectral não é constante para um determinado alvo urbano. Depende da distribuição espacial do fluxo radiante incidente no objeto, das relações geométricas entre a direção da radiação incidente e a de visada do sensor, dos efeitos atmosféricos e das propriedades físicas do alvo.

Por outro lado, muitos materiais fabricados pelo homem e que integram a cena urbana apresentam respostas espectrais semelhantes, dificultando a sua identificação.

Deve considerar-se ainda, as inúmeras combinações entre os diversos materiais existentes no processo de ocupação do solo com os diferentes usos (Kurkdjian, 1990).

Além disso, ao contrário dos estudos a nível regional, onde normalmente as parcelas do solo a serem classificadas apresentam dimensões maiores do que a área de abrangência de um pixel (IFOV) ou elemento da imagem, nas áreas urbanas um único pixel poderá conter a resposta espectral decorrente da soma das reflectâncias de diversos alvos da cena como concreto,

grama, telhados e outros. Esse valor de reflectância, conforme Kurkdjian & Li (1989), nem sempre é relacionado ao uso do solo dominante na área. Pode ocorrer que a resultante da integração seja semelhante à reflectância de uma cobertura do solo totalmente diferente.

Esses dois fatores dificultam a discriminação de uma classe especial de informação de outra, baseada somente na sua característica espectral. As vezes torna-se necessários dados complementares obtidos através de outros sistemas de sensores como aerofotografias, imagens multiespectrais por meio de scanners aerotransportados e imagens de radar.

Por esses motivos, Khorram *et al.* (1991) salientam a dificuldade da aplicação de algoritmos para a classificação em computador de imagens de áreas urbanas. Segundos os autores os métodos de classificação pixel a pixel como classificação supervisionada ou não supervisionada ainda não apresentam a capacidade de distinguir espectralmente objetos distintos, mas com reflectância similares como acontece nas cidades.

Forster (1985) trata também da problemática para aplicação dos processos de classificação digital por computador nas áreas urbanas, tendo em vista a não homogeneidade espectral dentro das classes. O autor destaca ainda um outro aspecto que afeta o estudo das áreas urbanas que é a atenuação ou visibilidade atmosférica. Por ser dependente da poluição, essa visibilidade pode assumir intensidades diferentes em zonas distintas de uma mesma grande cidade, afetando de forma desigual a resposta espectral da cena.

De qualquer forma, o conhecimento das bandas mais adequadas disponíveis para a diferenciação das classes que ocorrem nas áreas urbanas é fundamental para a interpretação e classificação de imagens orbitais, tanto por processos visuais como por processos digitais através de computador.

Assim, de acordo com Short (1982), para o sensor MSS/LANDSAT, as bandas mais adequadas para caracterizar as áreas urbanas são a 5 ($0,6\mu\text{m} - 0,7\mu\text{m}$) e a 7 ($0,8\mu\text{m} - 1,1\mu\text{m}$).

Para o sensor TM/LANDSAT, segundo Costa & Foresti (1989), os limites urbanos são mais fáceis de serem identificados na banda 3 ($0,63\mu\text{m} - 0,69\mu\text{m}$), que apresenta um melhor contraste, do que as bandas 1 ($0,45\mu\text{m} - 0,52\mu\text{m}$) e 2 ($0,52\mu\text{m} - 0,60\mu\text{m}$) da região do espectro visível.

Nesse caso, a banda 1, além de apresentar pouco contraste entre a classe urbana e não urbana, sofre forte influência atmosférica, havendo portanto um excesso de brilho na cena. Deve considerar-se ainda a perda da nitidez da imagem devido ao forte espalhamento atmosférico que afeta a própria geometria de propagação dos raios luminosos.

A banda 2, apesar de apresentar maior nitidez do que a anterior, sofre ainda a influência da bruma atmosférica, reduzindo também o contraste da imagem.

Os limites urbanos não são diferenciados com nitidez nas bandas 4 ($0,76\mu\text{m} - 0,90\mu\text{m}$) e 5 ($1,55\mu\text{m} - 1,75\mu\text{m}$) do sensor TM/LANDSAT. A banda 4, no entanto, situada na faixa do infravermelho próximo do espectro, ressalta a vegetação em tons de cinza-claro e com maior eficiência do que as bandas 1, 2 e 3. Já a banda 5, apresenta visualmente uma grande diversidade de tons de cinza, evidenciando um maior número de detalhes da cena do que as bandas anteriores. É indicada para a diferenciação de mais de duas classes. Porém, as áreas urbana e não-urbana mostram tonalidades semelhantes.

Finalmente, ainda de acordo com Costa & Foresti (1989), a banda 7 ($2,08\mu\text{m} - 2,35\mu\text{m}$) do sensor TM/LANDSAT possui bom contraste tonal entre o urbano e o não-urbano, embora apresente menor diversidade de tons de cinza do que a banda 5. Portanto, as classes urbanas e não-urbanas são também facilmente separáveis nessa banda.

Já as curvas de reflectância espectral dos principais materiais encontrados nas áreas urbanas foram obtidas por Jensen *et al.* (1983) através de espectrorradiômetro (Figura 2.6).

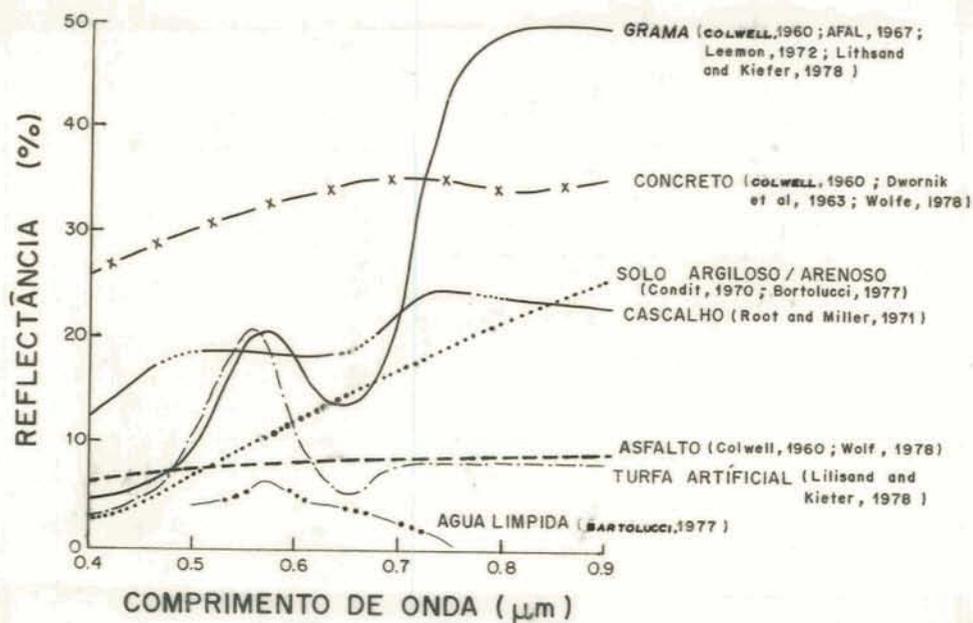


Figura 2.6 - Curvas da reflectância espectral de materiais encontrados nas áreas urbanas.

Fonte: Jensen *et al.* (1983)

2.1.4 - ÁREAS URBANAS E RESOLUÇÃO TEMPORAL

As técnicas de Sensoriamento Remoto via orbital, devido ao recobrimento repetitivo de um mesmo ponto da superfície da Terra pelas passagens sucessivas dos satélites, permitem acompanhar a evolução dos fenômenos urbanos e urbano-rurais a intervalos regulares de tempo.

Cabe lembrar que a série LANDSAT fornece imagens da superfície da Terra a cada 16 dias.

Jensen *et al.*(1983) apresenta a periodicidade aconselhável para a obtenção de dados via Sensoriamento Remoto para estudos em áreas urbanas. Entre as diversas aplicações previstas pelo autor destaca-se a análise da alteração do uso do solo (rural x urbano) para a qual é indicado um intervalo de tempo entre cinco e dez anos.

2.1.5 - SENSORIAMENTO REMOTO A NÍVEL ORBITAL E MONITORAMENTO DA EXPANSÃO URBANA

Inúmeros trabalhos foram desenvolvidos aplicando técnicas de Sensoriamento Remoto no monitoramento e mapeamento da expansão dos aglomerados urbanos.

Niero *et al.*(1982) utilizaram imagens orbitais no monitoramento da expansão urbana em áreas de proteção aos mananciais, da Grande São Paulo. Através de dados obtidos pelo sistema LANDSAT (MSS, RBV), monitoraram a área urbana, analisaram a resposta espectral na franja rural-urbana para diferentes períodos sazonais e realizaram o mapeamento e a avaliação da expansão urbana no período de 1977 a 1979. A aplicação de técnicas de interpretação visual e digital aos dados mostrou uma taxa de crescimento de 28,7% no período de 1977 a 1979 para a área estudada.

Foresti & Niero (1978), estimaram a taxa de crescimento da área metropolitana de São Paulo, a partir de 1973, utilizando dados do sistema LANDSAT, analisados através de interpretação visual e classificação de imagens em forma digital.

A classificação visual foi realizada em imagens na base fotográficas do sensor MSS, banda 5, na escala 1:250.000, para os anos de 1973, 1975 e 1977. Para a delimitação da mancha urbana contínua foram

confeccionados "overlays" para os quatro períodos estudados. Os rios e corpos d'água foram identificados através da banda 7-MSS, sendo então utilizados como pontos de referência na análise sequencial dos dados urbanos.

Na interpretação digital, foi utilizado a opção de classificação "Máxima Verossimilhança", disponível no sistema IMAGE-100.

Foram levantadas as classes: corpos d'água, mata, parques, centro, urbana 1 (área contígua ao centro), urbana 2 (área residencial unifamiliar de renda econômica alta), urbana 3 (área residencial unifamiliar de renda econômica baixa, e loteamentos. Posteriormente, pode ser visualizada e calculada a área total urbanizada.

O estudo confirmou a viabilidade de utilização de dados do sistema LANDSAT para a análise de regiões que apresentam intenso processo de urbanização.

Foresti (1978) utilizou o IMAGE-100 para o monitoramento do crescimento da área urbana de São José dos Campos. Foram superpostas as imagens de 08/09/72 e 26/06/76 e realizada a classificação digital de área urbana nas duas datas. O crescimento da área urbana de São José dos Campos no período estudado foi caracterizado pelo aumento e diversificação nos tipos de uso do solo urbano industrial e residencial unifamiliar. O cálculo da área urbana de 1972, foi de 30 km² e de 41 km² para o ano de 1976, representando uma expansão em superfície de 37% em aproximadamente 4 anos. A superposição da área total, classificada no sistema IMAGE-100, nas duas datas analisadas, mostrou a tendência de expansão urbana, especialmente seguindo o eixo rodoviário Rio - São Paulo, a NE e SE de São José dos Campos.

Empregando dados orbitais de sensores Remotos em diferentes níveis e escalas de observação, Foresti (1987) propôs uma metodologia para estudo da expansão e estruturação do espaço urbano em áreas metropolitanas. A autora utilizou como área experimental o setor oeste da Área metropolitana de São Paulo. Através de composição colorida multitemporal, foram avaliadas as alterações ocorridas na estrutura urbana no intervalo de tempo estabelecido.

A análise do uso do solo foi realizada inicialmente por composição colorida obtida da combinação das bandas 4, 3 e 5, sensor TM-LANDSAT, na sequência RGB respectivamente e escala 1:50.0000, complementada a partir de dados pancromáticos do sensor HRV - SPOT, com verificações de campo e sobrevôo de helicóptero.

O trabalho discutiu também os problemas ambientais decorrentes do uso e ocupação desordenada do solo e a inexistência de planejamento e administração integrada para os municípios integrantes das regiões

metropolitanas no Brasil. Os resultados obtidos destacaram a importância dos dados de Sensoriamento orbital na avaliação e monitoramento ambiental da expansão urbana.

Visando o monitoramento de áreas urbanas, Costa & Foresti (1989) aplicaram a distância JM (distância JEFreys-Matusita) para selecionar a banda TM mais adequada para a delimitação urbana nos períodos seco e chuvoso. Para o período seco a banda que se mostrou mais adequada foi a banda 1 (0,45 μ m - 0,52 μ m) e para o período chuvoso foi a banda 3 (0,63 μ m - 0,69 μ m). Os autores concluíram ainda que para o estudo de áreas urbanas a prioridade deve ser dada para o período chuvoso, visto que é nesta estação que o contraste entre o urbano e o não-urbano é mais acentuado.

Foresti *et al.*(1978) também destacaram o período chuvoso como mais indicado para a delimitação de áreas urbanas tendo em vista a ocorrência de um maior contraste entre a vegetação e áreas edificadas. Mas lembraram a impossibilidade da utilização de imagens em período chuvoso para todos os anos analisados no trabalho desenvolvido devido a cobertura de nuvens.

Andrade e Pereira (1989) utilizaram características texturais, resultantes da variabilidade espectral característica de áreas urbanas, para identificação de áreas urbanizadas. A área teste escolhida foi a cidade de São José dos Campos, tendo sido analisada a partir do algoritmo de Maxima Verossimilhança Gaussiana, usando atributos espectrais associados à bandas adicionais denominadas "bandas de textura", que representam uma medida da variabilidade espectral em torno de cada pixel de imagem. Segundo os autores, os resultados obtidos mostraram melhor desempenho do que aqueles decorrentes da utilização de apenas atributos espectrais.

Para Foresti (1978), existem ainda problemas de delimitação de áreas urbanas localizadas em regiões de relevo movimentado devido ao sombreamento e na franja rural-urbana, quando ocupada pela agricultura. Nesse último caso, as respostas espectrais das diferentes classes de cobertura do solo podem ser semelhantes em determinados períodos do ano. Daí novamente a recomendação quanto a utilização de imagens de períodos chuvosos, quando a vegetação apresenta-se mais compacta e oferece maior contraste entre as áreas edificadas e seus arredores.

Apesar das dificuldades, França *et al.*(1993), concluíram que as técnicas de Sensoriamento Remoto através de imagens orbitais são insuperáveis a nível de rapidez comparadas às técnicas convencionais (aerofotografia). Ao propiciarem uma visão integrada do espaço urbano-regional e a percepção das suas inter-relações, tornaram-se fundamentais para o monitoramento dos limites das cidades e análise do seu crescimento.

2.1.6 - SENSORIAMENTO REMOTO A NÍVEL ORBITAL E ESTUDOS INTRA-URBANOS

Para o estudo do espaço intra-urbano por meio de Sensoriamento Remoto, existem ainda limitações quanto ao uso das imagens orbitais.

Isto ocorre, como já foi citado anteriormente, na medida em que os alvos urbanos, constituídos pelas edificações residenciais e comerciais, indústrias, parques e praças, áreas de estacionamento, sistema viário e outros, com suas diferentes respostas espectrais, dimensões e espaçamentos, geram uma estrutura complexa e exigem dos sistemas sensores altas resoluções espacial e espectral. No entanto, os sensores orbitais hoje disponíveis não oferecem a resolução espacial necessária para um completo reconhecimento e classificação do alvos existentes na paisagem urbana.

Apesar disso, um grande número de pesquisadores têm buscado a identificação e o mapeamento da cobertura e do uso do solo urbano por meio de imagens orbitais, visando corrigir e prevenir os efeitos sobre o ambiente do uso desordenado da terra, como por exemplo processos de erosão intensos, inundações, assoreamento de reservatórios e cursos d'água.

Na bibliografia sobre a análise e o monitoramento do uso e cobertura da terra encontra-se referência aos termos "land user" e "land cover".

Land cover refere-se à cobertura ou revestimento da terra, enquanto land use diz respeito ao uso do solo (Jensen *et al.*, 1983).

Novo (1989) exemplifica essa distinção: "...áreas florestais que, embora sejam de um só tipo sob o ponto de vista de cobertura, podem ter diferentes usos: lazer, exploração de madeira, reservas biológicas, etc."

Em estudos visando o planejamento urbano, a cobertura do solo poderá ser classificada em termos gerais como área urbana e área não-urbana, enquanto o uso do solo poderá ser residencial, comercial, industrial, etc.

Mas, para o mapeamento do uso ou cobertura do solo urbano ou rural torna-se fundamental a definição de um sistemas de classificação que permita a incorporação hierárquica da informação, de acordo com os diferentes níveis de aquisição dos dados coletados

Nesse sentido, Anderson *et al.*(1976), *apud* Jensen *et al.*(1983) propuseram níveis de classificação do uso do solo por Sensoriamento Remoto de acordo com a resolução espacial da imagem. O nível I corresponde à máxima generalização da informação, enquanto o nível IV a seu máximo detalhamento. O

sistema foi desenvolvido pela U.S. Geological Survey, para os Estados Unidos e encontra-se na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Níveis de Classificação do Uso da Terra, segundo Anderson *et al.*, 1976.

NÍVEL	CARACTERÍSTICAS DOS DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO
I	Dados orbitais
II	Aeronave em alta altitude - 12.400m ou acima Escala < 1:80.000
III	Aeronave em média altitude - 3.100 a 12.400m Escala 1:20.000 a 1:80.000
IV	Aeronave em baixa altitude - 3.100m Escala > 1:20.000

Fonte: Jensen *et al.* (1983)

Em função das características peculiares de cada região em estudo, a obtenção dos níveis acima poderá ser obtido por outros processos além dos especificados na Tabela 2.3.

A Tabela 2.4 apresenta o sistema de classificação para os níveis I e II, segundo Anderson *et al.* (1976).

Outros sistemas de classificação do uso da terra foram desenvolvidos como o da Universidade de Michigan (Tabela 2.5).

Segundo Novo (1978) é preferível definir as classes com precisão para um dado mapeamento do que adotar um sistema rígido de classificação.

Evidentemente, quanto maior o nível de detalhamento pretendido para o mapeamento do uso do solo urbano, mais altas devem ser as resoluções espectral e espacial do produto de Sensoriamento Remoto a ser utilizado no levantamento (Kurkdjian & Li, 1989).

Tabela 2.4 - Sistema de Classificação (níveis I e II) para Uso e Cobertura do Solo através de Sensoriamento Remoto, segundo Anderson *et al.*, 1976.

Nível I	Nível II
1. Área urbana construída	11. Residencial 12. Comercial e serviços 13. Industrial 14. Transporte, comunicações e utilidades 15. Complexos industriais e comerciais 16. Terra urbana ou construída mista 17. Terra urbana diversas ou construída
2. Terra agrícola	21. Terra de cultura e pastagens 22. Pomares, bosques, vinhedos e áreas de horticultura ornamental 23. Atividades de criação confinada 24. Outros tipos de terra agrícola
3. Pastagem	31. Pastagem herbácea 32. Pastagem com arbusto e carrasco 33. Pastagem mista
4. Terra florestal	41. Terra de floresta decídua 42. Terra de floresta sempre verde 43. Terra de floresta mista
5. Água	51. Cursos d'água e canais 52. Lagos 53. Reservatórios 54. Baía e estuários
6. Terra úmida	61. Terra úmida florestada 62. Terra úmida não florestada
7. Terra árida	71. Planícies salgadas secas 72. Praias 73. Outras áreas de areia que não sejam praias 74. Rocha nua exposta 75. Minas a céu aberto, pedreiras, e minas de cascalho 76. Áreas de transição 77. Terra árida mista
8. Tundra	81. Tundra de arbustos e macega 82. Tundra herbácea 83. Tundra de solo nu 84. Tundra úmida 85. Tundra mista
9. Neve ou gelo perene	91. Campos de neve perene 92. Geleiras

Fonte: Jensen *et al.* (1983)

Tabela 2.5 - Características do Sistema de Classificação do Uso da Terra por Sensoriamento Remoto - Universidade de Michigan.

CRITÉRIOS	NÍVEL I	NÍVEL II	NÍVEL III	NÍVEL IV
Utilização Principal	Nacional	Nacional	Estadual Regional	Estadual Regional
Escala de mapeamento	1:250.000 a 1:1000.000	1:125.000 a 1:250.000	1:50.000 a 1:125.000	1:25.000 a 1:50.000
Mínima unidade mapeável	94 ha a 1480 ha	24 ha a 94 ha	4 ha a 94 ha	0,8 ha - 4ha
Base para classificação	cobertura do solo	cobertura do solo	cobertura e atividade	cobertura e atividade
Fontes de dados	interpretação de imagem	interpretação de imagem	Interpretação de imagem e dados de campo	Interpretação de imagem e dados de campo

Fonte: Jensen *et al.* (1983) e Novo (1989)

Muitos trabalhos com enfoque inter-urbano têm utilizado com sucesso o emprego simultâneo de imagens orbitais e aerofotografias.

Foresti (1986), por exemplo, realizou através da análise de dados e técnicas de Sensoriamento Remoto a avaliação e o monitoramento ambiental da expansão urbana do setor oeste da área metropolitana de São Paulo. No mesmo estudo, foi utilizado o índice de vegetação IVT (Índice de Vegetação Transformado), proposto por Rouse *et al.* (1973), como indicador da qualidade de vida urbana.

O monitoramento da expansão urbana realizou-se em intervalos de dois em dois anos a partir de 1975 até o ano de 1985. Para a demilitação da mancha urbana contínua foi utilizada interpretação visual de imagens orbitais em papel, na escala 1:250.000, nas bandas MSS-5, TM-3, e também composições coloridas em falsa-cor.

Fotografias aéreas pancromáticas na escala 1:35.000 serviram como ponto de apoio na interpretação de imagens orbitais e no trabalho de campo,

como também para a obtenção de algumas medidas de índices de cobertura vegetal e impermeabilização do solo.

Segundo a autora, o IVT mostrou-se eficiente como indicador de qualidade de vida urbana em regiões onde a infra-estrutura de saneamento básico encontrava-se padronizada. A cobertura vegetal revelou-se também como o mais importante elemento indicador de alterações de equilíbrio ambiental, passível de ser monitorado através de sistemas orbitais de Sensoriamento Remoto. Os melhores produtos obtidos para o estudo urbano foram as composições coloridas envolvendo as bandas TM 2, 7 e 4 e ainda as bandas 5, 3 e 4.

Pereira *et al.* (1987) utilizaram fotografias aéreas e imagens TM/LANDSAT no mapeamento do uso da terra do município de São José dos Campos, como subsídio para a elaboração do Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado (PDDI). O trabalho apresentou também uma legenda de uso da terra e chaves de identificação para fotografias aéreas e imagens TM.

Coelho & Pitanga (1982) empregaram técnicas de Sensoriamento Remoto para avaliar a evolução do uso e a cobertura do solo da cidade do Rio de Janeiro no período de 1972 a 1980. Os estudos foram representados sob a forma de um conjunto de cartas, mostrando a evolução espacial e dinâmica do processo de transformação no uso da terra daquela cidade. O resultado obtido viabilizou a implantação de medidas preventivas com vista ao reestabelecimento do equilíbrio ecológico da região. Foram empregadas imagens orbitais LANDSAT-MSS e Skylab (sensores S-190 A e S-190 B), imagens de radar e aerofotografias nas escalas 1:8000 e 1:40.000.

Por outro lado, métodos de processamento automático de imagens digitais multiespectrais têm sido usados para adequá-las melhor à utilização tanto em estudos intra-urbanos quanto inter-urbanos. Entre eles destacam-se a Transformação IHS (Intensity, Hue, Saturation) e a filtragem de frequência espaciais.

A Transformação IHS envolve uma decomposição de uma imagem colorida RGB (vermelho, verde e azul, cores básicas fundamentais) em componentes de intensidade, matiz e saturação. Tem por finalidade maior a obtenção de produtos híbridos resultantes da integração de produtos de diferentes resoluções espectrais e espaciais, mas conservando as vantagens oferecidas por cada um dos produtos isoladamente.

Kurkdjian e Li (1989) estudaram a integração de imagem SPOT multiespectral e aerofoto pancromática para análise do uso do solo urbano. Aplicaram a transformação IHS para integrar em um produto colorido, dados SPOT-XS e de aerofoto pancromática com resolução espacial de 3,5 metros. O produto final, em escala da ordem de 1:6000 realçou visualmente os dados

originais e permitiu uma análise melhor das classes de uso do solo na área teste. Dessa forma, a aplicação dessa técnica permitiu preservar a melhor resolução espacial da aerofoto, adicionando a ela a resolução espectral da imagem orbital.

Kurkdjian (1990) realizou também a integração de dados de diferentes sistemas sensores através da técnica da transformação IHS, visando o estudo da estrutura intra-urbana. Foram gerados produtos híbridos pela integração da composição TM 4, 3 e 2 com dados SPOT-PAN; da composição SPOT-XS com dados SPOT-PAN; e da composição SPOT-XS com aerofoto pancromática. Segundo a autora, todos os produtos híbridos gerados mostraram-se melhores para a interpretação visual com o propósito de estudos intra-urbanos do que os produtos componentes considerados isoladamente. Isto é, as imagens resultantes permitiram uma separação mais detalhada dos alvos urbanos que aquelas oferecidas pelos produtos básicos que as compuseram.

A técnica de IHS, por sua vez, revelou-se eficiente para a integração de dados de diferentes sistemas sensores. Permitiu a preservação da resolução espacial do produto de resolução mais fina, acrescentando-lhe as qualidades espectrais do outro produto.

Para a obtenção de um melhor realce de cores da imagem e melhoria da resolução espacial em estudos de áreas urbanas, Alves *et al.* (1993) pesquisaram a integração de imagens multiespectral e pancromática obtidas pelo sistema SPOT. O estudo foi desenvolvido para o município de Joinville, SC, e utilizou o Sistema de Tratamento de Imagens (SITIM - 150).

A metodologia proposta pelos autores constituiu-se de três etapas: registro das imagens, filtragem espacial, visando realçar a nitidez da imagem, e a integração propriamente dita da imagem através da transformação IHS.

O trabalho concluiu que a transformação IHS foi de grande valia porque além do realçamento da cena, proporcionou uma melhoria da resolução espacial, enfatizando as informações referentes às feições urbanas que compunham a cena.

Já as técnicas de filtragem espacial têm a finalidade de melhorar a aparência da distribuição espacial das informações constante na imagem, facilitando a interpretação visual de feições com frequências específicas. É o caso da malha urbana que caracteriza-se pela presença de altas frequências espaciais (Crosta, 1993).

Essa técnica foi utilizada, por exemplo, por Lapolli *et al.* (1993) para realçar imagens, visando melhorar visualmente as feições urbanas. O trabalho, implementado no Sistema de Tratamento de Imagens (SITIM-150), foi

desenvolvido em duas etapas: registro de imagem SPOT/multiespectral na imagem SPOT/pancromática e filtragem espacial.

Os filtros testados tiveram a configuração espacial abaixo:

		B		
	A	B	A	
B	B	C	B	B
	A	B	A	
		B		

onde A=1, B= -2 e C = valor variável.

O melhor resultado foi obtido quando foi utilizado o valor de C=18, correspondendo ao filtro de peso 6, que enfatizou as características e os padrões da imagem.

Após analisarem as vantagens e desvantagens das técnicas de Sensoriamento Remoto via orbital e compará-las com os recursos obtidos através das aerofotografias, França, Freitas & Mello (1993) salientaram que as imagens orbitais apresentam uso ainda limitado para algumas aplicações no contexto intra-urbano, principalmente devido a sua baixa resolução espacial. Destacaram também a importância do uso integrado das imagens orbitais e aerofotografias nos estudos do meio intra-urbano.

2.1.7 - OUTROS TRABALHOS SOBRE CRESCIMENTO E USO DO SOLO URBANO, UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO

Ehlers *et al.*(1990) utilizaram imagens SPOT, técnicas de processamento de imagens e sistema geográfico de informações para análise do desenvolvimento urbano e regional de uma área localizada ao sudoeste da cidade de Portland, Estado do Maine. Uma combinação de classificação não supervisionada e técnicas de interpretação visual de imagens foram usadas para análise da cobertura, uso do solo e evolução de aspectos regionais.

Weber & Hirsch (1992) fizeram uso de imagens SPOT conjuntamente com informações da população, obtidas através de censo convencional, para avaliar a qualidade de vida urbana em Strasbourg, França.

Gupta & Munshi (1985) analisaram as alterações urbanas ocorridas em Delhi, Índia, a partir de 1959, de acordo com a classificação do NIROV (Netherlands Institute for Physical Planning and Housing) utilizando dados contidos em mapas e obtidos por aerofotografias e imagens LANDSAT.

Empregando imagens LANDSAT para o mapeamento do uso e cobertura do solo, Lo (1991) analisou a região metropolitana de Hong Kong. O autor salientou os problemas para o mapeamento da área urbana, tendo em vista a tendência de verticalização da cidade, e o difícil discernimento entre as áreas residenciais e as áreas de uso misto (residencial e comercial).

Khorram *et al.* (1991) mapearam o uso e a cobertura do solo em cinco províncias da Sicília, aplicando métodos de classificação supervisionada e não supervisionada em imagens LANDSAT/TM 5. Os autores salientaram as dificuldades para a aplicação desses métodos de classificação diante da resposta espectral das áreas urbanas.

Mahavir & Galema (1991), aplicaram técnicas de Sensoriamento Remoto para realizar o monitoramento da expansão urbana e mapear o uso do solo da cidade de Chiangmai, na Tailândia. A metodologia comparou os resultados de mapas de uso do solo urbano elaborados por interpretação visual de imagens SPOT, pancromáticas em escalas 1:20.000 e 1:50.000 com mapas confeccionados através de fotointerpretação de pares estereoscópicos. O trabalho destacou o uso de imagens SPOT como fonte alternativa de informação para o acompanhamento do rápido crescimento urbano, mas adverte que as informações devem ser complementadas mediante o emprego de fotos aéreas e dados de campo.

Gomasca *et al.* (1993) realizaram uma análise histórica do uso cultural do solo da área metropolitana de Milão desde o século XIX até 1990, empregando mapas temáticos digitalizados a partir de mapas históricos dos períodos de 1888 a 1890 e 1945 a 1950 e imagens LANDSAT - TM 5 para o período de 1984 a 1990. A metodologia usou também imagens obtidas através do índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Indices) e a classificação supervisionada pelo método da Máxima Verossimilhança para a identificação das diversas classes de uso do solo urbano.

Toll (1985) comparou e avaliou a utilização de imagens de radar SEASAT - SAR e imagens orbitais LANDSAT - MSS na discriminação da cobertura do solo da área suburbana junto à região metropolitana de Denver, Colorado. O estudo analisou a aplicação de imagens MSS versus imagens SAR, bem como o uso combinado de ambas as imagens. O emprego simultâneo de dados SEASAT-SAR e LANDSAT-MSS propiciou uma melhor exatidão no processo classificatório do uso do solo. As informações geométricas obtidas pelo

radar complementaram as características espectrais da imagem LANDSAT- MSS no visível e no infravermelho próximo.

Vieira *et al.*(1990) utilizaram processamento digital de imagens na análise do monitoramento da expansão urbana e classificação de áreas dentro do contexto urbano e regional. A área adotada para teste foi a cidade de Manaus. Os autores aplicaram técnicas de realce, limiarização e geração de componentes principais com o objetivo de melhorar a identificação visual das áreas urbanas.

Loch *et al.*(1993) para o estudo de áreas urbanas utilizaram o sensor aerotransportável CASI, obtendo resolução espacial variando de 1,0 metro a 7,0 metros em função da altura de vôo da aeronave.

O trabalho desenvolvido para Criciúma-SC mostrou as potencialidades do scanner aerotransportável em relação às fotografias aéreas e as imagens orbitais com vistas às atividades de cadastro e planejamento urbano.

Finalmente, conclui-se, que ainda hoje os produtos oriundos dos sistemas orbitais não apresentam a resolução espacial necessária para a identificação de todos os alvos e fenômenos característicos das áreas urbanizadas. Porém, as pesquisas realizadas têm evidenciado cada vez mais a importância dessa tecnologia em determinadas atividades relacionadas ao planejamento urbano, uso do solo e conservação da paisagem e dos recursos naturais.

2.2 - SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) E MODELAGEM NUMÉRICA DO TERRENO (MNT) EM ESTUDOS URBANOS

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) como ferramentas eficazes no processo de aquisição, armazenamento, recuperação e saída de dados espaciais podem contribuir decisivamente para o estudo do espaço urbano (Ceccato *et al.*, 1993).

Para Costa & Silva (1993) os SIGs "permitem a integração de dados já existentes com dados atualizados. Também facilita o armazenamento de todo tipo de informação urbana em um banco de dados e o cruzamento destas informações, favorecendo a elaboração, por exemplo, de mapas de prognóstico e de diagnóstico urbano." Ainda, conforme esses autores, a utilização de SIGs em conjunto com dados de Sensoriamento Remoto, na avaliação do processo de expansão urbana é atualmente imprescindível para facilitar o trabalho de levantamento e análise de dados.

Foresti (1990) ressalta a possibilidade de serem gerados em SIGs novos produtos mais detalhados com informações das áreas urbanas, a partir da integração de dados oriundos de diversas fontes, inclusive em escalas diferentes.

Françoso *et al.*(1993) alertam para a importância da entrada dos dados num SIG, pois dela dependerá a qualidade, precisão e confiabilidade do produto final.

Para Escada & Kurkdjian (1993) os SIGs facilitam o processo de tomada de decisões nas atividades de planejamento urbano na medida em que são capazes de gerar, automaticamente, novas informações geo-referenciadas.

Paredes (1991) destaca também a importância dos SIGs como ferramenta de suporte nos processos de planejamento urbano, tendo em vista a capacidade desses sistemas de integrar dados sobre o meio físico, uso do solo urbano, infra-estrutura e equipamentos urbanos.

Assim, muitos trabalhos aplicando SIGs têm sido realizados com a finalidade de gerenciamento do meio físico. Destacam-se nesse contexto as pesquisas no espaço municipal e principalmente na área urbana, caracterizada pela sua complexidade e dinamismo.

Rodrigues *et al.*(1990) usaram SIG para geração do produto final (mapas temáticos) da análise da qualidade ambiental da bacia da Lagoa da Conceição-Florianópolis/SC com aplicação das técnicas de Sensoriamento Remoto. Foram estudados os fatores de ocupação do solo e as condições ecológicas do corpo lagunar.

Rodrigues & Quintanilha (1991) trataram da seleção de software de Sistema de Informações Geográficas para a gestão urbana. Destacaram ainda o uso dos SIGs como ferramentas de modelagem do mundo real, facilitando atividades de operação, manutenção e gerenciamento da área urbana.

Paredes (1991) descreveu uma metodologia para a implantação de SIGs-urbano em pequenas e médias prefeituras.

Dias & Teixeira (1991) apresentaram estudo para a implantação de SIGs com vistas ao gerenciamento de pequenos municípios. O trabalho resultou do acompanhamento pelos autores de três experiências pioneiras da utilização do SIG nas cidades de Dois Lageados, Santa Maria do Herval e Ipê, no RS.

Herz *et al.*(1991) mapearam, através de SIG, o uso do solo e cobertura vegetal de um trecho da Baixada Santista, envolvendo os municípios de Santos, São Vicente, Praia Grande, Guarujá e Cubatão.

Rodrigues *et al.* (1991) utilizaram um Sistema de Informações Geográficas no mapeamento do uso do solo da Lagoa da Conceição, Florianópolis, SC.

Costa & Silva (1993) realizaram o monitoramento do crescimento urbano da área metropolitana de Belo Horizonte através do SIG do INPE. Para os autores " a utilização de sensoriamento remoto na avaliação do processo de expansão urbana torna-se, atualmente, imprescindível, para que o trabalho de levantamento e análise de dados seja facilitado."

Vieira & Kurkdjian (1993) integraram dados de expansão urbana e dados geotécnicos como subsídio ao estabelecimento de critérios de ocupação em áreas urbanas. Foi gerado um produto cartográfico indicativo dos tipos de restrições ao uso urbano para o município de Ubatuba, situado no litoral norte paulista. A integração dos dados foi realizada por meio de SIG.

Bruijn (1991) propôs modelo probabilístico para a análise do crescimento urbano de cidades situadas em países em desenvolvimento. Através de dados de Sensoriamento Remoto foram identificadas áreas com potencial para o desenvolvimento urbano, determinada a densificação dos setores urbanos e avaliada a precisão do modelo proposto. Vários testes realizados com o auxílio de SIG indicaram elevado índice de acerto dos padrões observados no crescimento urbano.

Lo & Shipman (1990) utilizaram SIG (programa IDRISI) para avaliar efeitos da urbanização em Tuen Mun, New Territories, Hong Kong através da integração de aerofotografias, cartas topográficas e mapas geológicos. O autor destacou a capacidade da metodologia empregada para detectar as mudanças no uso do solo e o impacto ambiental decorrente.

Estes (1992) salientou o benefício do emprego simultâneo das técnicas de SIG e Sensoriamento Remoto. Para o autor, o Sensoriamento Remoto propicia a atualização das informações existentes num SIG, enquanto este facilita a extração de informações de produtos oriundos de sensores remotos.

Análises sobre a utilização conjunta de Sensoriamento Remoto e SIG podem ser encontradas ainda em Barker (1988), Guptil (1989), Treitz *et al.* (1992) entre outros.

Por outro lado, o recurso oferecido pelos SIGs de armazenar dados na forma digital tem acelerado a aplicação da cartografia automatizada (Simões & Moura, 1989). Segundo esses autores, os Modelos Digitais de Terreno (MDT), também denominados Modelos Numéricos do Terreno (MNT), vêm se mostrando uma ferramenta valiosa no sentido de agregar informações de ordem

geométrica, organizando em forma de estrutura de dados o relevo de uma região e possibilitando a geração automática de mapas.

Ainda para Simões & Moura (1989), os MNTs formam bases cartográficas armazenadas sob forma digital, sendo que a coleta de dados pode ser feita por levantamento topográfico ou por aerofotogrametria. Além disso, permitem a atualização e o aperfeiçoamento de mapas num espaço de tempo muito menor, elevando também a qualidade dos trabalhos.

Foresti *et al.* (1989) utilizaram modelo digital de terreno integrado com dados do satélite SPOT para avaliação de impacto ambiental em áreas urbanas. A área de estudo localizou-se no Setor Oeste da Área Metropolitana de São Paulo. Foi gerado um modelo numérico de elevação do terreno a partir da digitalização da carta topográfica na escala 1:50.000, permitindo a obtenção em perspectiva de uma imagem da área de estudo. Os autores sugerem que a técnica de integração de dados para estudos de impacto ambiental seja testada e aperfeiçoada em outras áreas, incluindo um número maior de variáveis.

Gomes & Dias (1990) propuseram um novo método para melhorar a precisão dos modelos digitais de elevação, quando se tem como fonte de dados cartas topográficas. A metodologia procurou sanar ou atenuar os erros possíveis na fase de interpolação da grade regular pelo método dos vizinhos mais próximos por quadrante, como achatamento dos picos e vales e modificações nas declividades. Foram empregados mecanismos de avaliação e seleção de amostras e escolha do interpolador, dependendo das características da região a ser interpolada. Os autores sugerem teste exaustivo no método proposto a fim de que os resultados iniciais sejam confirmados.

Gutiérrez (1991) salienta que uma das limitações da forma de grade regular nos MNT é que a mesma quantidade de pontos é utilizada para representar uma área irregular. O ideal, segundo o autor, seria obter uma densidade de pontos maior onde o relevo é complexo, e menor, onde o relevo é mais regular.

2.3 - SENSORIAMENTO REMOTO A NÍVEL SUB-ORBITAL E ESTUDOS URBANOS - AEROFOTOGRAFIAS

Para Rosa (1987) o termo Sensoriamento Remoto tem sido erroneamente empregado para designar somente o campo das imagens orbitais. Na verdade, lembra o autor, "qualquer instrumento, ao captar e registrar as variações de intensidade de energia eletromagnética emitida ou refletida por um objeto (alvo) é um sensor."

Em estudos urbanos, as aerofotografias em branco e preto, coloridas e coloridas falsa cor, obtidas através de sensores fotográficos, têm sido os produtos mais empregados (INPE,1980).

As fotografias aéreas coloridas na região do infravermelho próximo são superiores as fotos em branco e preto para uma análise detalhada da área urbanizada. Pelo fato de realçarem a vegetação, facilitam o processo de identificação e interpretação dos diferentes tipos de uso do solo. No entanto, devido ao seu elevado custo, têm sido menos utilizadas do que as pancromáticas.

Para Oliveira & Barros (1982), a análise da textura urbana pela interpretação de aerofotos branco e preto a baixa altitudes, fornece informações úteis ao processo de planejamento, de forma mais rápida, econômica e precisa do que os métodos convencionais como censos e levantamentos amostrais de campo.

Ainda conforme esses autores, a estratificação do espaço urbano brasileiro, notadamente o espaço residencial, devido à estratificação social existente, reforça a adequação do uso de aerofotos na análise das áreas urbanas.

Segundo Escada & Kurkdjian (1993), "os produtos fotográficos, em escalas grandes, obtidos com aeronave a baixa altitude, fornecem uma visão detalhada do espaço intra-urbano, enquanto que produtos orbitais podem fornecer uma visão sinótica da cidade inserida numa região."

De qualquer forma, no mapeamento do uso do solo urbano torna-se necessário o reconhecimento e a análise dos parâmetros de fotointerpretação como padrões de textura fotográfica, tonalidade (níveis de cinza), arranjo espacial e tamanho dos fenômenos.

Cada categoria de uso do solo urbano normalmente apresenta características próprias, cujo conhecimento facilita o processo de fotointerpretação. Entre essas características, de acordo com INPE (1980) destacam-se:

- as áreas comerciais estão situadas normalmente em partes mais antigas das cidades, onde predomina um grande crescimento vertical e um maior adensamento de edificações. Logo, um critério de identificação dessas áreas constitui-se da altura e densidade das construções;

- as áreas residenciais unifamiliares são caracterizadas pela variação do tamanho e densidade das edificações. Podem as vezes serem identificadas pela arborização das ruas e pelo sistema de arruamento;

- as áreas residenciais multifamiliares destacam-se pela presença de edifícios de apartamentos. Geralmente, situam-se fora do centro comercial. A visão estereoscópica facilita sua identificação;

- as áreas de uso institucional (igrejas, escolas, universidades, clubes, áreas verdes) destacam-se pela existência de amplas edificações e pátios de estacionamento;

- as áreas industriais normalmente caracterizam-se por edificações com grandes dimensões, grandes pátios de estacionamentos e localização fora do centro da cidade.

Nos últimos anos, contudo, tendo em vista o desenvolvimento muito rápido dos sensores orbitais passou a ser questionada a substituição da aerofotos por imagens de satélite (Loch *et al.*, 1993).

Para Naithani (1990) as aerofotografias têm a vantagem da alta resolução e qualidade geométrica para mapeamentos topográficos. Para o autor não há até a presente data alternativa real à fotoaérea para mapeamentos em média e grande escala.

Françoso *et al.*(1993) ao compararem o uso de aerofotos com imagens de satélite, aplicados ao transporte e urbanismo, salientam que além da pequena área de cobertura da fotografia aérea é preciso levar em consideração ainda os seguintes fatores:

" . a dificuldade de obtenção de cobertura em áreas onde o clima é muito úmido e o tempo nublado é frequente;

. o tempo de operação de um levantamento aerofotográfico pode não coincidir com o tempo máximo disponível para a elaboração do planejamento e implantação de projetos;

. a gravação dos dados em apenas uma faixa espectral limita a possibilidade de discriminar características diferentes do solo."

Ainda segundo esses autores, as principais limitações das técnicas de aerolevantamentos são a demora na efetivação dos vôos devido as condições atmosféricas desfavoráveis; reduzido número de horas com luz solar; obstruções à visão aérea; variações na escala fotográfica decorrente das mudanças na topografias do terreno ou na altitude do vôo; variação da velocidade da aeronave devido a ocorrência de ventos e o alto custo.

Para Mahavir-Galena (1991) as fotos aéreas, apesar de se comportarem como uma esplêndida fonte de informações, têm, entretanto, as desvantagens do grande número requerido de fotos (dependendo da escala que se pretenda utilizar), sua temporalidade e custo relativamente alto.

Entretanto, cabe lembrar França *et al.* (1993), que recomendam o uso de aerofotos no estudo do uso do solo e ocupação urbana, tendo em vista que os produtos oriundos de sensores orbitais não possuem resolução espacial necessária para todas as aplicações no meio intra-urbano.

Nesse sentido, Escada & Kurkdjian (1993) utilizaram análise de elementos texturais de fotografia aérea em escala 1:10.000 para o planejamento de espaços livres intra-urbanos de uso coletivo em São José dos Campos, SP.

Oliveira & Barros (1982) usaram técnicas de Sensoriamento Remoto de baixa altitude no processo de planejamento das redes de equipamentos urbanos de uso coletivo em São José dos Campos, SP. A identificação de setores residenciais prioritários para a localização destes equipamentos foi feita com base na localização do setor na estrutura urbana, quantificação e caracterização sócio-econômica da sua população, o que foi realizado através de interpretação de aerofotos.

Barros & Oliveira (1982) utilizaram também aerofotos em branco e preto, na escala aproximada de 1:10.000 para a implementação de modelos urbanos com entrada de dados a partir de sensores Remotos. Para área teste foi escolhida a cidade de São José dos Campos. O modelo desenvolvido visava, entre outros aspectos, identificar áreas urbanas prioritárias para ações de saúde, avaliar a qualidade do transporte coletivo urbano e analisar a dinâmica do desempenho urbano, planejando a sua estrutura espacial.

Modelo para análise e projeção da estrutura espacial urbana, em especial para cidades brasileiras de médio porte, empregando aerofotografias em escala 1:10.000, foram também desenvolvidos por Barros *et al.* (1982). Mosaicos aerofotográficos de várias épocas foram usados para verificação de tendências de crescimento da cidade de São José dos Campos, área teste da pesquisa.

Oliveira *et al.* (1978) empreenderam a setorização urbana das cidades de Cachoeira Paulista e São José dos Campos através de interpretação de fotos na escala 1:10.000, obtidas com câmera aerofotográfica RC-10, instalada na aeronave Bandeirantes do INPE, e filme pancromático. O trabalho descreveu o processo de identificação de setores urbanos diferenciados ou Zonas Homogêneas em função da composição sócio-cultural da população residente. Foram listados os parâmetros visuais relevantes para a análise dos diversos setores urbanos.

Manso *et al.*(1978) utilizaram aerofotografia para a determinação da população urbana. O método partiu da divisão da cidade em Zonas Homogêneas, que refletem tipos característicos de ocupação do solo urbano. A seguir, em cada zona, o processo de fotointerpretação desceu ao nível de detalhe do lote, buscando identificar edificações residenciais (unifamiliares, multifamiliares) e não residenciais. Identificado o número de residências por setor, foi calculado então a sua população com base no número médio de pessoas por família. O método, aplicado à cidade de São José dos Campos em 1978, constatou uma diferença de 1,3% quando comparado aos dados oficiais da Prefeitura Municipal.

Lopes *et al.*(1993) realizaram o monitoramento da ocupação do espaço urbano em áreas de preservação permanentes na bacia do rio Itacorubi, na cidade de Florianópolis, SC. utilizando imagens fotográficas da região nos períodos de 1956, 1978 e 1980 e imagens orbitais de 1988 e 1990.

Orth & Silveira (1993) utilizaram análise visual de fotos do vôo aerofotogramétrico de 1978 para identificar os limites da área urbanizada ao longo do mar dos ingleses para a avaliação da evolução da área ocupada do balneário dos Ingleses-Florianópolis/SC.

Anjos (1993) para a modelagem do crescimento e da dinâmica espacial urbana do Distrito Federal, empregou fotos aéreas pancromáticas, mosaicos aerofotogramétricos e imagens orbitais do LANDSAT-5. O trabalho resgatou também a técnica do uso de overlays, muito utilizados nos estudos geográficos, superpondo informações espaciais.

Outros trabalhos empregando aerofotos e imagens orbitais já foram mencionados nessa revisão bibliográfica como Pereira & Kurkdjian (1987), Coelho & Pitanga (1982), Kurkdjian (1990), Kurkdjian & Il (1989) e tantos outros.

CAPÍTULO 3

AS FERRAMENTAS BÁSICAS UTILIZADAS NA PESQUISA

3.1 SENSORIAMENTO REMOTO

3.1.1 - GENERALIDADES

Sensoriamento Remoto pode ser entendido como o conjunto de técnicas capazes de obter e analisar informações relativas a objetos ou alvos, sem contudo entrar em contato físico com eles.

A caracterização das propriedades dos alvos é realizada pela detecção, registro e análise do fluxo de energia radiante, refletido ou emitido pelos mesmos e captados pelos diferentes tipos de sensores.

Os sensores são sistemas optico-eletrônicos que detectam e registram o fluxo de energia radiante refletida ou emitida por objetos, formando ou não imagens da superfície da Terra.

A imagem, quando gerada pelo sensor, está na forma de uma matriz. É constituída por células denominadas "pixels", que representam através de sua densidade ou nível de cinza, a quantidade de radiação refletida ou emitida pelo alvo (Steffen & Moraes, 1993).

A energia radiante ou radiação eletromagnética captada pelos sensores pode ser procedente de dois tipos de fontes: fontes naturais, como o Sol e a própria Terra, ou fontes artificiais, como o radar. No primeiro caso, temos os sistemas sensores eletromagnéticos passivos, enquanto os sensores que contem a própria fonte de radiação são denominados de sensores ativos.

O fluxo de radiação solar ao interagir com os objetos terrestres sofre alterações de acordo com as propriedades físicas, químicas e biológicas dos mesmos, fazendo com que a energia refletida ou emitida e captada pelos sistemas sensores identifique os diversos alvos existentes na cena.

Rosa (1992) caracteriza o estudo das técnicas de Sensoriamento Remoto em duas fases principais: a fase de aquisição de dados e a fase de análise e utilização dessas informações. A fase de aquisição está relacionada com os processos de detecção e registro da informação e envolve conhecimentos sobre a radiação eletromagnética, fontes de radiação, efeitos atmosféricos, comportamento espectral dos alvos e sistemas sensores. Já a fase de análise compreende o tratamento e a interpretação dos dados obtidos.

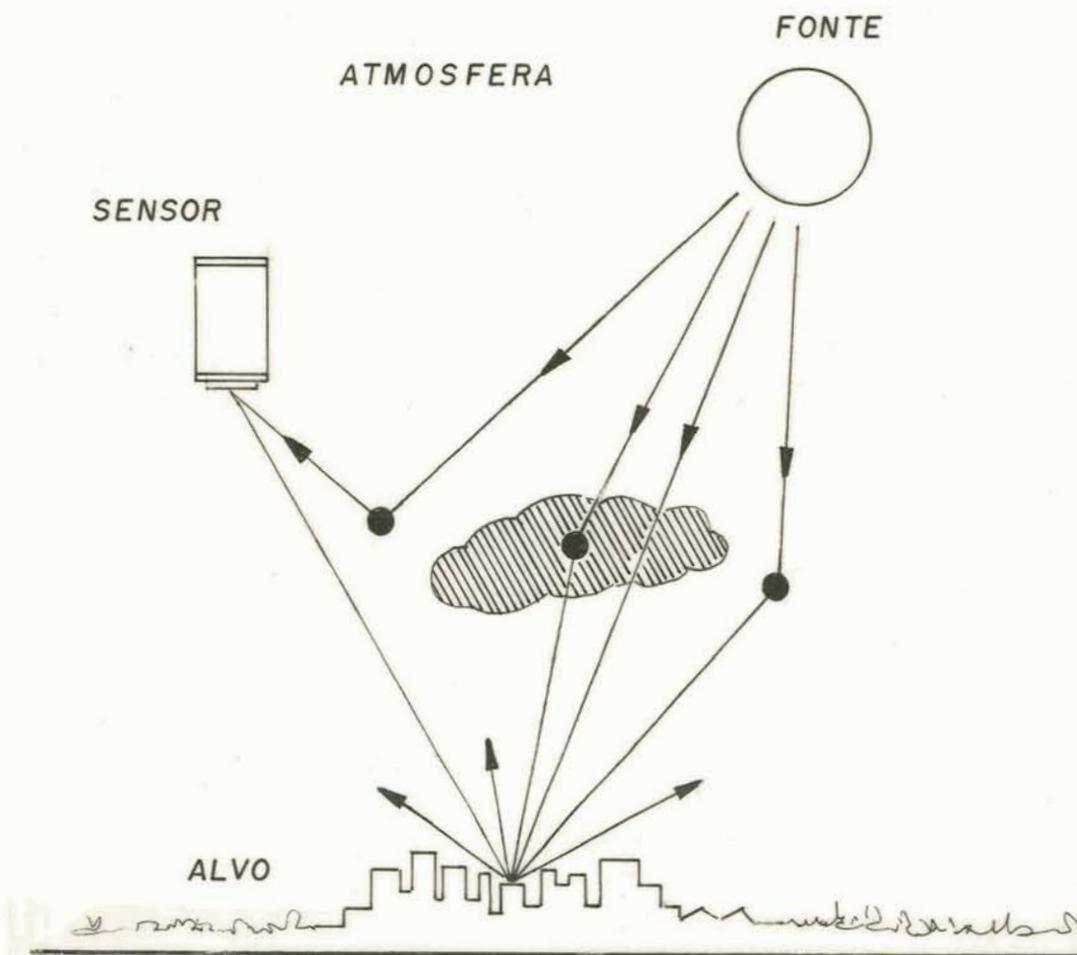


Figura 3.1 - Elementos integrantes na fase da aquisição de dados

3.1.2 - O SOL COMO FONTE DE RADIAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

A principal fonte de energia eletromagnética para estudos da superfície da Terra através de Sensoriamento Remoto é a energia radiante proveniente do Sol, representada graficamente em função de cada comprimento de onda na Figura 3.2 (espectro solar).

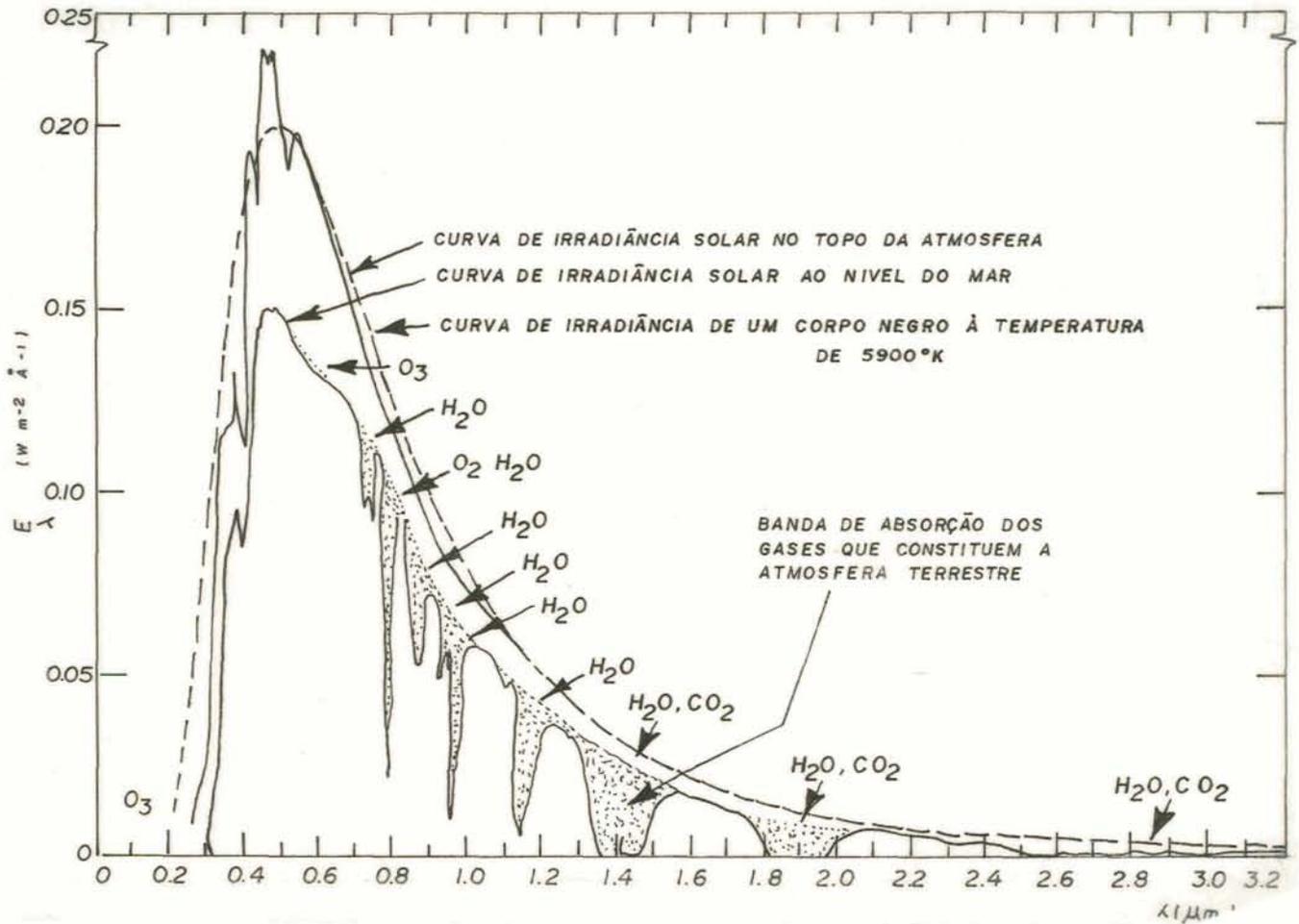


Figura 3.2 - Curva de irradiância solar
Fonte: Slater (1980)

A partir da análise do gráfico anterior, observa-se que o máximo de energia emitida pelo Sol acha-se na faixa de $0,4\mu\text{m}$ a $0,7\mu\text{m}$, denominada região visível do Espectro Eletromagnético. Consta-se também a existência de **bandas de absorção da atmosfera**, ou seja, regiões do espectro eletromagnético onde a atmosfera é opaca, não permitindo a passagem de radiação eletromagnética.

Ao utilizarmos a radiação eletromagnética proveniente do Sol para estudos da superfície da Terra através de Sensoriamento Remoto, estamos na verdade medindo a energia terrestre refletida pelos diversos alvos existentes na superfície do planeta.

3.1.3 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A radiação eletromagnética pode ser representada em função de comprimentos de onda, frequência ou energia, passando então a ser denominada de Espectro Eletromagnético (Figura 3.3).

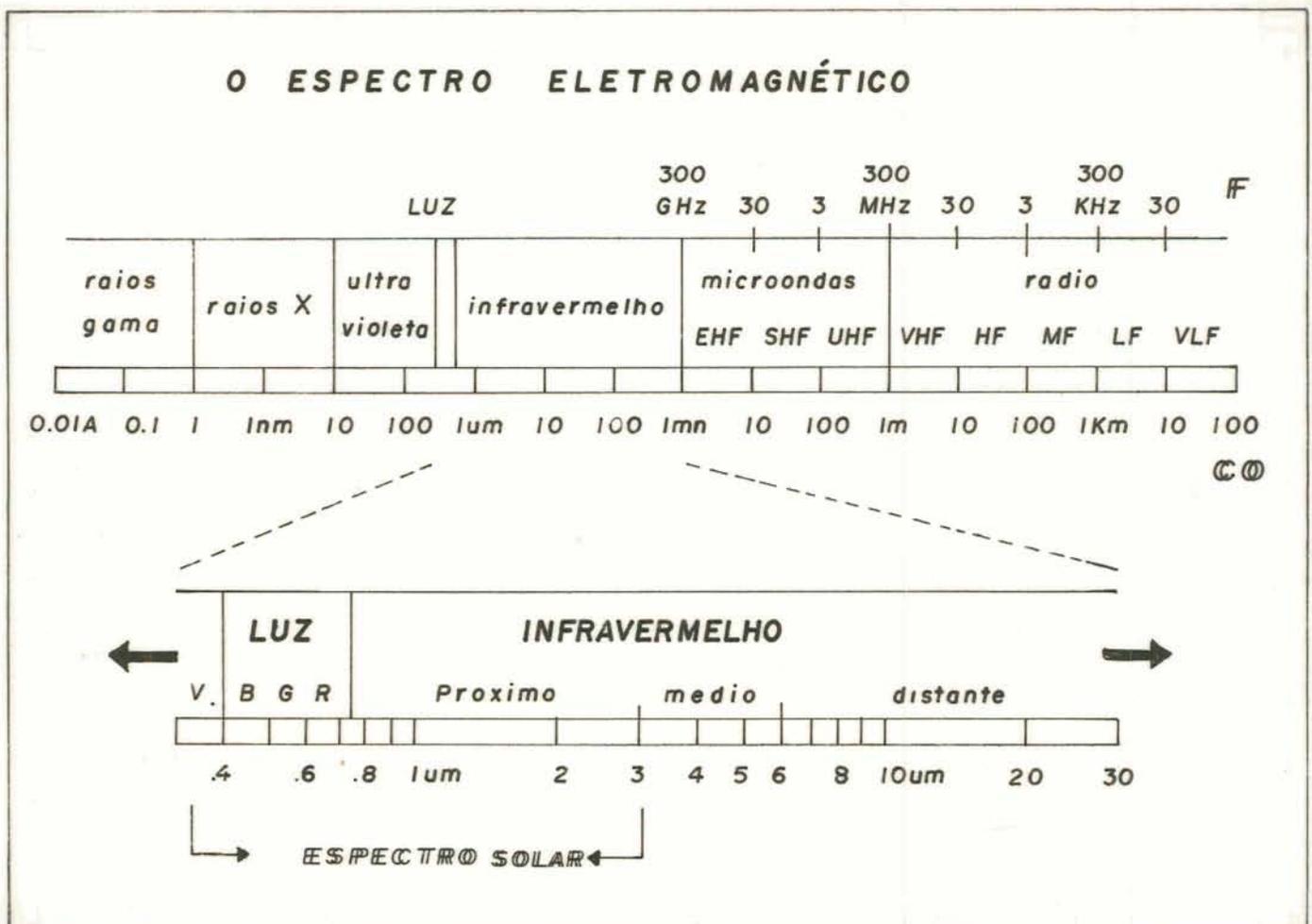


Figura 3.3 - O Espectro Eletromagnético

Em Sensoriamento Remoto a faixa espectral que envolve as radiações ultravioleta, visível e infravermelho é a mais usada, além da faixa referente a microondas. Algumas regiões do Espectro Eletromagnético recebem denominações específicas como é o caso do chamado **Espectro Ótico**, compreendido no intervalo de 0,3 μm a 15 μm de comprimento de onda e possível de ser coletado pelos sistemas óticos (Figura 3.4).

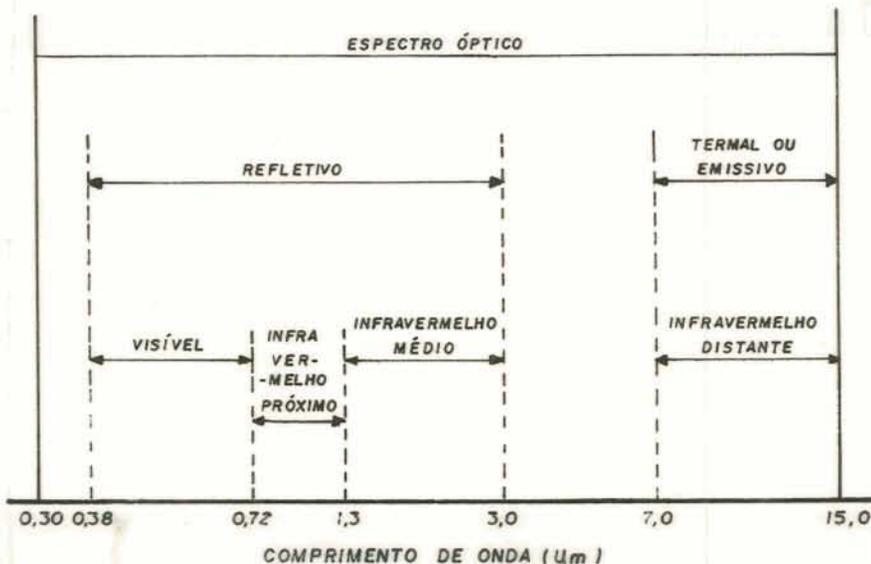


Figura 3.4 - Regiões do Espectro Ótico.
Fonte: Swain & Davis (1978)

3.1.4 - INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA

Um fluxo radiante incidindo sobre a superfície de um alvo pode gerar três fenômenos: reflexão, absorção e transmissão. Isto é, parte do fluxo é refletido, parte penetra no objeto, sendo absorvido progressivamente, e parte consegue atravessá-lo, emergindo novamente para o espaço (Figura 3.5). Os valores dos fluxos resultantes dependerão das propriedades do objeto.

Assim, de acordo com lei da conservação da energia, temos:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (3.1)$$

onde i , r , a e t indicam a natureza dos fluxos incidente, refletido, absorvido e transmitido respectivamente.

Dividindo-se os dois membros da equação pelo fluxo incidente, temos então:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (3.2)$$

onde as razões adimensionais ρ , α e τ são normalmente denominadas de reflectância, absorptância e transmitância.

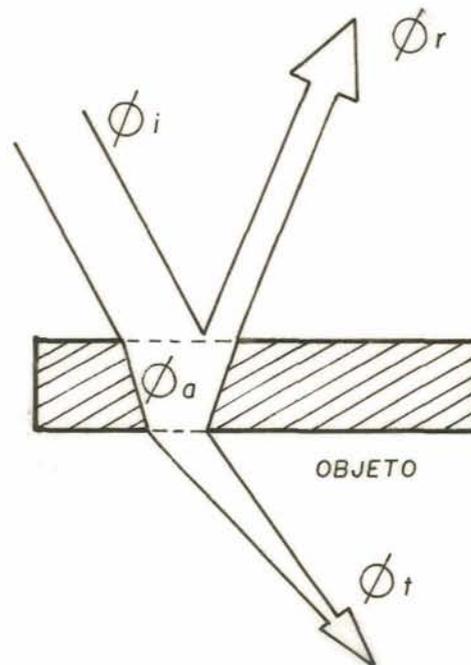


Figura 3.5 - Fenômenos da interação da radiação eletromagnética com a matéria.

Na impossibilidade de medir-se diretamente o fluxo absorvido pelo objeto, a absorptância poderá ser deduzida da equação anterior após a determinação da transmitância e da reflectância do mesmo.

Em Sensoriamento Remoto, a maioria das informações dos alvos existentes na superfície terrestre é obtida pela análise da radiação refletida, através do estudo da reflectância, que de acordo a equação 3.2 é a razão entre a radiação refletida por um determinado alvo e a radiação nele incidente.

3.1.5 - ASSINATURA E COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS

De fundamental importância para os objetivos da técnica de Sensoriamento Remoto são as alterações provocadas pelos alvos nas características espectrais do fluxo incidente. Essas variações são seletivas em relação ao comprimento de onda e são específicas para cada tipo de matéria.

A seletividade espectral da reflectância se manifesta em todo o espectro eletromagnético. Este fato, faz com que os alvos existentes sobre a Terra possam ser reconhecidos por sensores remotos a partir da análise das suas reflectâncias espectrais. Dessa forma, cada material apresenta uma curva de reflectância espectral característica que é denominada de **assinatura espectral**.

A assinatura espectral é representada em forma gráfica, constituindo-se de um conjunto de faixas espectrais adjacentes para as quais são conhecidas as medidas da reflectâncias espectrais dos diversos alvos (Figura 3.6).

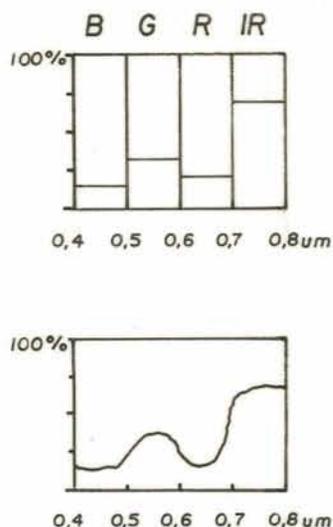


Figura 3.6 - a) Valores médios da reflectância de uma folha verde nas faixas do espectro correspondente ao azul, verde, vermelho e infravermelho próximo; b) valores de reflectância espectral em intervalos espectrais mais estreitos, constituindo-se no gráfico da assinatura espectral da folha.

Fonte: Steffen & Moraes (1993)

Assim, o **comportamento espectral** de um alvo pode ser entendido como a medida da sua reflectância ao longo do espectro eletromagnético, sendo característico, como já foi mencionado acima, para cada tipo de substância.

O conhecimento do comportamento espectral dos alvos na superfície da Terra é de fundamental importância na utilização de dados de Sensoriamento Remoto, tanto na discriminação e identificação de alvos, quanto na definição do tipo de pré-processamento ou forma de aquisição dos dados.

A seguir, estão apresentados o comportamento espectral dos principais componentes da superfície da Terra.

a) **Comportamento espectral da vegetação**

O comportamento espectral típico de uma folha verde está representado na Figura 3.7, mostrando as regiões onde a resposta espectral possui maior significância.

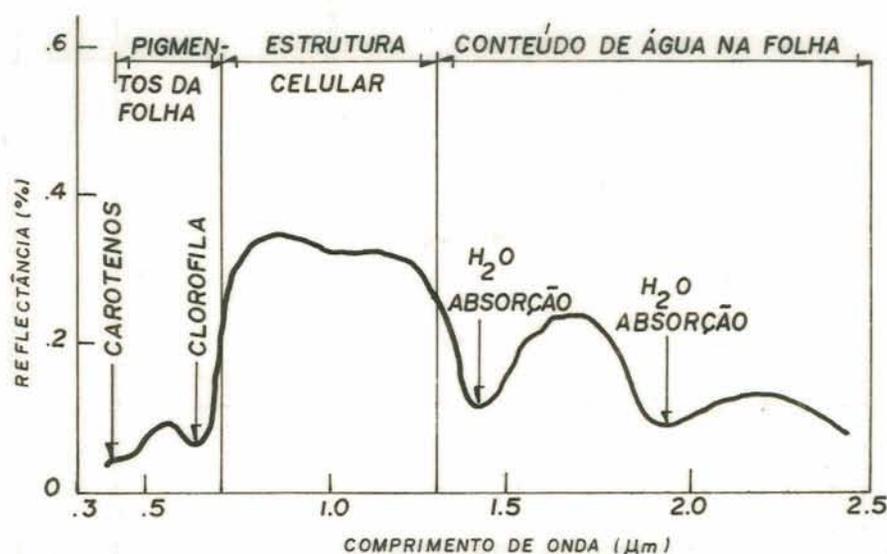


Figura 3.7 - Comportamento espectral da vegetação fotossinteticamente ativa

Na região visível do espectro eletromagnético, a reflectância é relativamente baixa. Há forte absorção da radiação pelos pigmentos, principalmente pela clorofila, que absorve a maior parte da energia incidente. As duas bandas de absorções centradas aproximadamente nos comprimentos de

onda de 0,45 μm e 0,65 μm são decorrentes da presença de carotenos e da clorofila. A coloração verde das plantas é devido ao pico de reflectância em torno de 0,5 μm , que corresponde à região verde do espectro visível. Já a coloração amarelo-avermelhada, característica da vegetação seca, resulta da queda dos teores da pigmentação da clorofila, e conseqüentemente do decréscimo nas taxas de absorção nas bandas de 0,45 μm e 0,65 μm .

Na região do infra-vermelho próximo (0,7 μm a 1,3 μm) o elemento condicionante está relacionado à estrutura interna celular da folha. As folhas verdes absorvem muito pouca energia nessa região. Aproximadamente 45% da energia incidente é refletida e 45% transmitida.

A partir de 1,3 μm observa-se um decréscimo gradual nos valores de reflectância devido à presença da água. Nota-se dois picos de absorção máximos pela água próximos a 1,4 μm e 1,9 μm .

b) Comportamento espectral dos solos

O comportamento espectral dos solos é função principalmente da textura, porcentagem de matéria orgânica, composição mineralógica e teor de umidade. A Figura 3.8.a apresenta curvas de reflectância típicas de três tipos diferentes de solo, em condições de baixa umidade.

A diminuição do tamanho das partículas provoca um aumento nos valores de reflectância e a atenuação das bandas de absorção do solo. Os solos úmidos, por sua vez, apresentam reflectância mais baixa do que os solos secos na faixa do espectro refletivo. Portanto, solos com granulometria fina como por exemplo argila e silte (Tabela 3.1), que possuem pouca porosidade e grande superfície específica, retem muita umidade, diminuindo a sua resposta espectral devido o decréscimo de reflectância nas bandas de absorção da água (1,4 μm , 1,9 μm e 2,7 μm), (Figura 3.8.b).

Por outro lado, um aumento do conteúdo de matéria orgânica no solo provoca uma diminuição da resposta espectral, e a remoção do óxido de ferro provoca um acréscimo nos valores de reflectância na faixa do visível e parte do infravermelho próximo.

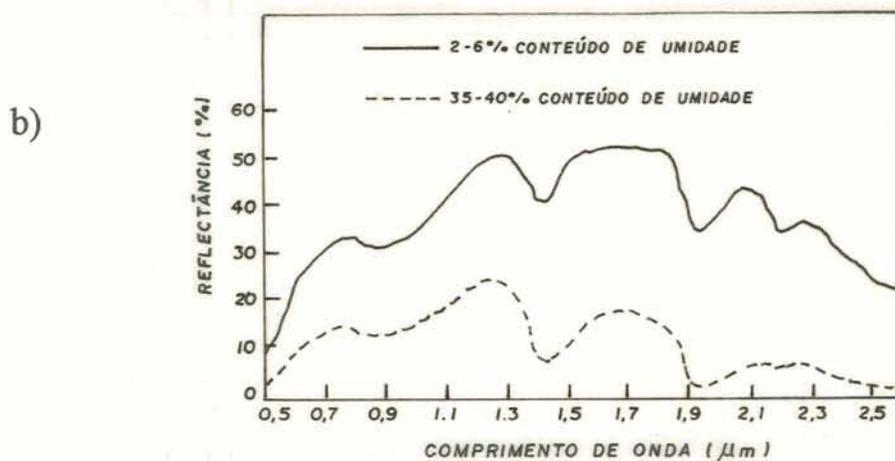
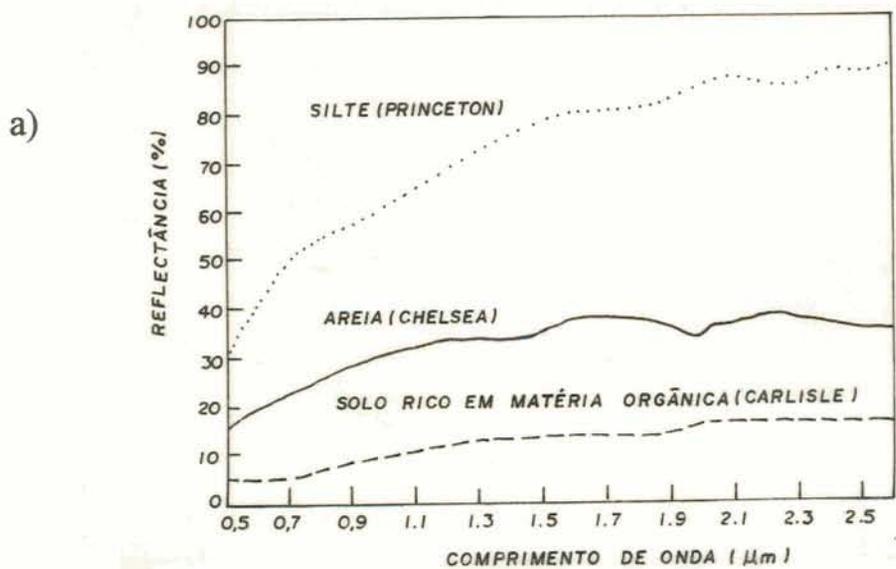


Figura 3.8 - a) Curvas de reflectância espectral para três diferentes tipos de solos. b) Reflectância de um solo argiloso com diferentes teores de umidade.

Fonte: Swain-Davis (1978)

Tabela 3.1 - Classes texturais do solo

NOME	DIMENSÕES DAS PARTÍCULAS
areia grossa	2 - 0,2 mm
areia fina	0,2 - 0,05 mm
silte	0,05 - 0,002 mm
argila	menor que 0,002 mm

Fonte: baseado em Lemos & Santos (1984)

c) Comportamento espectral da água

O comportamento espectral da água assume características distintas para os diferentes estados físicos conforme mostra a Figura 3.9.

A água em seu estado líquido apresenta baixa reflectância entre $0,38 \mu\text{m}$ e $0,70 \mu\text{m}$, portanto na região do visível. Nessa faixa do espectro eletromagnético os maiores valores de reflectância ocorrem nos comprimentos de onda do azul e verde, decrescendo gradualmente na direção do infravermelho. Acima de $0,70 \mu\text{m}$, praticamente toda a radiação é absorvida.

A presença de sedimentos na água líquida, torna maior a sua reflectância, deslocando o pico de reflectância na direção de maiores comprimentos de onda (Figura 3.10). Em forma de nuvens, a água apresenta também elevada reflectância (entre $0,38 \mu\text{m}$ e $2,5 \mu\text{m}$), com bandas de absorção em torno de $1,0 \mu\text{m}$,

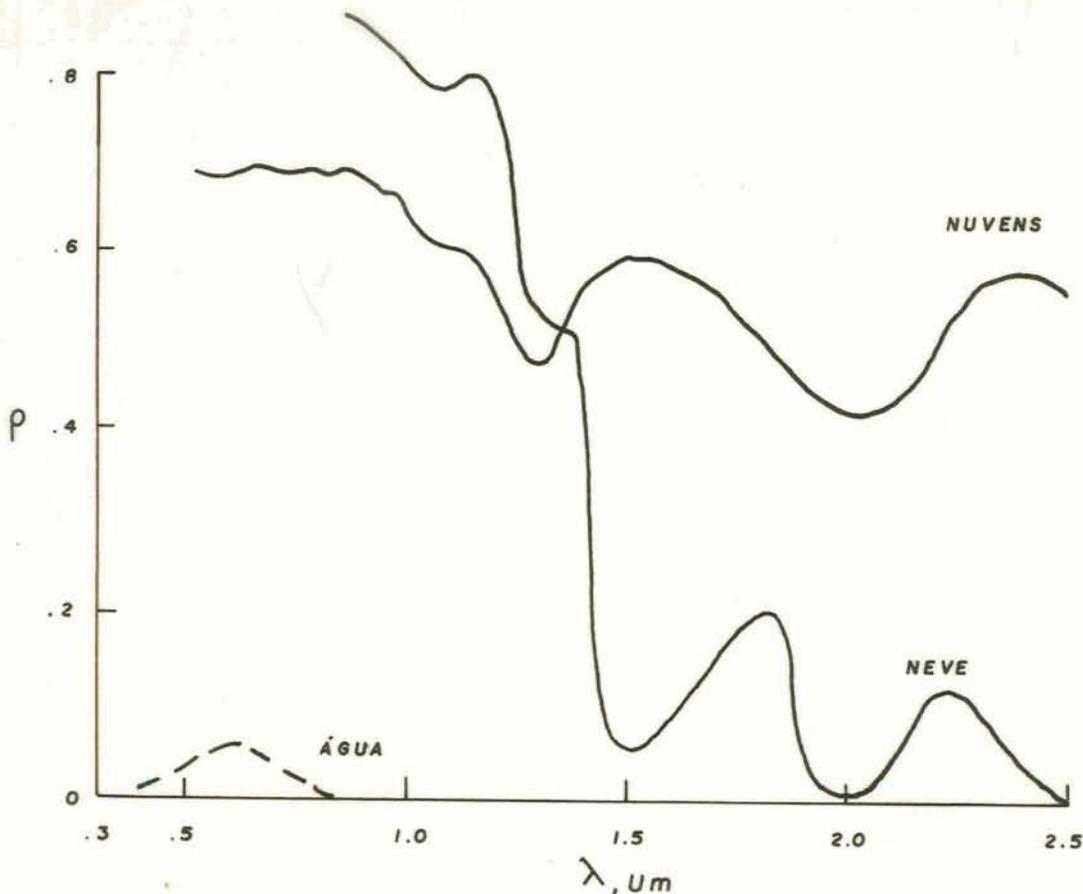


Figura 3.9 - Comportamento espectral da água em seus diferentes estados físicos.
Fonte: Bowker *et al.* (1985)

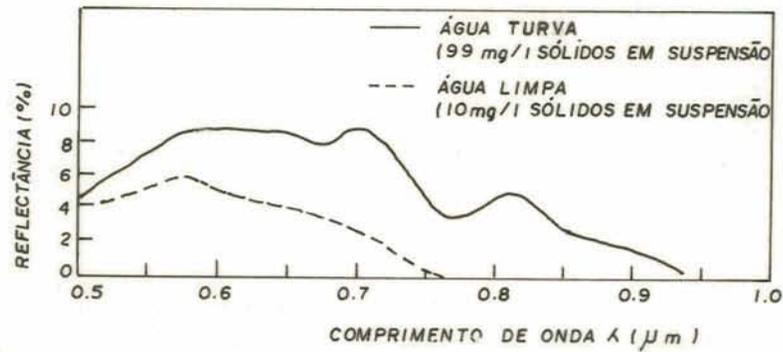


Figura 3.10 - Comportamento espectral da água limpa e água com a presença de sedimentos.

Fonte: Swain-Davis (1978)

3.1.6 - SISTEMAS SENSORES

Um sistema sensor é um dispositivo constituído por um coletor (lente, espelho ou antena) e um sistema de registro (detetor ou filme), com a capacidade de transformar a radiação eletromagnética de determinada faixa do espectro eletromagnético em sinal passível de ser convertido em informação sobre o alvo .

a) Classificação dos sistemas sensores

Os sistemas sensores podem ser classificados segundo à resolução espacial, à fonte de radiação e ao sistema de registro (Tabela 3.2).

Os sistemas sensores podem também ser classificados em função da região do espectro eletromagnético em que atuam. Assim alguns sensores operam na região óptica do espectro, utilizando na sua construção componentes ópticos como espelhos, prismas e lentes.

Tabela 3.2 - Classificação dos sistemas sensores

SEGUNDO A FORMA DE REPRESENTAÇÃO DOS DADOS	<i>características</i>	<i>exemplos</i>
a) Sensores Imageadores	Fornecem uma imagem do alvo.	"scanners" câmaras fotográficas CCDs
b) Sensores Não Imageadores	Fornecem informações sobre o alvo em forma de tabelas, gráficos, sem produzir imagens.	radiômetros espectro-radiômetros termômetros de radiação
SEGUNDO A FONTE DE RADIAÇÃO:		
a) Sensores Ativos	Possuem fonte própria de radiação eletromagnética	radar câmara fotográfica com flash
b) Sensores Passivos	Não possuem fonte própria de radiação. Detectam a radiação solar refletida ou emitida pelos alvos na superfície.	radiômetros espectro-radiômetros "scanners" câmaras fotográficas
SEGUNDO O SISTEMA DE REGISTRO:		
a) Sensores Fotográficos	Fonte de registro é o filme fotográfico	câmara fotográfica
b) Sensores Não Fotográficos	Não utilizam filme como fonte de registro	radiômetros "scanners" CCDs

Finalmente, os sistemas sensores podem ser denominados de imageadores ou não-imageadores.

Os sistemas sensores imageadores apresentam como resultado uma imagem, contendo informações sobre a variação espacial da resposta espectral da superfície observada. Essa imagem da cena pode ser obtida em sua totalidade, num mesmo instante, através do sistema de quadro ("framing systems") ou pode ser formada pelo sistema de varredura ("scanning systems") com a aquisição em sequência de imagens elementares do terreno ou elementos de resolução (pixels). Sensores fotográficos, sensores de varredura eletro-óptica e radares de visada lateral são exemplos de sensores imageadores.

Os sistemas não-imageadores não produzem uma imagem da superfície observada. São empregados para medir grandezas radiométricas e produzir a curva espectral que caracteriza a radiação eletromagnética emitida, refletida ou transmitida pelo alvo. Fornecem, portanto, informações sobre o comportamento espectral dos objetos da superfície da Terra. Os radiômetros são exemplos de sistemas sensores não-imageadores.

Para a otimização de um trabalho utilizando Sensoriamento Remoto, um sistema sensor deve ser escolhido em função de suas características inerentes e das vantagens e desvantagens para aplicação em determinado alvo. Nesta pesquisa, foram utilizados sistemas sensores passivos, imageadores não fotográficos, operantes na região óptica do espectro eletromagnético.

b) Resolução dos sistemas sensores

A resolução dos dados fornecidos pelos diferentes tipos de sensores apresentam-se em quatro domínios (Rosa,1992): temporal, radiométrico, espectral e espacial.

A resolução temporal diz respeito à repetitividade com que o sistema sensor possui na obtenção de informações dos alvos.

A resolução radiométrica refere-se a maior ou menor capacidade de um sistema sensor em detectar e registrar diferenças de reflectância e/ou emitância dos elementos da cena. No sistema sensor Thematic Mapper (TM) essas informações são registradas em 256 tons ou níveis distintos de cinza (números digitais).

A resolução espectral refere-se à caracterização dos alvos em função da largura espectral e /ou número de bandas em que opera o sistema

sensor. Uma alta resolução espectral é obtida quando as bandas de um sistema sensor são estreitas e/ou quando se utiliza um maior número de bandas espectrais.

A resolução espacial é definida como a mínima distância entre dois objetos que pode ser registrada por um sensor como sendo objetos distintos. Um sistema sensor que possui uma resolução de 30 metros não discrimina objetos distantes entre si menos do que 30 metros.

Outras informações sobre sistemas sensores encontramos por exemplo em Swain-Davis (1978), Short (1982), INPE (1980) e Novo (1989).

3.1.7 - NÍVEIS DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM SENSORIAMENTO REMOTO

A Figura 3.11 mostra os três níveis de coleta de dados por Sensoriamento Remoto. A medida que mudamos de nível, alteram-se as dimensões da área observada, influenciando na resolução espacial do dado obtido.

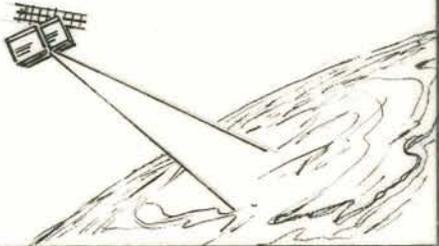
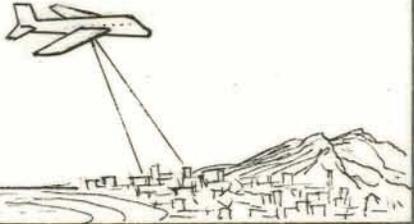
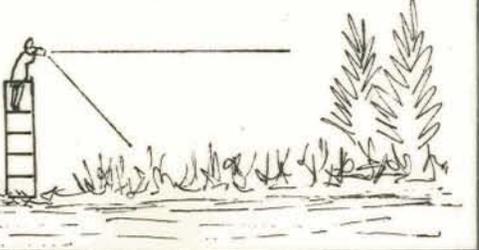
NIVEL III	400Km - 920Km	ORBITAL	
NIVEL II	3000 m	AERONAVE	
NIVEL I	± 20m	CAMPO	
	LABORATÓRIO		

Figura 3.11 - Níveis de aquisição de dados por Sensoriamento Remoto

A nível de laboratório a área estudada é reduzida e a interferência de fatores ambientais pode ser desprezível na análise espectral do alvo. Nos dados obtidos a nível sub-orbital, a energia registrada pelo sensor não é geralmente relativa a apenas um determinado alvo, mas a um arranjo de objetos da paisagem. Já as informações oriundas de satélites orbitais apresentam em cada elemento de resolução do terreno a energia resultante da integração da resposta de diferentes objetos da superfície da Terra. Portanto, os diferentes níveis de aquisição de dados resultam em diferentes produtos, cuja análise exigirá também métodos específicos para cada um dos níveis.

3.1.8 - O SISTEMA ORBITAL LANDSAT

O sistema orbital LANDSAT, utilizado nesta pesquisa, foi desenvolvido pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), com a finalidade de obter dados espaciais, espectrais e temporais da superfície terrestre de forma global, sinóptica e repetitiva. O primeiro satélite da série LANDSAT, foi lançado em 1972 e denominava-se Earth Resources Technology Satellite (ERTS). Em janeiro de 1975 passou a ser denominado LANDSAT.

A Tabela 3.3 apresenta os satélites da série LANDSAT, com suas respectivas datas de lançamento, sistemas sensores e período de vida útil, inicialmente concebido para 2 anos.

Os satélites da série LANDSAT deslocam-se em órbita circular, quase polar e heliossíncrona, garantindo que as imagens tomadas em diferentes regiões da Terra tenham aproximadamente a mesma resolução e escala e que as condições de iluminação da superfície terrestre apresentem o mínimo possível de variação (Figura 3.12).

Os LANDSAT 1, 2 e 3 estavam equipados com dois sistemas sensores: RBV (Return Beam Vidicon) e MSS (Multispectral Scanner System). O primeiro sistema imageava instantaneamente toda a cena através de um subsistema de câmeras de televisão, enquanto o segundo realiza o imageamento do terreno por varreduras de linhas.

Nos LANDSATs 4 e 5, o sistema sensor RBV foi substituído pelo sistema sensor TM (Thematic Mapper), com sete bandas espectrais, mas foi mantido o sistema MSS com quatro bandas espectrais semelhante aos LANDSAT 1 e 2.

Tabela 3.3 - Satélites da série LANDSAT

SATÉLITE	SENSOR	DATA DE LANÇAMENTO	PROBLEMAS OPERACIONAIS	REABILITAÇÃO	TÉRMINO DA OPERAÇÃO
Landsat 1	RBV m MSS	Julho 72	-	-	Janeiro 78
Landsat 2	RBV m MSS	Janeiro 75	Nov 79 / Fev 82	Junho 80	Julho 83
Landsat 3	RBV p MSS t	Março 78	Dez 80 / Mar 83	Abril 81	Setembro 83
Landsat 4	MSS TM	Julho 82	Fev 83 (apenas TM)	Dez 93 (apenas TM)	-
Landsat 5	MSS TM	Março 84	-	-	-
Landsat 6		1994	Perdido devido à falha no foguete lançador		

m - multispectral RBV
p - panchromatic RBV
t - com banda termal

Fonte: baseado em Curran (1985) e Richards (1986).

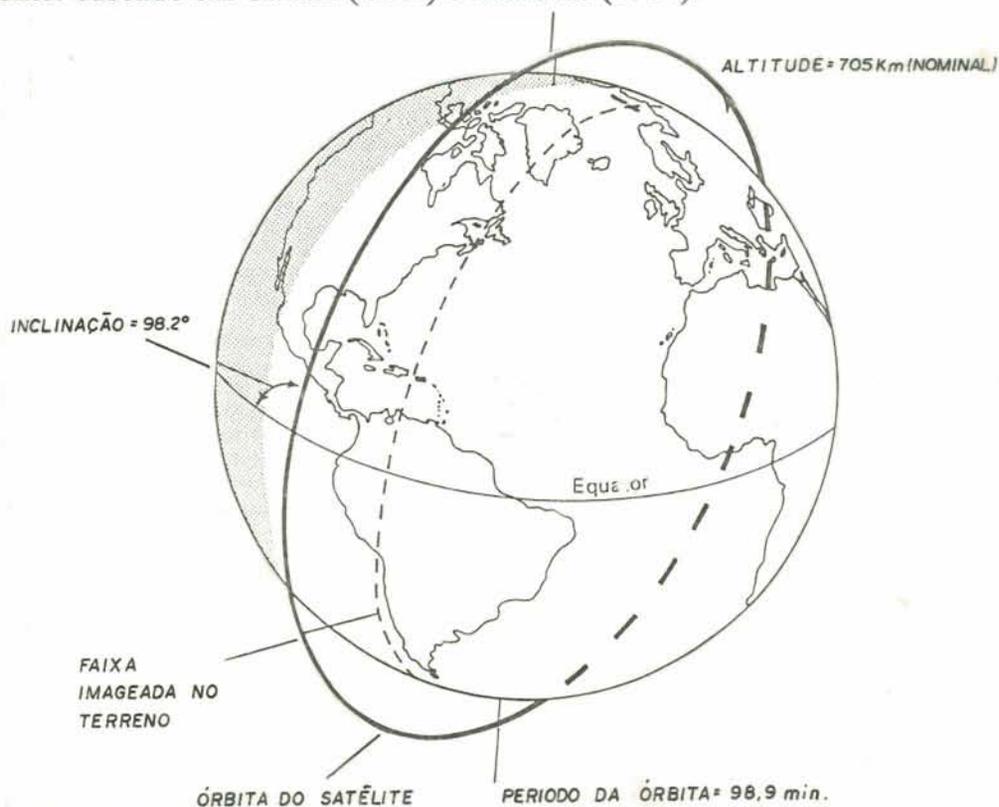


Figura 3.12 - A órbita dos satélites LANDSAT 4 e 5
Fonte: Arnoff (1991)

A Tabela 3.4 resume as características das órbitas dos satélites da série LANDSAT.

Tabela 3.4 - Característica das órbitas da série LANDSAT

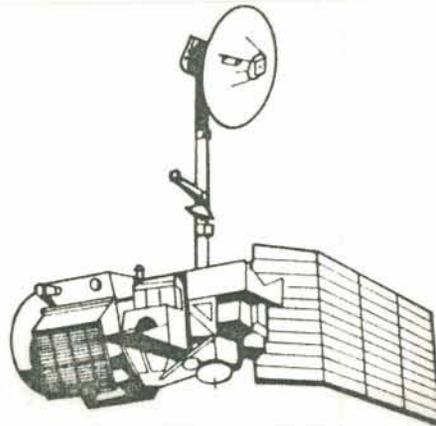
PARÂMETROS ORBITAIS	LANDSAT 1,2 e 3	LANDSAT 4 e 5
Altitude (Km)	920	705
Inclinação (graus) em relação ao Equador	99,4	98,2
Período (min)	103	98,9
Horário passagem no Equador	9:30	9:30
Repetição de ciclo (dias)	18	16

Fonte: Richards (1986) e Novo (1989)

A Figura 3.13 representa a configuração dos satélites da série LANDSAT. A partir do LANDSAT 4 o subsistema satélite têm uma configuração mais complexa, a fim de obter um melhor desempenho na aquisição de dados.

Tabela 3.5 apresenta as principais características dos sensor TM, através do qual foram obtidas as imagens orbitais empregada neste estudo.

LANDSAT 1, 2 e 3



LANDSAT 4 e 5

Figura 3.13 - Configuração dos satélites LANDSAT.

Fonte: Curram (1985)

Tabela 3.5 - Principais características do sensor TM

BANDA	RESOLUÇÃO ESPECTRAL (μm)	RESOLUÇÃO ESPACIAL IFOV (m)	LARGURA DA FAIXA IMAGEADA (Km)	RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA
1	0,45 - 0,52 AZUL	30 x 30	185	0 - 256
2	0,52 - 0,60 VERDE	30 x 30	185	0 - 256
3	0,63 - 0,69 VERMELHO	30 x 30	185	0 - 256
4	0,76 x 0,90 INFRA-VERMELHO PRÓXIMO	30 x 30	185	0 - 256
5	1,55 - 1,75 INFRA-VERMELHO MÉDIO	30 x 30	185	0 - 256
7	2,08 x 2,35 INFRA-VERMELHO MÉDIO	30 x 30	185	0 - 256
6	10,4 x 12,5 INFRA-VERMELHO TERMAL	120 x 120	185	0 - 256

Fonte: Richards (1986)

3.1.9 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS EM SENSORIAMENTO REMOTO

3.1.9.1 - A imagem digital

A imagem digital é formada pela conversão do sinal analógico medido pelo sensor em uma representação digital capaz de ser armazenada em fita magnética compatível com o computador para posterior processamento. É uma representação numérica quantizada dos valores de radiância correspondentes a cada célula imageada no terreno ou pixel. Esses valores digitais, inteiros e discretos, são conhecidos como número ou contador digital ou ainda nível de cinza.

A imagem digital pode ser representada por uma matriz de dados, onde as linhas (i) e colunas (j) definem as coordenadas espaciais x e y do pixel e o valor de nível de cinza define a intensidade do sinal (brilho) registrado pelo sensor. Uma mesma cena pode ainda ser observada em várias bandas espectrais e em datas distintas, fazendo com que a imagem digital assuma características de uma matriz multidimensional. Nesse caso, tratando-se de imagens multiespectrais, para cada coordenada (x,y) haverá um conjunto de valores de contador digital. Cada pixel será, portanto, representado por um vetor com tantas dimensões quantos forem os canais espectrais.

Em uma imagem digital, quanto maior o intervalo de possíveis valores assumidos pelo contador digital, maior a sua resolução radiométrica. Da mesma forma, a resolução espacial será maior quanto menor for a dimensão do pixel, medido no terreno.

O processamento digital de imagens é a manipulação numérica de imagens digitais com a finalidade de melhorar o poder de discriminação.

3.1.9.2 - Técnicas de processamento e classificação de imagens digitais

a) Técnicas de processamento

As técnicas de processamento de imagens digitais têm como objetivo destacar determinadas informações espectrais e melhorar o aspecto visual da imagem, facilitando o processo de interpretação visual. Para isso,

empregam funções matemáticas, alterando os números ou contadores digitais de uma imagem.

Em alguns casos, modificam totalmente o valor original dos números digitais. Portanto não devem ser aplicadas quando o objetivo do usuário for conhecer as variações da radiância de alvos naturais. Podem também anteceder processos de classificação digital, propiciando melhor precisão no processo classificatório do que nos canais originais.

As técnicas de processamento empregadas nesse estudo foram técnicas de filtragem espacial e técnicas de rotação no espaço multi-espectral (componentes principais).

As técnicas de filtragem espacial são transformações nos números digitais ou níveis de cinza pixel a pixel, através da aplicação de filtros digitais que consideram a informação espacial ou seja a relação existente entre os pixels vizinhos. Logo, dependem do contexto em que está inserido um dado pixel. Os filtros digitais alteram o contraste das imagens, destacando-se entre eles os filtros do tipo passa-baixas e passa-altas (Figura 3.14).

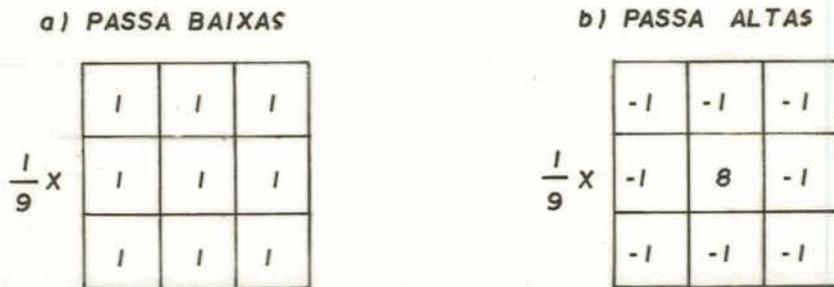


Figura 3.14 - Exemplo de filtros passa-altas e passa-baixas
Fonte:Schowengerd (1983)

Os filtros passa-baixas tendem a aumentar os componentes de baixa frequência espacial e diminuir os de alta frequência. Provocam perda de detalhes e redução de contraste da imagem, porém, atenuam os efeitos dos ruídos existentes numa cena imageada, provocados, por exemplo, por defeito no sensor e erros na transmissão do sinal. Os filtros passa-altas provocam a diminuição dos componentes de baixa frequência espacial e o aumento dos de alta frequência. Ocasionalmente realçam as regiões de transição (bordas) dentro de uma cena. São portanto empregados para enfatizar por exemplo limites de um campo de cultivo, lineamentos geológicos, redes de drenagem e manchas urbanas.

Por outro lado, as imagens produzidas por sensores remotos apresentam geralmente um elevado grau de correlação entre as suas bandas multiespectrais. Isto significa que é possível a predição do valor do contador digital do pixel de uma banda a partir do valor do contador digital correspondente em outra banda. Essa correlação provoca uma redundância de informações. Uma técnica eficiente para eliminar essa inconveniência é a das "componentes principais". Essa técnica consiste basicamente em criar um novo conjunto de "bandas espectrais" a partir das bandas originais, por meio de uma rotação no espaço multi-espectral. A rotação é calculada de forma a diagonalizar a matriz covariância das novas bandas que são denominadas de componentes principais e não são correlacionadas entre si.

b) Técnicas de classificação digital

As técnicas de classificação digital são processos computacionais que empregam algoritmos capazes de reconhecer pixels espectralmente similares de uma imagem digital. Dessa forma, cada pixel é associado a um rótulo ou tema, identificando as diversas classes ou tipos de cobertura da superfície terrestre. O resultado da classificação digital é uma imagem temática com a distribuição geográfica de um ou mais temas como por exemplo, tipo de vegetação, tipo de solo, mancha urbana, etc. Quando georeferenciada, essa imagem classificada pode ser implementada em um SIG.

De acordo com Richards (1986) o meio mais eficiente para representar dados multiespectrais e formular algoritmos de classificação digital é a definição de um espaço multiespectral com uma dimensionalidade igual ao número de bandas espectrais utilizadas na classificação. Nesse espaço, cada pixel tem sua posição definida através do valor do respectivo contador digital em cada uma das componentes espectrais. A Figura 3.15 exemplifica um espaço espectral bidimensional, evidenciando a sua relação com a característica de reflectância espectral de diferentes tipos de cobertura do terreno.

Na medida em que as bandas escolhidas discriminam adequadamente as feições existentes na imagem, os pixels formam agrupamentos no espaço multiespectral ("clusters") que estão associados a uma determinada classe de cobertura do terreno. A forma do agrupamento, especialmente o grau de dispersão (ou espalhamento) depende de diferenças (variabilidade na resposta espectral) dentro de cada classe. Em alguns casos pode inclusive ocorrer que um mesmo tipo de cobertura do solo seja representado por mais de um agrupamento no espaço multiespectral. Neste caso, a classe de cobertura do terreno pode ser vista como uma composição de vários agrupamentos ou classes espectrais como

demuestra a Figura 3.16. A Figura 3.17 representa de forma simplificada a rotulação dos pixels de uma imagem como pertencentes a determinada classe espectral.

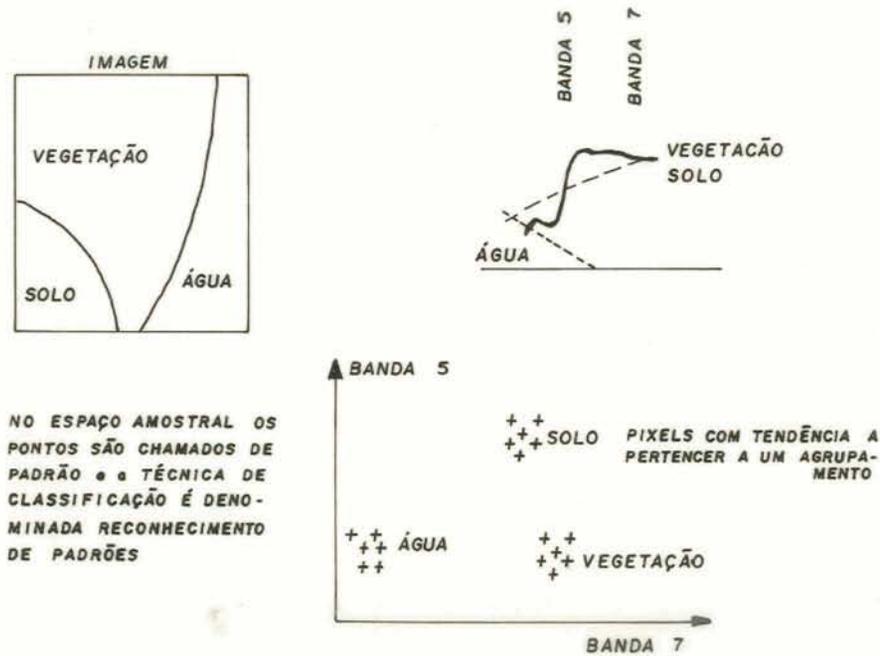


Figura 3.15 - Espaço espectral bidimensional mostrando a sua relação com as características de reflectância espectral de diferentes tipos de cobertura da superfície terrestre.
 Fonte: Richards (1986)

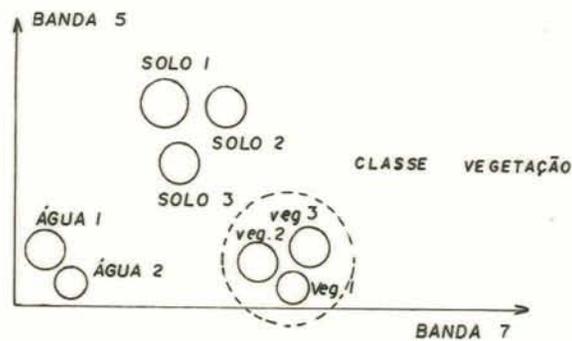


Figura 3.16 - Representação das classes de cobertura do terreno por um conjunto de agrupamentos de classes espectrais

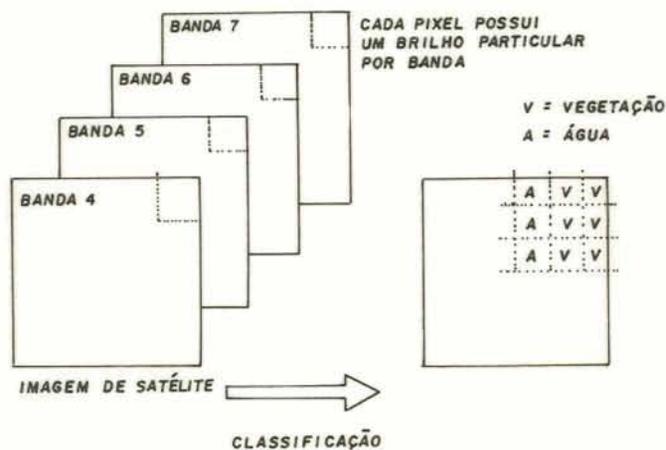


Figura 3.17 - Esquema de rotulação de pixels de uma imagem LANDSAT MSS.
Fonte: Richards (1986)

Já os processos de classificação podem ser divididos em dois grupos: classificação não supervisionada e classificação supervisionada.

No processo de **classificação não supervisionada** os algoritmos computacionais empregados são capazes de identificar por si só as classes (clusters) dentro de um conjunto de dados. Isto é, localizam as ocorrências de grandes concentrações de pixels com padrões semelhantes de uma imagem e adotam tais feições como sendo classes dessa imagem.

No processo de **classificação supervisionada** o espaço multiespectral é particionado em regiões associadas às classes. Para tanto, são utilizadas as chamadas **funções decisões ou discriminantes** com natureza probabilística ou não. Em ambos os casos os parâmetros dessas funções são estimados a partir de amostras de cada classe escolhida pelo analista. Logo, torna-se necessário o conhecimento prévio da cena estudada.

No que diz respeito às funções discriminantes, Swain-Davis (1978) sugere que cada elemento da imagem multiespectral pode ser representado na forma de um vetor X com n dimensões, onde n é o número de bandas utilizadas. Assim, esse pixel-vetor pode ser identificado em um espaço n -dimensional. Identificados vários pixels-vetor referentes a uma mesma classe de cobertura do terreno, obtém-se um agrupamento de pontos. Ainda segundo o autor, é possível

associar regiões do espaço multiespectral a classes específicas de cobertura do terreno (Figura 3.18). Estas classes são então ditas discrimináveis e todas as demais indiscrimináveis.

O processo de classificação supervisionada dos pixels que compõe uma cena consiste, portanto, basicamente de duas etapas: a escolha da forma geral mais adequada para a função decisão e a estimação dos parâmetros que aparecem nas função decisão a partir das amostras disponíveis de cada classe.

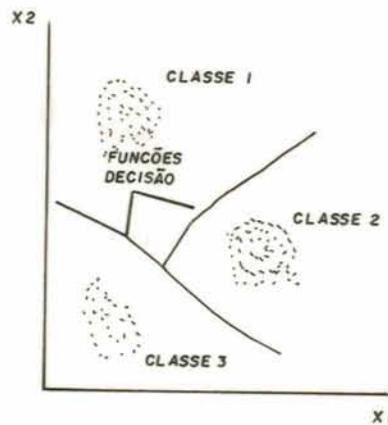


Figura 3.18 - Regiões de decisão em um espaço bidimensional
Fonte: Swain- Davis (1978)

Assim, supondo-se a existência de m classes e que as regiões de decisão correspondentes a cada classe estejam definidas, pode-se determinar um conjunto de m funções de X , pixel-vetor, denominadas **funções decisões** e representadas por $g_1(X), g_2(X) \dots g_n(X)$, onde $g_i(X)$ é a função discriminante de maior valor quando X pertencer a i -ésima região de decisão. Por esse método, é possível classificar qualquer ponto X_u . Para isso determina-se a qual região X_u pertence, calculando-se os valores de $g_1(X_u), g_2(X_u) \dots g_n(X_u)$. O ponto X_u pertencerá à classe que gerar o maior valor g (Swain-Davis, 1978). Determinadas as funções discriminantes, pode ser então construído o algoritmo classificador (Figura 3.19).

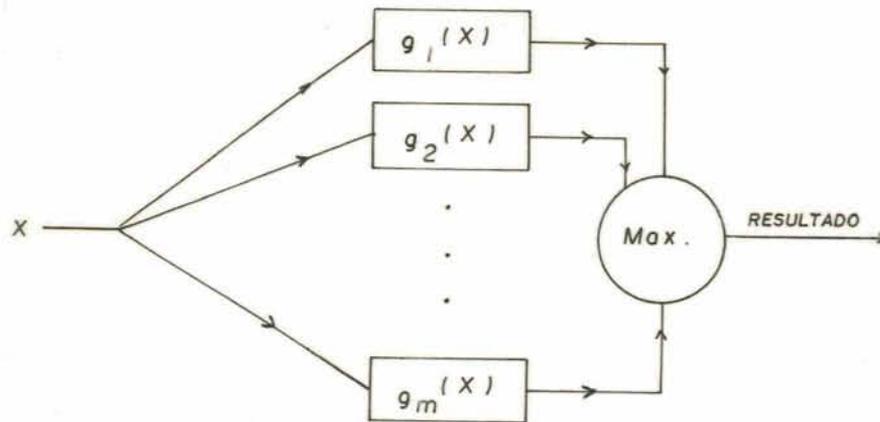


Figura 3.19 - Algoritmo de classificação definido em termos de função discriminante.
 Fonte: Swain-Davis (1978)

Um dos métodos de classificação digital mais empregado atualmente em Sensoriamento Remoto é a **Classificação por Máxima Verossimilhança**. Nesse método a definição das funções decisão ou discriminante esta baseada na teoria estatística. Considera-se que a função probabilidade de cada classe se aproxima a uma função de densidade de probabilidade normal (Gaussiana). A regra de decisão nesse processo classifica um pixel como pertencente a uma classe determinada se a probabilidade de ocorrência desse pixel nessa classe for maior do que nas outras classes.

A função discriminante de acordo com Swain-Davis (1978), neste caso pode ser expressa pela fórmula seguinte:

$$g_i(X) = \frac{p(W_i)}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \cdot \exp \left[- 1/2 \cdot (X - U_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - U_i) \right]$$

onde:

- $g_i(X)$ = probabilidade de que um dado pixel X pertença a classe w_i ;
- $p(w_i)$ = probabilidade "a priori" da classe w_i ;
- Σ_i = matriz covariância associada à classe i ;
- $|\Sigma_i|$ = determinante da matriz covariância de Σ_i ;
- Σ_i^{-1} = inversa da matriz Σ_i ;
- $(X - U_i)^T$ = transposta do vetor $(X - U)$;
- U_i = vetor média.

Uma formulação matemática mais detalhada sobre o método de classificação supervisionado utilizando a Máxima Verossimilhança pode ser encontrada em Swain-Davis (1978), Richards (1986), além de outros.

3.2 - SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS - SIG

3.2.1 - BREVE HISTÓRICO

As primeiras tentativas de integração de dados de maneira integrada de uma determinada região, visando estudos ambientais, ocorreu durante as décadas de 1960 e 1970, quando ficou evidente a importância da multidisciplinariedade na avaliação dos recursos naturais e no planejamento do uso do solo. Inicialmente, passaram a ser utilizados materiais transparentes sobre mesas iluminadas, a fim de permitirem a superposição dos diversos mapas temáticos.

Já ao encerrar-se a década de 1970, o avanço da tecnologia dos computadores trazia grandes perspectivas para o aperfeiçoamento dos sistemas de informação vigentes, em especial à cartografia. Também nesse período verificou-se importante desenvolvimento nas técnicas da aerofotogrametria e sensoriamento remoto orbital

Logo, o aprimoramento dos tradicionais meios de obtenção de dados geográficos, com o apoio das novas tecnologias, acabou incentivando esforços no sentido de buscar a associação das informações disponíveis. Surgiam assim os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs).

No início dos anos 80, com o aperfeiçoamento da informática, os SIGs tornaram-se sistemas plenamente operacionais.

Hoje, esses sistemas são cada vez mais utilizados em instituições de pesquisa e de produção, de órgãos públicos ou iniciativa privada.

No Brasil, o SIG mais difundido foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a partir de 1984, visando de início a extração de informações com base nas imagens de satélites para estudo do meio ambiente (Câmara Neto & Erthal, 1987).

3.2.2 - CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Os Sistemas de Informações Geográficas são sistemas de geoprocessamento capazes de armazenar, recuperar e analisar dados em uma base georeferenciada num ambiente computacional. Uma base de dados é dita georeferenciada quando os seus dados possuem, como um de seus atributos, a localização geográfica (Silva, 1988).

Para Star & Estes (1990) os SIGs "são sistemas de informações destinados a trabalhar com dados referenciados espacialmente, tendo como objetivo serem ferramentas eficientes de planejamento para todas as aplicações que se utilizarem de mapas."

Portanto, todas as atividades que envolvem coleta de dados sobre a superfície da Terra podem se beneficiar de sistemas dessa natureza.

Entre os objetivos principais dos SIGs, destacam-se:

- a utilização numa única base de dados de informações espacialmente distribuídas como as provenientes de mapas, dados censitários, de cadastro urbano e rural, imagens de satélite, e modelos numéricos de terreno (MNTs) entre outros;

- a combinação, através de algoritmos de manipulação, das diversas informações existentes no sistema, gerando mapeamentos derivados, segundo modelos pré-estabelecidos;

- a reprodução, visualização e plotagem do conteúdo da base de dados geocodificados.

Neste contexto, cabe destacar dois poderosos recursos dos SIGs: o cruzamento ou superposição de informações ou planos de informação - PIs e a atualização constante de dados.

A Figura 3.20, na página seguinte, mostra graficamente o conceito de superposição de planos de informação nos SIGs.

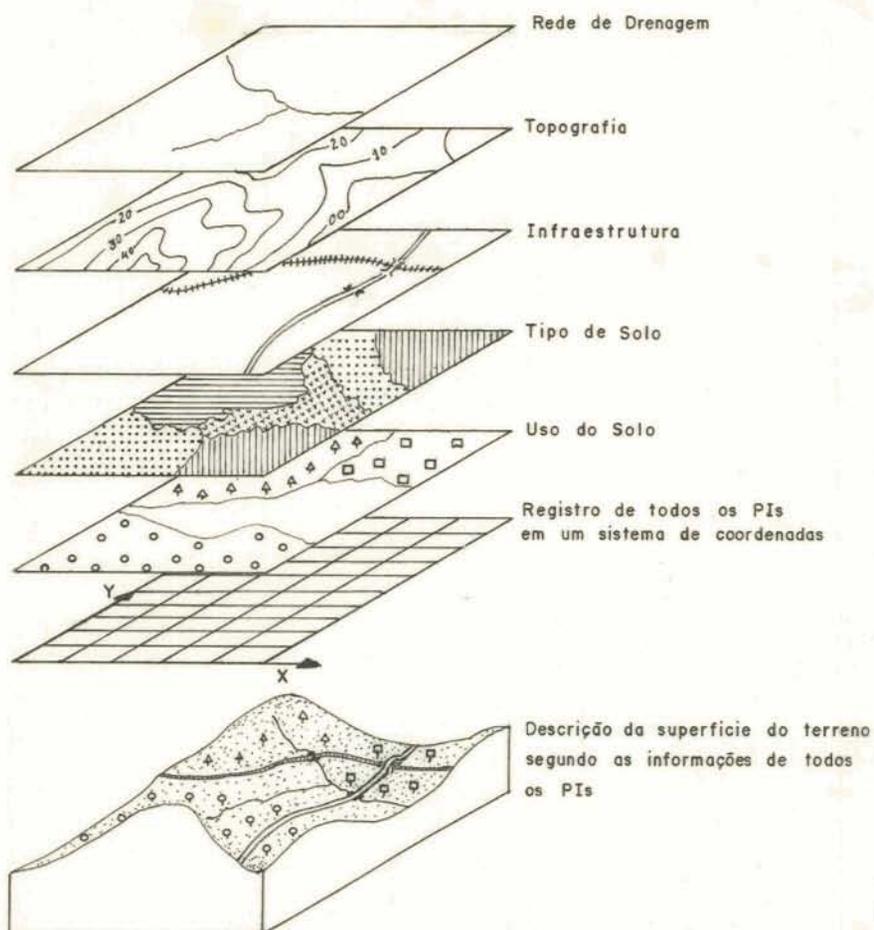


Figura 3.20 - Conceito de superposição nos SIGs.

Fonte: Sistemas de Información Geográfica en la FAO (1989)

3.2.3 - PLANOS DE INFORMAÇÃO E CATEGORIAS

Os SIGs encontram-se estruturados em duas noções centrais: plano de informação e categoria.

Um **plano de informação (PI)** contém, de forma georeferenciada, dados referentes a um determinado tema. Felgueiras & Câmara (1993), em analogia com a cartografia convencional, sugerem que cada PI corresponda a um

"overlay", onde cada componente de uma carta é armazenado separadamente como um conjunto de dados georeferenciados.

Todos os PIs, bem como suas características principais devem ser definidos na etapa inicial de um projeto.

Normalmente, as informações geográficas apresentam-se em distintos formatos e em diferentes topologias. Para que possam ser tratadas pelos SIGs, é necessário que grandezas geográficas de natureza semelhantes sejam agrupadas dentro de uma **categoria**, que engloba todos os tipos de dados com a mesma representação e tratamento pelo sistema.

O SIG utilizado neste estudo foi desenvolvido pelo INPE e denominado Sistema Geográfico de Informações (SGI), reconhecendo as seguintes categorias: temática, modelo numérico de terreno (MNT) e imagem.

Conforme Felgueiras & Câmara (1993), os PIs de categoria temática contêm informações planimétricas, objetos definidos no espaço bidimensional, agrupados por temas ou classes. Os PIs de categoria MNT especificamente contêm ainda atributos associados à cota ou altitude. Isso implica que seus objetos além de uma descrição geométrica no espaço (x,y), possuem um atributo representado no eixo z (cota). Finalmente, os PIs de categoria de imagem abrangem as imagens não temáticas como as obtidas através de Sensoriamento Remoto.

Portanto, cada projeto poderá ter vários Planos de Informações (PIs), onde cada PI pertencerá a uma das três categorias acima descritas, conforme exemplifica a Tabela 3.6. Cada entidade geográfica distinta ou objetos gráficos de um PI podem ainda ser agrupados segundo classes ou temas escolhidos pelo usuário.

Tabela 3.6 - Exemplos de planos de informação e categorias

CATEGORIA	PLANOS DE INFORMAÇÃO
TEMÁTICA	malhas viárias, vegetação, drenagem, uso do solo, lotes
MNT	malha altimétrica
IMAGEM	imagens orbitais, aerofotografias

3.2.4 - COMPONENTES DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Podemos dividir os SIGs em dois componentes fundamentais: o "hardware" ou equipamentos computacionais e o "software" ou programas aplicativos.

a) Equipamentos computacionais

O hardware normalmente é constituído por:

- a) unidade central de processamento (UCP);
- b) uma unidade de disco rígido para o armazenamento de dados e programas;
- c) uma unidade digitalizadora para a conversão de dados gráficos e mapas para o formato digital, necessário ao processamento;
- d) um traçador gráfico ou outro sistema de saída gráfica para a representação gráfica dos dados processados;
- e) uma unidade de fita para a interligação com outros sistemas.

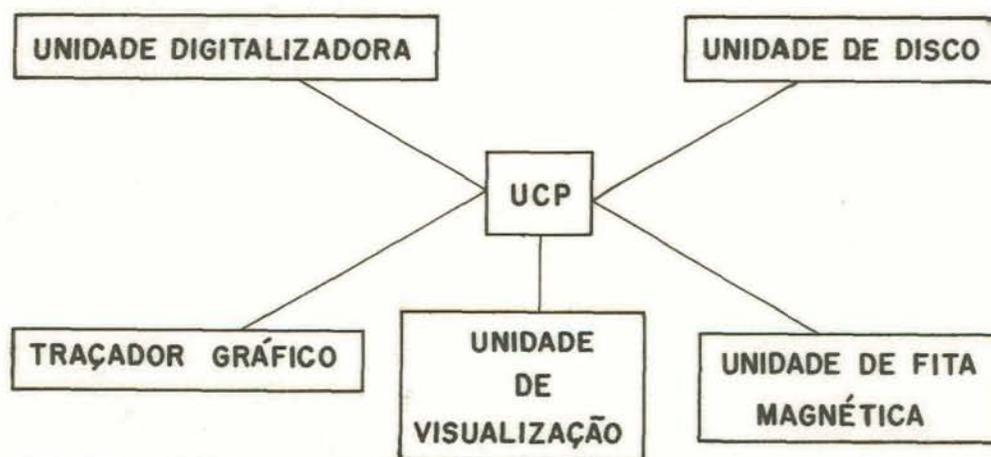


Figura 3.21 - Componentes do hardware dos SIGs
Fonte: Burrough (1986)

b) Programas aplicativos

Segundo Burrough (1986), o software para os Sistemas de Informações Geográficas consiste de cinco módulos técnicos básicos:

- a) entrada dos dados;
- b) armazenamento e gerenciamento dos dados;
- c) saída e apresentação dos dados;
- d) transformação dos dados;
- e) interação com o usuário.

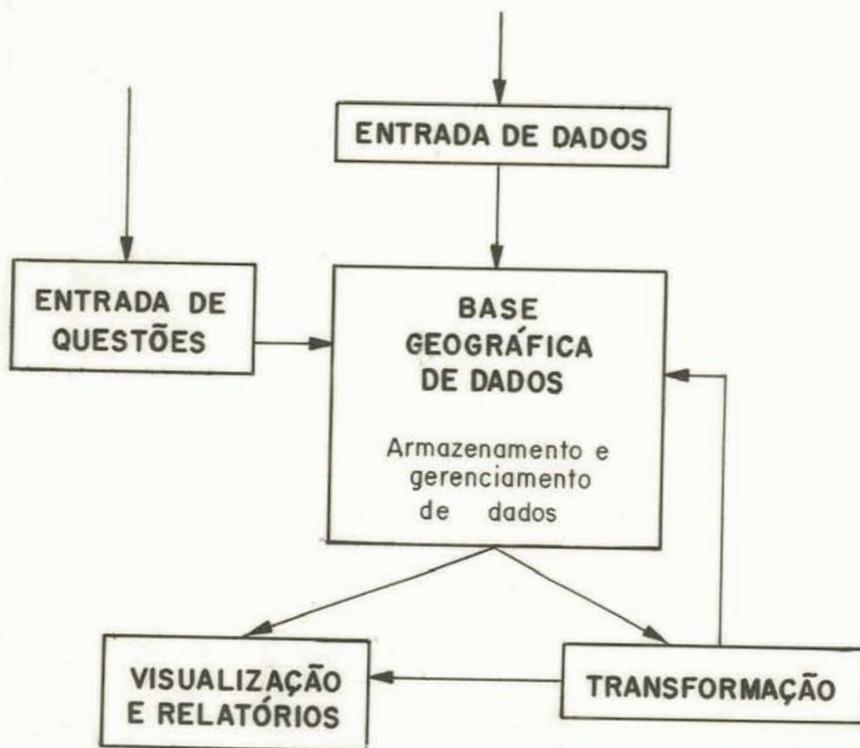


Figura 3.22 - Principais componentes do software dos SIGs
Fonte: Burrough (1986)

O módulo de entrada de dados engloba todos os programas necessários à transformação para a forma digital das informações iniciais. Essas informações normalmente estão na forma de mapas, observações de campo, aerofotografias, imagens orbitais e devem ser transformadas para tornarem-se compatíveis com o computador. Conforme Risso (1993), esses programas controlam também 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.

O módulo de gerenciamento e armazenamento define a maneira pela qual os dados serão estruturados e organizados em função da sua posição, topologia e atributos descritivos. Ainda segundo Risso (1993), essa estruturação e organização são função da forma como esses dados serão manipulados no sistema e da maneira como serão percebidos pelo usuário.

A transformação dos dados, de acordo com Burrough (1986) engloba duas classes de operações:

- a) correção de erros e atualização dos dados ou acréscimo de novas informações;
- b) métodos de análise a serem aplicados aos dados de modo a responder as questões realizadas ao SIG.

Mudança de escala, ajuste de dados a novas projeções e cálculo de áreas e perímetros são exemplos de transformações possíveis.

Na saída, a visualização dos dados poderá ocorrer na forma de cartas temáticas, gráficos e tabelas, sendo então plotados, impressos ou visualizados no monitor.

3.2.5 - FORMATO DE REPRESENTAÇÃO DOS DADOS NOS SIGs

Normalmente os dados geográficos procedem de uma grande diversidade de fontes. Os SIGs têm a capacidade de integrar essas informações provenientes de fontes variadas e que portanto necessitam de diferentes formas de representação.

Os dados poderão ser armazenados nos formatos **vetorial** ou **varredura (raster)**. Os dados não-espaciais são armazenados em tabelas de um gerenciador de banco de dados, como por exemplo, dBASE IV (Felgueiras & Câmara, 1993).

a) O formato vetorial

O **formato vetorial** resulta, em geral, da digitalização de mapas. Normalmente, constitui em listas de coordenadas bidimensionais que delimitam regiões temáticas ou representam redes. A representação vetorial de um objeto é uma tentativa de representá-lo mais próximo possível da realidade. Para isso, todas as posições, comprimentos e dimensões das entidades geográficas precisam ser bem definidas.

A representação vetorial, de acordo com Capana (1992) é muitas vezes indicada para pequenas áreas, onde a precisão cartográfica dos dados e a estimativa de áreas são fundamentais.

Outro aspecto a considerar é que a representação vetorial utiliza uma quantidade menor de números do que a raster para um mesmo caso, implicando em um espaço de armazenamento menor na memória do computador. Além disso, a imagem obtida através dessa representação é esteticamente superior à que se obteria em formato raster.

A Tabela 3.7 apresenta os elementos vetoriais utilizados para definir as entidades geográficas.

Tabela 3.7 - Elementos da representação vetorial

ELEMENTOS	DESCRIÇÃO
<p>Pontos</p> 	<p>Entidades geográficas localizáveis por um único par de coordenadas (X,Y).</p> <p>Usualmente, um ponto é um símbolo não relacionado a qualquer outra informação.</p>
<p>Arcos</p> 	<p>Conjunto de coordenadas (X,Y) que descreve uma linha contígua no espaço.</p>
<p>Polígonos</p> 	<p>Constituem-se de regiões limitadas por arcos.</p>
<p>Ilha</p> 	<p>Linha fechada (polígono fechado) em si mesma, coincidindo portanto os pontos inicial e final.</p>
<p>Centróides</p> 	<p>Pontos interiores a um polígono ou a uma ilha, utilizados para associar os atributos de cada região e para a construção de um polígono a partir de arcos que o limitam.</p>

b) O formato raster

A **representação raster ou varredura** consiste num conjunto de células localizadas em coordenadas contíguas, implementadas como uma matriz bidimensional (2D). Cada elemento de imagem, célula ou pixel, é referenciada por índices de linha e coluna e contém um número representando o tipo ou valor do atributo mapeado. Os valores de cada pixel estão limitados usualmente no intervalo de 0 a 255.

Para Silva (1987), a entrada dos dados no formato raster é altamente adequada para a atualização de informações existentes na base de dados, principalmente se a prancheta estiver acoplada à tela gráfica. A entrada maciça de dados cartografados através da digitalização por mesa é, entretanto, muito lenta, pois dever-se-ia passar o cursor sobre todas as linhas e pontos a serem armazenados, os quais têm que ser identificados ao longo da digitalização. Dessa forma, para a atualização de dados na representação vetorial é necessário novamente a entrada das coordenadas dos pontos como também a reconstrução das conexões existentes. Essa tarefa é demorada e sujeita a erros. Na representação raster a atualização de dados, consiste simplesmente na substituição do atributo da célula.

Quando é desejado a superposição de diversos mapas temáticos, contendo diferentes tipos de informações, o formato raster apresenta maior eficiência. Logo será preciso realizar uma conversão para esse formato se a informação original estiver apresentada na forma vetorial. No processo de conversão o tamanho da célula pode tornar-se um fator crítico, induzindo a erros significativos (Figura 3.23) principalmente quando as dimensões da célula for grande em relação a resolução espacial dos temas dos mapas (por exemplo áreas pequenas). A Figura 3.24 compara os formatos raster e vetorial.

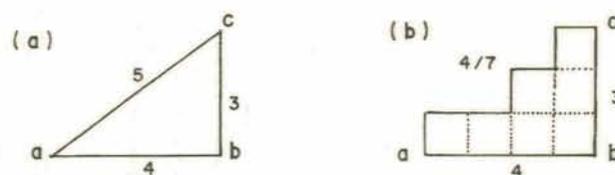


Figura 3.23 - A transformação para o formato raster apresenta pequenos erros na estimativa das distâncias e das áreas devido ao tamanho da célula.
Fonte: Burrough (1986)

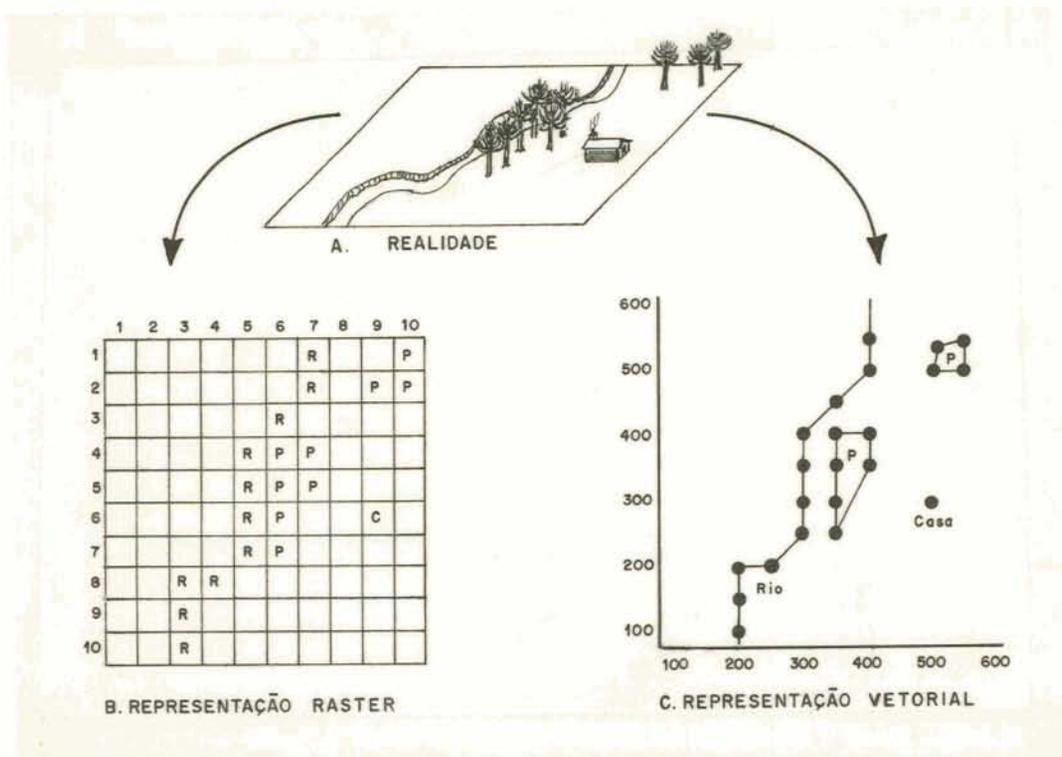


Figura 3.24 - Comparação entre o formato raster e o formato vetorial
 Fonte: Arnoff (1991)

3.2.6 - OPERAÇÕES DE ANÁLISE DISPONÍVEIS NOS SIGs

O usuário pode através da análise de um PI ou pelo cruzamento dos dados espaciais existentes em vários PIs na base de dados obter novas informações.

Para tanto, poderão ser obtidos processamentos mais complexos como as operações exemplificadas por Felgueiras & Câmara (1993):

- a) **reclassificação** - definição de um novo PI pela união de classes de um PI existente na base de dados;
- b) **fatiamento de um MNT** - geração de um novo PI com regiões que agrupam classes de intervalos de cota de um MNT;

- c) **cruzamento** - operações lógicas entre as classes de dois ou mais PIs, podendo gerar um novo PI pela união, intersecção ou negação das classes dos PIs;
- d) **ponderação** - operações de média ponderada dos pesos das classes de PIs escolhidos pelo usuário;
- e) **operações com grades** - obtenção de uma nova grade de saída a partir de uma operação aritmética sobre uma grade de entrada.
- f) **combinação de grades** - realização de operações aritméticas entre duas grades regulares criando uma nova grade;
- g) **cálculo de áreas de classes** - cálculo de área para todas as classes de um PI;
- h) **cálculo de volumes a partir de um MNT** - cálculo de volumes de corte e aterro em relação a uma cota base ou de referência;
- i) **geração de mapas de distâncias** - obtenção de um mapa de distâncias a partir de um conjunto de classes selecionadas de PI;
- j) **geração de mapas de declividades** - geração de mapas de declividades a partir de um MNT no formato imagem;
- l) **geração de perfis em MNTs** - obtenção de perfis de terreno a partir da definição de trajetórias sobre uma região;
- m) **consulta ao banco de dados.**

3.2.7 - O SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS DO INPE - SGI

Com vistas a atender as necessidades do nosso país, de dimensões continentais, e onde há grande carência de informações adequadas para o processo de tomada de decisões sobre os problemas urbanos e ambientais a Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu o sistema denominado Sistema Geográfico de Informações - SGI.

Esse sistema utiliza ambiente de microcomputadores compatível com a linha IBM-PC, sob o sistema operacional DOS, e é compatível com o sistema de tratamento de imagens, SITIM, também desenvolvido por aquele Instituto. Sua configuração básica é a seguinte:

- a) **microcomputador** - compatível com a linha IBM-PC/XT, AT 386 ou 486, com memória principal mínima de 1 MByte;
- b) **periféricos** - disco rígido de pelo menos 40 Mbytes, disco flexível de 5"1/4 ou 3"1/2, terminal de vídeo alfanumérico e teclado alfanumérico padrão;
- c) **placa gráfica** para armazenamento de imagens e gráficos, padrão TIGA, com 1 ou 4 planos gráficos de 1020 x 1024 pixels por plano, com 256 níveis de cinza (8 bits por pixel);
- d) **monitor colorido multisync** com resolução de 1024 linhas por 768 pontos;
- e) **mesa digitalizadora** - envia ao sistema as coordenadas de cada ponto do desenho na forma digital para que sejam processadas;
- f) **plotter** - periférico que desenha as imagens geradas em uma folha de papel;
- g) **impressoras** - de transferência termal ou tipo "inkjet".

O software do SGI-INPE é composto pelos cinco sub-sistemas abaixo:

- a) **Definição:** montagem do ambiente de trabalho;
- b) **Entrada:** inserção de novos dados (e seus atributos), incluindo a transferência de dados do SITIM-SR para o SGI;
- c) **Conversão:** conversão de formato dos dados de um mesmo PI e transformações geométricas;
- d) **Manipulação:** geração de informações geográficas derivadas a partir de operações e análises no conteúdo da base de dados geo-codificada;
- e) **Saída:** geração de documentos cartográficos e listagens;

O sistema possui também um gerenciador responsável pelo armazenamento e pela recuperação das informações da base de dados do SGI.

O detalhamento desses sub-sistemas e programas pode ser encontrado no Manual de Referência do SGI (1993).

No presente estudo foi empregado o SGI-340, disponível no Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia - UFRGS.

3.3 - MODELAGEM NUMÉRICA DO TERRENO - MNT

3.3.1 - ASPECTOS GERAIS

Modelagem Numérica do Terreno (MNT) é a representação numérica do relevo de uma superfície através das cotas ou das altitudes. Portanto, expressa numericamente a distribuição espacial do relevo do terreno.

É gerado a partir de um conjunto de vetores (x,y,z) , onde as componentes x e y estão relacionadas às posições de amostragem na superfície e a componente z ao atributo cota ou altitude associado a (x,y) . Obviamente a mesma metodologia poderá ser empregada para descrever outros atributos como temperatura, teor mineral de um solo, etc.

A modelagem numérica do terreno viabiliza os seguintes recursos:

- determinação do modelo através de técnicas de interpolação a partir de dados não regularmente distribuídos;
- geração de mapas de contorno (isolinhas);
- confecção automática de mapas de declividade (módulo da declividade) e de aspecto (direção da declividade);
- visualização da cena em três dimensões (3D);
- cálculos de volumes;
- elaboração de cortes transversais para análises de perfis.

3.2.2 - REPRESENTAÇÃO DE MNT

O relevo de uma superfície pode ser descrito por funções matemáticas ou através de imagens geradas através de modelos de linhas ou (e) modelo de pontos (Burrough, 1986).

O **modelo de linhas** também denominado modelo de isolinhas, é a representação do MNT por uma série de curvas resultantes da intersecção da

superfície com planos de cota ou altitude constante (planos horizontais). Esse processo não é adequado para descrever e analisar o terreno em um ambiente de computador, dada a heterogeneidade na distribuição dos dados.

O **modelo de pontos** consiste em uma Rede Irregular Triangulada ou em uma Matriz de altitude ou Grade Regular Retangular.

A **Rede Irregular Triangulada** é constituída por uma série de sub-áreas triangulares, ajustadas à superfície topográfica, baseada no princípio de que uma superfície plana ajusta-se a quaisquer três pontos não colineares.

Maiores detalhes sobre o modelo de linhas e modelo de pontos através da Rede Irregular Triangulada pode ser encontrado em Burrough (1986) e Riso (1993).

A **Matriz de altitude ou Grade Regular Retangular**, detalhada abaixo, gera o Modelo Numérico do Terreno a partir da interpolação de isolinhas e pontos de cota ou altitude conhecida.

Finalmente, MNT pode ser representado no formato imagem através do refinamento de um modelo de grade. Nesse caso, os valores de cotas ou altitudes reais do terreno estarão representados na imagem na forma de números inteiros, num intervalo correspondente a 256 níveis de cinza.

a) O modelo matriz de altitude ou grade regular retangular

A **matriz de altitude ou grade regular retangular** (Figura 3.25) é obtida através de medições sobre pares estereoscópicos de fotografias aéreas, empregando estereo-restituídos. Pode ser produzida ainda a partir da interpolação de dados pontuais regular ou irregularmente espaçados.

Devido ao fato de que as dimensões da célula na grade são constantes, este tipo de MNT apresenta um número desnecessariamente grande de dados em áreas de relevo plano ou suave e dados insuficientes em áreas de relevo muito acidentado.

Apesar dessas limitações, a matriz de altitude é o modelo mais utilizado para a geração de MNT, facilitando a geração de isolinhas, declividades, orientação azimutal e sombreamento de relevo (Burrough, 1986).

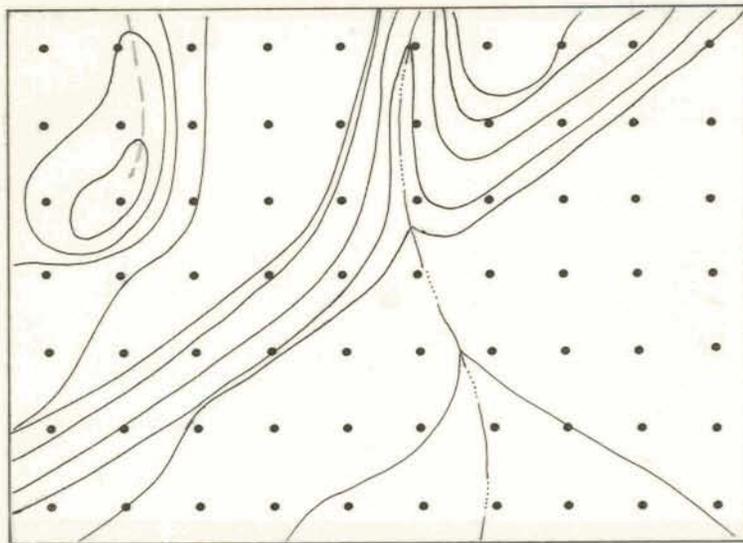


Figura 3.25 - Matriz de altitude ou grade regular retangular
 Fonte: Aronoff (1991)

b) O processo de interpolação de dados

Nos locais onde há ausência de informações, os valores da matriz de altitude são determinados através da interpolação dos dados disponíveis dentro de uma determinada vizinhança.

Os processos de interpolação podem ser de **transição abrupta** ou **transição gradual**.

Os modelos de interpolação de transição abrupta, também denominados interpoladores de fronteira, consideram que todas as variações importantes ocorrem entre regiões ou unidades, dentro das quais o atributo em análise comporta-se de forma homogênea e isotrópica. Segundo esse modelo, a melhor estimativa para o valor do atributo z em um ponto desconhecido corresponde ao valor do ponto amostrado mais próximo. Não são, portanto, indicados para geração de matrizes de altitude, cujos valores apresentam uma transição gradual.

Para a geração de matrizes de altitude são indicados os modelos de interpolação de transição gradual, mais adequados à descrição de superfícies contínuas.

Os modelos de transição gradual podem ainda ser divididos em técnicas de ajuste global e técnicas de ajuste local. No primeiro caso, o modelo é construído considerando todos os dados disponíveis na amostra. São mais indicados para a modelagem de fenômenos que apresentam grandes intervalos de variação.

Já as técnicas de ajuste local consideram apenas os dados localizados na vizinhança do ponto a ser interpolado. São indicadas para estudos de fenômenos como a altimetria, que apresenta pequeno intervalo de variação e consequentemente um número elevado de pontos amostrais.

Neste estudo utilizou-se o interpolador de transição gradual e ajuste local denominado **método da média móvel ponderada** disponível no SGI-INPE.

c) Interpolação pelo método da média móvel ponderada

Esse método interpola o valor da variável z através do cálculo da média ponderada dos valores amostrados em sua vizinhança, tomando como elemento ponderador o inverso da distância entre o ponto com cota ou altitude conhecido e o ponto a ser interpolado.

O método da média móvel ponderada pode ser representado pela fórmula abaixo:

$$Z(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3.3)$$

onde:

n é o número de amostras utilizadas para estimar $Z(x_j)$;

$Z(x_j)$ é a estimativa da altitude no ponto x_j ;

$Z(x_i)$ é a amostra de altitude no ponto x_i ;

w_i é o peso em função da distância euclidiana d do ponto a ser interpolado ao seu vizinho;

$\sum w_i$ é um elemento normalizador.

$$w = 1/d^m \quad (3.4)$$

Segundo Burrough (1986) a ponderação mais utilizada é pelo inverso da distância ao quadrado, quando m assume o valor 2.

O peso w é uma função do tipo recíproca (d^{-m}) para que tenda a zero a medida em que aumenta a distância entre o valor estimado e o valor amostrado.

d) O método da procura

Visando otimizar o tempo computacional na geração de uma matriz de altitude pode ainda ser introduzido no processo de interpolação o **método da procura**, pelo qual fica definida a região em que os pontos amostrados e a serem utilizados se encontram.

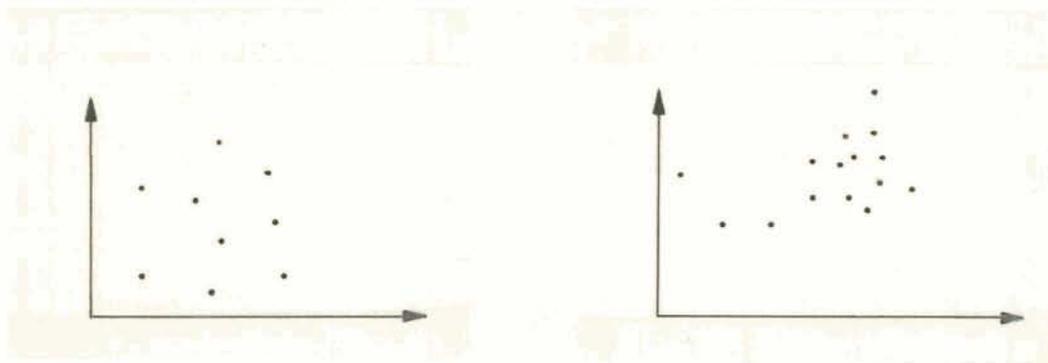
Dessa maneira, uma área de procura ou vizinhança é estabelecida para cada ponto a ser estimado. Para cada vizinhança é determinado o tamanho do espaço amostral (raio de procura) e o número de pontos mais próximos a serem utilizados no processo de interpolação. Quanto menor o número de pontos dentro desta vizinhança, menor será o tempo de interpolação.

O raio de procura estabelece a distância máxima que um ponto amostrado deverá estar do ponto a ser interpolado. Para um número de amostras elevado, a determinação de sub-espacos amostrais através do raio de busca conduzirá um grande ganho no tempo computacional com pouca ou nenhuma perda na precisão dos resultados do processo de interpolação.

O método da procura poderá ser normal, por quadrante ou por octante:

- a) **normal** - para estimar o valor do atributo associado a um elemento da grade utiliza os n vizinhos mais próximos;
- b) **por quadrante** - a área de procura é dividida em quatro setores ou sub-regiões de vizinhança;
- c) **por octante** - a área de procura é dividida em oito setores ou sub-regiões de vizinhança.

Quando os pontos amostrais encontrarem-se aleatoriamente distribuídos no espaço é aconselhável a utilização do método normal, evitando a tendenciosidade no processo de interpolação (Figura 3.26).

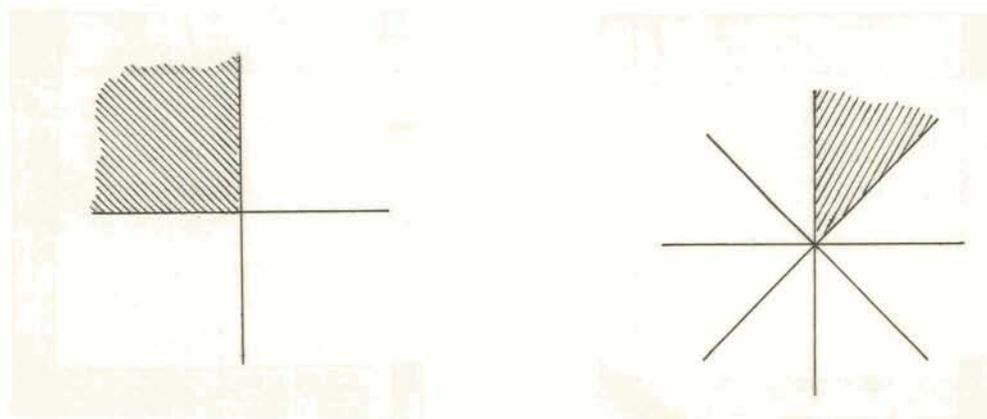


a - pontos aleatoriamente distribuídos

b - tendencioso

Figura 3.26 - Método de procura normal
Fonte: Rizzo (1993)

Os métodos de procura por quadrante ou por octante são indicados quando ocorrerem agrupamentos de pontos com a mesma altitude (Figura 3.27). Em ambos os métodos é atribuído a cada setor um número máximo de pontos a serem considerados no processo de interpolação para o ponto central.



a - procura por quadrante

b - procura por octante

Figura 3.27 - Método de procura por quadrante e por octante
Fonte: Rizzo (1993)

No presente estudo, o Modelo Numérico do Terreno foi gerado a partir de curvas de nível digitalizadas, que são na verdade, um caso especial de agrupamento de pontos amostrais.

As curvas de nível são linhas constituídas por pontos de mesma altitude muito próximas entre si e em determinadas situações como no caso da Figura 3.28, onde todos os pontos mais próximos dentro da vizinhança tem a mesma altitude, os métodos de procura normal, por quadrante ou octante poderão gerar uma interpolação tendenciosa.

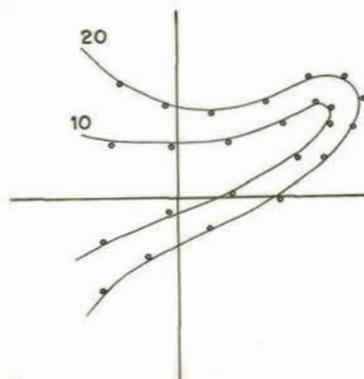


Figura 3.28 - Procura dos "n vizinhos mais próximos por quadrante e por cota".
Fonte: Riso (1993)

Felgueiras *et al.* (1988) sugere neste caso a utilização do método de procura dos "n pontos mais próximos por cota e por quadrante". Por esse método somente um ponto de cada isolinha digitalizada, dentro de cada quadrante da vizinhança, será considerado o mais próximo de todos e portanto será empregado no processo de estimativa dos pontos da superfície a ser interpolada.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

De acordo com o especificado no Capítulo 1, esta pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para a aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto, Modelagem Numérica do Terreno (MNT) e Sistema de Informações Geográficas (SIGs) no planejamento racional do uso do solo urbano. Nesse contexto, pretende-se viabilizar o uso dessas ferramentas básicas para a partir da identificação de fatores do meio físico limitantes ao desenvolvimento urbano como altas declividades, tipo de solo, substrato geológico e áreas inundáveis, determinar áreas com suscetibilidade preliminar à erosão laminar, áreas com restrição ao uso urbano e áreas sujeitas a eventos perigosos e risco às populações. Da mesma forma, busca-se agilizar a análise e o monitoramento das tendências de expansão da área urbana, e sua interação com o meio físico. Para tanto, a metodologia proposta subdivide-se em quatro etapas, conforme mostra a Figura 4.1. Um esquema mais geral da metodologia está representado na Figura 4.2.

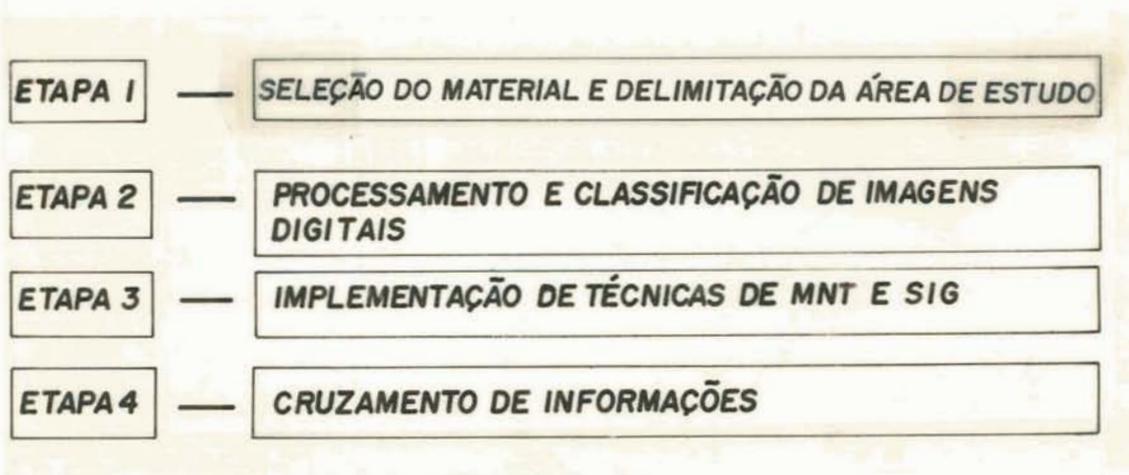
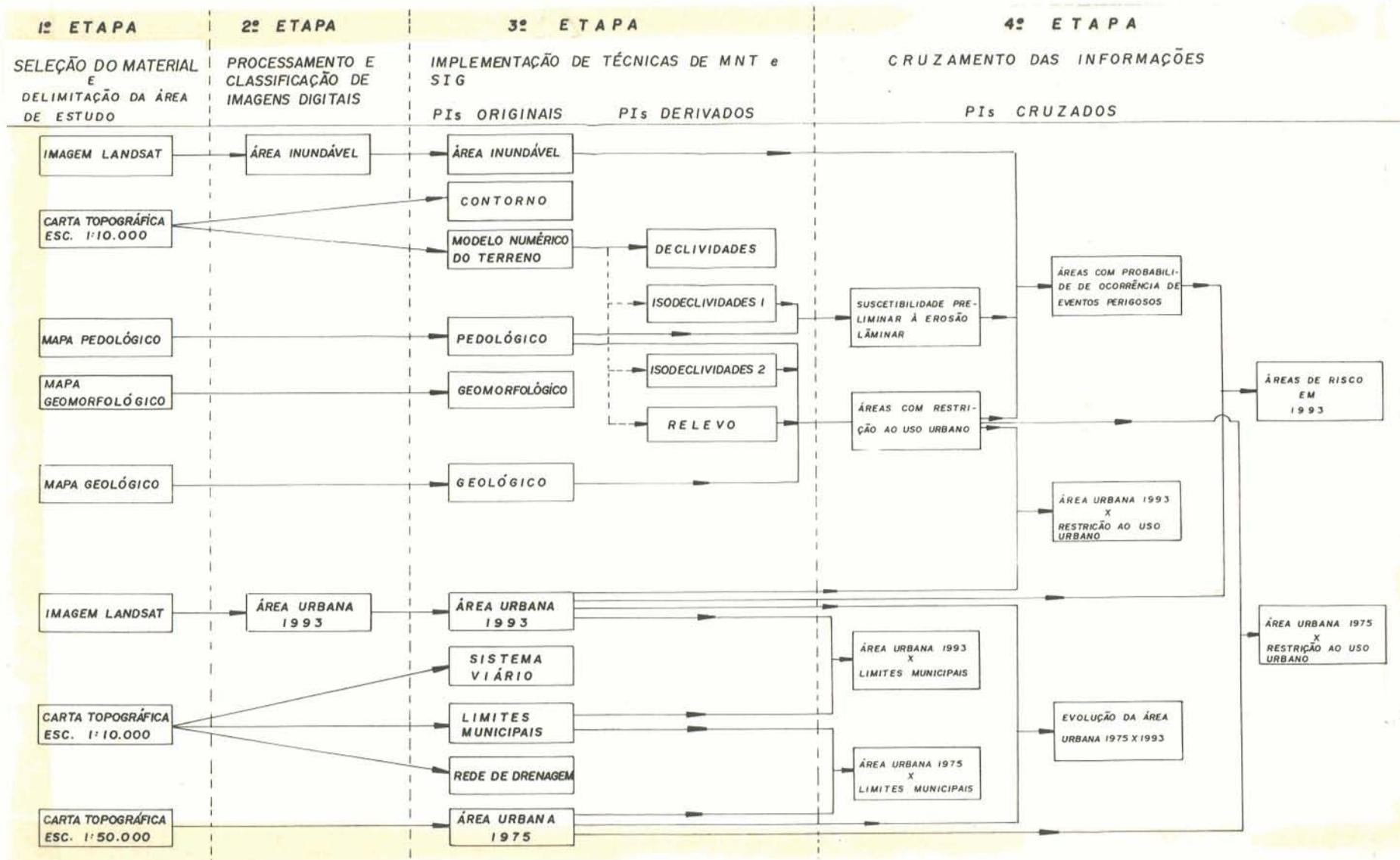


Figura 4.1- Etapas da Metodologia

Figura 4.2 - Esquema geral da metodologia proposta



4.1 - ETAPA 1 — SELEÇÃO DO MATERIAL E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Esta etapa constitui-se na determinação dos limites da área na qual será aplicada a metodologia proposta e na seleção do material necessário à obtenção dos dados georeferenciados que serão implementados posteriormente num Sistema de Informações Geográficas (SIG).

A delimitação da área de estudo tem também como finalidade facilitar a escolha das órbitas ponto das imagens LANDSAT/TM 5 a serem utilizadas na etapa seguinte.

Conforme já foi mencionado no Capítulo 1, com o objetivo de testar a metodologia desenvolvida nesta dissertação é selecionada como área teste a sub-bacia do Arroio Feijó. Nesse caso, a delimitação da sub-bacia utiliza o método do traçado da linha de divisores de água, que separa a bacia considerada das contíguas (Garcez & Alvarez, 1988). Esse procedimento conta com a participação dos técnicos da METROPLAN e é realizado sobre a carta topográfica da Região Metropolitana de Porto Alegre, ano 1972 e escala 1:10.000.

As imagens orbitais e as informações georeferenciadas sobre o meio físico da área teste selecionada são provenientes do Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CESPRM) e da Fundação de Planejamento Metropolitano e Regional (METROPLAN) de acordo com a descrição abaixo:

a) materiais obtidos através do CESPRM:

- carta topográfica, na escala 1:50.000, ano de 1977, da Divisão de Serviço Geográfico do Exército (DSG), Folhas São Leopoldo, MI 29709/4 e Porto Alegre, MI 2987/2;
- imagens orbitais LANDSAT/TM 5, em fitas magnéticas CCTs (Computer Compatible Tape), conforme Tabela 4.1.

b) materiais provenientes da METROPLAN:

- carta topográfica da região metropolitana de Porto Alegre, em escala 1:10.000, baseada em levantamento aerofotogramétrico do ano de 1972;

- mapa geológico da bacia do Rio Gravataí, escala 1:50.000, ano de 1991, elaborado pelo Comitê de Gerenciamento da Bacia do Rio Gravataí e respectivo Relatório Técnico;

- mapas geomorfológico e pedológico da Bacia do Rio Gravataí, escala 1:50.000, executados pelo Projeto Carta Temáticas da Bacia do Rio Gravataí, referente ao Programa Técnico para o Gerenciamento da Região Metropolitana de Porto Alegre, PROTEGER (1994), e seus respectivos Cadernos Técnicos;

- fotografias aéreas, pancromáticas, escala 1:40.000, ano de 1990, ref.111013, Força Aérea Brasileira.

Tabela 4.1- Imagens digitais LANDSAT/TM 5 usadas na pesquisa

DATA DAS IMAGENS	ÓRBITA PONTO	BANDAS
11 de julho de 1984	WRS 221- 81- N	3, 4 e 5
08 de setembro de 1993	WRS 221- 81- N	3, 4 e 7

4.2 - ETAPA 2 — PROCESSAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS ORBITAIS

4.2.1 - ASPECTOS GERAIS

Esta etapa da metodologia consiste no processamento e na classificação das imagens orbitais com a finalidade de identificar na área de estudo as áreas inundáveis, bem como as três classes de uso do solo definidas abaixo:

- a) **área urbana:** correspondendo à classe urbana construída do Nível I, do Sistema de Classificação para Uso e Cobertura do Solo Através de Sensoriamento Remoto proposto por Anderson *et al.* (1976), (Tabela 2.4, Capítulo 2). Portanto, essa classe inclui as áreas edificadas de alta e baixa densidade com uso residencial, comercial e serviços, áreas industriais, espaços

urbanos abertos e áreas não edificadas com usos vinculados às áreas urbanas.

b) loteamento: envolvendo áreas de loteamentos com ocupação de baixa densidade ou em implantação, identificadas nas imagens pela presença de sistema viário, solo exposto pela retirada da vegetação ou terraplenagens.

c) área não urbana: caracterizada pelo uso agrícola, pastagem, florestas, corpos d'água e todos os outros usos considerados não urbanos.

As imagens multiespectrais escolhidas para o processo de classificação são a banda 3 (0,63 μm - 0,69 μm), a banda 4 (0,76 μm - 0,9 μm) e as bandas 5 (1,55 μm - 1,75 μm) ou 7 (2,08 μm - 2,35 μm), de acordo com a disponibilidade existente.

A banda 3 mostra-se a mais adequada para a identificação visual das áreas urbanizadas. Sua escolha justifica-se por estar localizada entre os maiores comprimentos de ondas da região visível do espectro, sofrendo menos os efeitos do espalhamento atmosférico (espalhamento de Rayleigh).

A banda 4, infra-vermelho próximo, fornece informações necessárias ao delineamento de corpos d'água e à discriminação da vegetação, facilitando portanto a classificação das áreas não urbanas.

Finalmente, as bandas 5 e 7, por apresentarem maiores detalhes para a discriminação das classes estudadas, integram as composições coloridas, permitindo um melhor reconhecimento de áreas urbanizadas, áreas com solo exposto e áreas cobertas com vegetação.

Após a escolha das imagens multiespectrais procede-se a operação de registro das mesmas (Capítulo 3) com a carta topográfica adotada como base cartográfica do estudo. Para a área teste da sub-bacia do Arroio Feijó a carta base escolhida é a carta topográfica da DSG, ano 1977, escala 1:50.000 (Folhas São Leopoldo e Porto Alegre).

Na operação de registro das imagens com a carta base são escolhidos quatro pontos de controle na carta, com fácil identificação nas imagens. Terminado o processo, que ocorre por meio da mesa digitalizadora e da função Registro de Imagens, disponível no Sistema Interativo de Tratamento de Imagens do INPE (SITIM-150), os pontos correspondentes nas imagens orbitais passam a coincidir espacialmente entre si e com a base cartográfica adotada.

Em seguida, para a identificação das classes área urbana, loteamento e área não urbana através da classificação de imagens LANDSAT/TM 5, são testados três procedimentos:

- a) **procedimento 1** - Classificação visual, utilizando banda 3 filtrada e composição colorida;
- b) **procedimento 2** - Classificação digital;
- c) **procedimento 3** - Classificação visual, empregando técnicas de componentes principais.

4.2.2 - PROCEDIMENTO 1: CLASSIFICAÇÃO VISUAL, UTILIZANDO A BANDA 3 FILTRADA E COMPOSIÇÃO COLORIDA

Neste procedimento, a identificação das três classes de uso do solo já citadas anteriormente utiliza uma metodologia semelhante a empregada por Pohlmann, Valente e Lahn. (1993) para a região do Delta do Jacuí.

Dessa forma, a banda 3 da imagem LANDSAT/TM 5 é submetida a um processo de filtragem do tipo passa-altas (Capítulo 3) com objetivo de realçar as altas frequências, características da resposta espectral dos alvos urbanos (Welch, 1982).

Para a área teste em questão é utilizada nesse procedimento a banda 3 da imagem de 8 de setembro de 1993 e são testados os quatro filtros descritos abaixo antes da aplicação definitiva do filtro passa-altas.

Filtro 1

-1	-1	-1
-1	10	-1
-1	-1	-1

Filtro 2

-1	-1	-1
-1	14	-1
-1	-1	-1

Filtro 3

-1	-1	-1
-1	16	-1
-1	-1	-1

Filtro 4

-1	-1	-1
-1	20	-1
-1	-1	-1

O filtro adotado é o que apresenta resultados mais satisfatórios, para o caso específico da sub-bacia do Arroio Feijó, ou seja o Filtro 3, na medida em que melhora o aspecto visual da imagem para a análise das áreas urbanas (Figura 4.3).

O aumento do contraste provocado entre as áreas urbanizadas, representadas em tonalidades claras, e as áreas não urbanas, identificadas por uma tonalidade mais escura, facilita a classificação visual da imagem. No entanto, não é possível a separabilidade total entre as áreas edificadas e regiões de solo exposto ou com vegetação pouco densa que, em alguns pontos da imagem de setembro de 1993 da área teste, apresentam respostas espectrais semelhantes. Assim, considerando que é mais fácil reconhecer um alvo pela cor do que pelo tom de cinza (Loch, 1993) utiliza-se também nesse caso a composição colorida da imagem.

A composição colorida resulta da combinação das bandas 3 (filtrada), 4 e 7, associadas respectivamente às cores azul (B), verde (G) e vermelho (R). Essa combinação de canais e bandas além de permitir a visualização dos alvos em cores mais próximas da realidade, facilita através da análise da textura e da tonalidade a separação das classes área urbana, loteamento e área não urbana. As áreas urbanas por exemplo passam a ser identificadas pela cor ciano e magenta e textura suave, enquanto os loteamentos, onde ocorre a presença de solo exposto, são agora identificados pela textura lisa e cor magenta. Já as áreas cobertas por vegetação são identificadas pela cor verde e textura variável. A composição colorida relativa à área teste pode ser encontrada na Figura 4.4.

Tanto o processo de filtragem quanto a elaboração da composição colorida ocorrem no SITIM-150. As imagens tratadas são depois fotografadas em diapositivos através do equipamento denominado Rembrandt.

A seguir, os diapositivos com as imagens referentes à banda 3 filtrada e à composição colorida são analisadas no projetor-amplificador de imagens (PROCON). Ainda no PROCON, procede-se o mapeamento das três classes de uso do solo sobre uma base cartográfica em escala 1:50.000, elaborada a partir da base cartográfica empregada na pesquisa.

Finalmente, constatando-se a difícil separação visual em determinadas regiões da área teste, principalmente entre as classes área urbana e área não urbana, devido a presença de solo exposto e vegetação pouco densa, realiza-se uma verificação da classificação procedida. Essa verificação ocorre num primeiro momento por meio de aerofotografias pancromáticas, em estereoscopia, que permite a correção das áreas classificadas equivocadamente. No caso da sub-bacia do Arroio Feijó são utilizadas fotografias aéreas, em escala 1:40.000, referente ao ano de 1990. Após, a verificação "in locu" confirma os resultados obtidos e conseqüentemente as correções realizadas na classificação inicial. O resultado do mapeamento das classes área urbana, loteamento e área não urbana, obtido para a área teste através da classificação visual da imagem de 1993 (Procedimento 1) encontra-se na Figura 4.24.

4.2.3 - PROCEDIMENTO 2: CLASSIFICAÇÃO DIGITAL

A classificação digital das imagens LANDSAT/TM5, procedimento 2, é realizada no sistema SITIM-150, empregando o método da Máxima Verossimilhança Gaussiana, descrito no Capítulo 3. O processo de classificação digital está subdividido em duas fases distintas:

- a) identificação das três classes de uso do solo: área urbana, loteamento e área não urbana na data selecionada;
- b) identificação das áreas sujeitas a inundação;

Para a sub-bacia do Arroio Feijó a fase a é aplicada na imagem LANDSAT/TM 5, de 8 de setembro de 1993. Já a identificação das áreas inundáveis, fase b, utiliza a imagem de 11 de julho de 1984, data mais próxima do período de maior cheia verificado na região, de acordo com as leituras de nível de água nas estações fluviométricas do complexo hidrográfico da Região Metropolitana de Porto Alegre, constantes no Caderno Técnico "Monitoramento Hídrico da Bacia do Rio Gravataí-RS" (PROTEGER, 1994).

Em ambas as fases são extraídas amostras de treinamentos para cada uma das classes identificadas nas imagens. As imagens temáticas resultantes do processo da classificação por computador para a área teste encontram-se nas

Figuras 4.5 e 4.6. Dos resultados obtidos neste procedimento, somente os relativos à fase b apresentam-se satisfatórios e portanto serão utilizados posteriormente.

4.2.4 - PROCEDIMENTO 3: CLASSIFICAÇÃO VISUAL, EMPREGANDO TÉCNICAS DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Este terceiro e último procedimento da etapa 2 tem por objetivo concentrar em um pequeno número de bandas derivadas as informações contidas nas várias bandas originais. Neste caso, as novas bandas derivadas (componentes principais) são obtidas por meio de uma rotação no espaço multi-espectral que diagonaliza a matriz covariância entre as bandas originais (Capítulo 3). Essa operação, realizada através do sistema SITIM-150, permite selecionar uma única banda (primeira componente) para a classificação visual da imagem.

A primeira componente principal, que passa a conter as informações comuns a todas as bandas originais, é então fotografada no Rembrandt. Posteriormente, os diapositivos são projetados sobre uma carta base na escala 1:50.000, permitindo a classificação visual das três classes de uso do solo empregadas nesta metodologia.

No caso da sub-bacia do Arroio Feijó, as componentes principais são geradas a partir das bandas 3, 4 e 7 da imagem de 8 de setembro de 1993. A primeira componente principal pode ser vista na Figura 4.7. Como os resultados obtidos não são os desejados, este procedimento não será levado adiante.

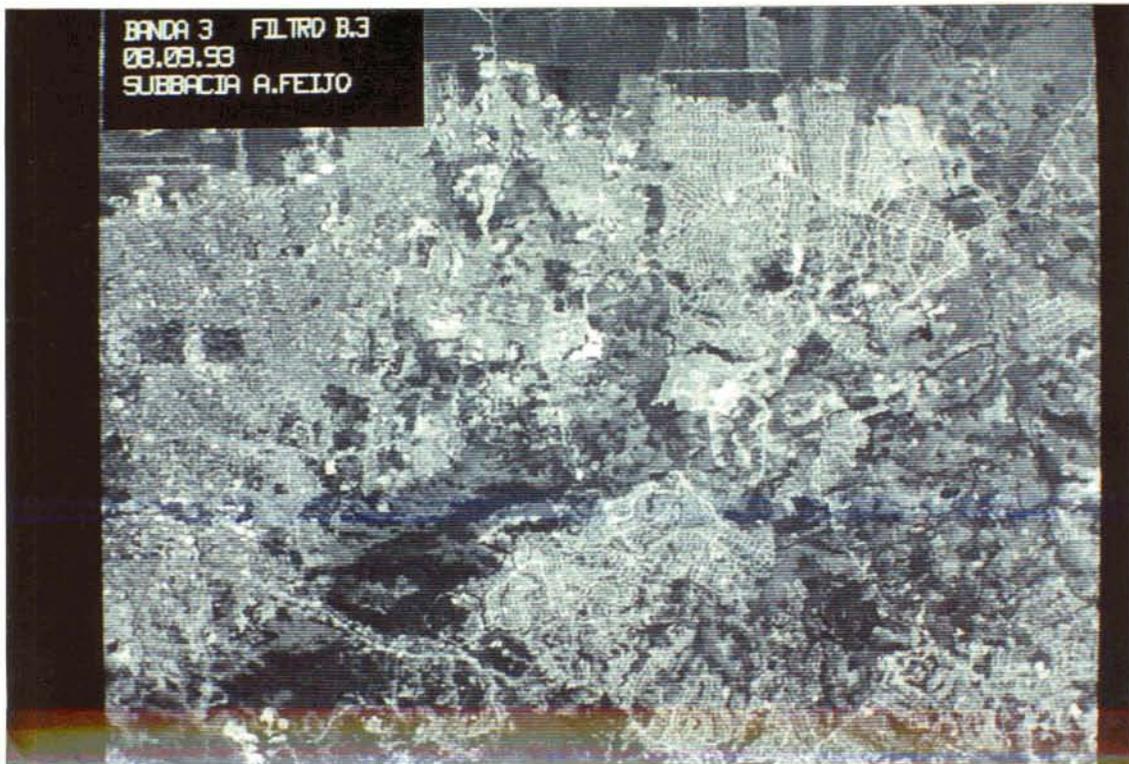


Figura 4.3 - Imagem LANDSAT/TM 5, banda 3 filtrada, setembro de 1993 com a área da sub-bacia do Arroio Feijó, selecionada como área teste.

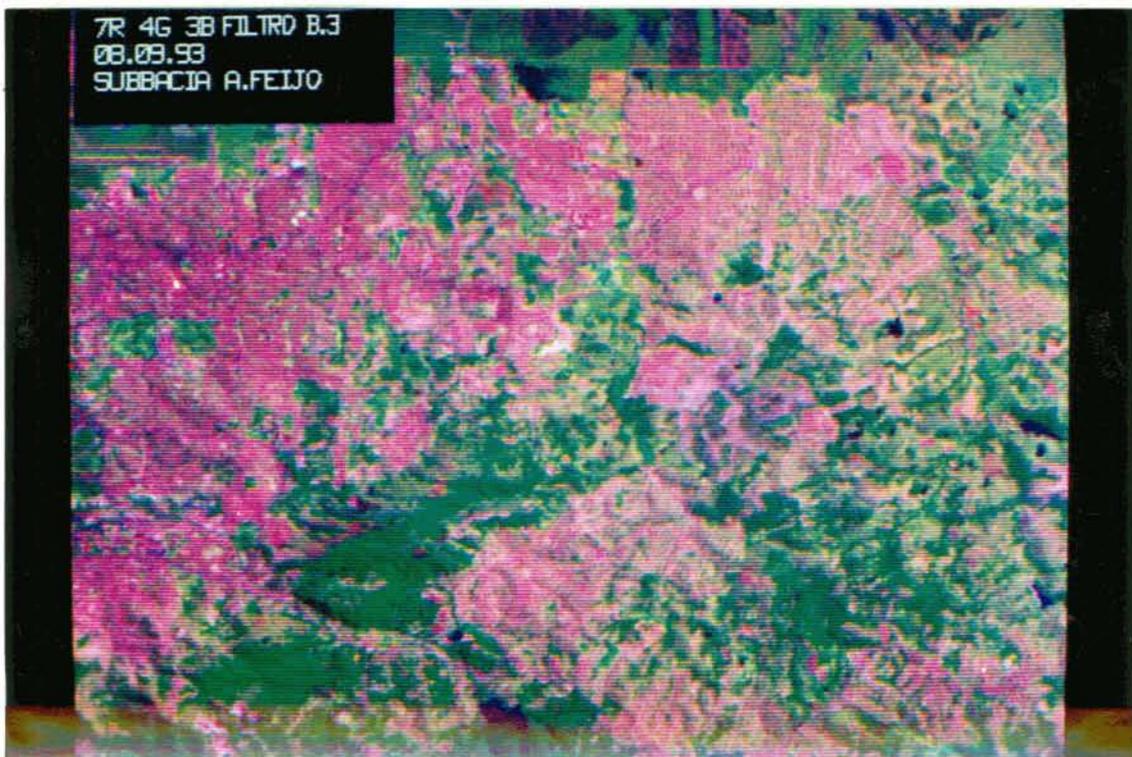


Figura 4.4 - Composição colorida (7R, 4G, 3B filtrada), setembro de 1993, mostrando a sub-bacia do Arroio Feijó.



Figura 4.5 - Classificação supervisionada da imagem LANDSAT/TM 5 de setembro de 1993, mostrando as três classes de uso do solo na área teste.



Figura 4.6 - Classificação supervisionada da imagem LANDSAT/TM 5 de julho de 1984 com a área inundável na área teste.

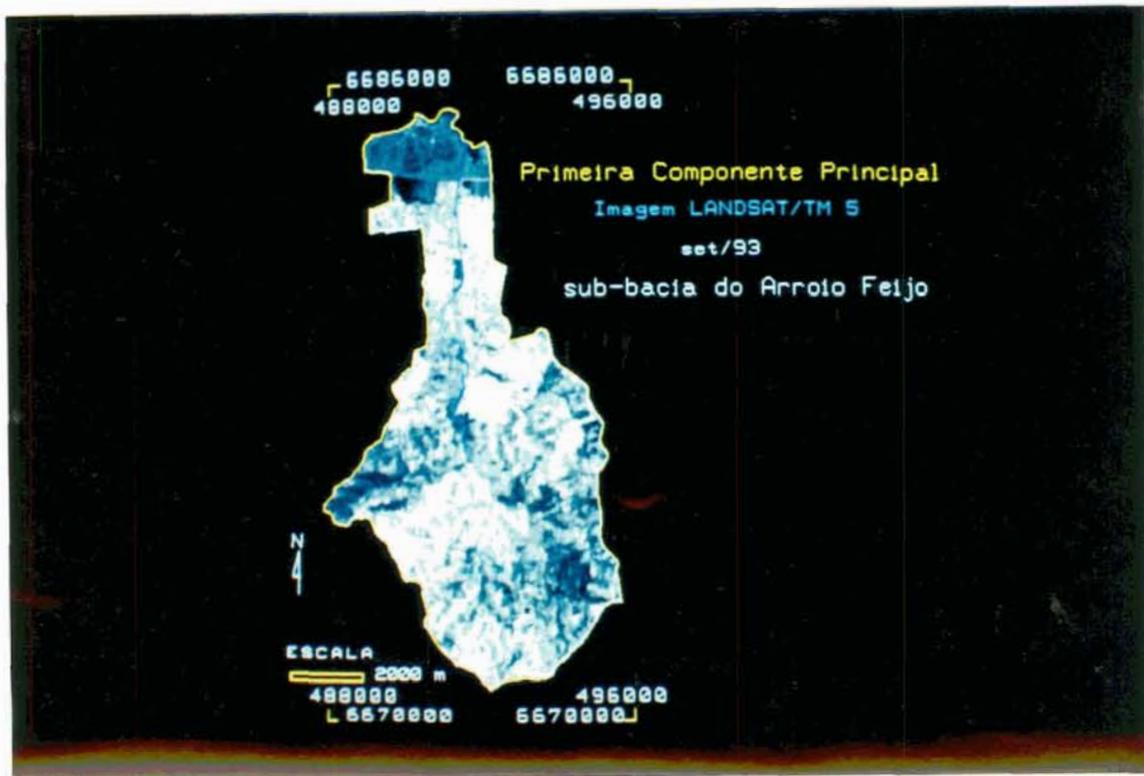


Figura 4.7 - Primeira componente principal da imagem de setembro de 1993, mostrando a área teste.

4.3 - ETAPA 3 — IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE MODELAGEM NUMÉRICA DO TERRENO (MNT) E SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

4.3.1 - ASPECTOS GERAIS

A etapa 3 reveste-se de particular importância. Informações georeferenciadas de várias naturezas são armazenadas num Sistema de Informações Geográficas (SIG) para análise conjunta e obtenção de conclusões. O SIG utilizado é o desenvolvido pelo INPE e denominado de Sistema Geográfico de Informações (SGI), cujas principais características encontram-se descritas no Capítulo 3.

Para isso, torna-se necessário definir inicialmente um projeto ativo no SGI, que tem por finalidade preparar o ambiente do sistema para a entrada das informações georeferenciadas. Nesta operação são fornecidos o nome de projeto, a escala base, o sistema de projeção cartográfica, o tipo de coordenadas e as coordenadas envolventes do projeto.

A escala do projeto é determinada pela escala da maioria das fontes originais de dados e passa a ser utilizada como "default", no caso da geração dos produtos cartográficos de saída. Segue-se a indicação das coordenadas envolventes através do fornecimento do ponto extremo inferior esquerdo e do ponto extremo superior direito da janela que abrange toda a região em estudo.

Nesta dissertação o projeto ativo recebe a denominação de Projeto ALV, utiliza a escala 1:50.000 como escala base e coordenadas do tipo projeção. O sistema de projeção cartográfica adotado é o sistema UTM/Córrego Alegre.

Definido o projeto ativo, tem sequência a criação dos diversos planos de informações - PIs (Capítulo 3) correspondentes aos vários mapas temáticos da região estudada. Nesta fase da metodologia os PIs estão classificados em PIs originais, cujas informações são obtidas diretamente das cartas topográficas e mapas temáticos ou pela classificação das imagens orbitais (etapa 2), e PIs derivados, gerados no SGI a partir dos PIs originais.

A Figura 4.8 mostra os PIs originais e derivados integrantes da etapa 3 da metodologia proposta e suas respectivas fontes de informação.

Os PIs referentes ao contorno da área estudada, às informações sobre geologia, pedologia, geomorfologia, área urbana nas datas consideradas e aos limites municipais têm a entrada de dados no SGI através de um processo semelhante, denominado aqui de **procedimento geral**, cuja descrição encontra-se a seguir.

No procedimento geral a entrada das informações ocorre no formato vetorial, através da mesa digitalizadora, calibrada por meio de quatro pontos de controle tomados nas respectivas cartas. A calibração da mesa tem por objetivo compensar as distorções que ocorrem durante a aquisição de dados via mesa digitalizadora.

Após a digitalização das linhas que constituem os polígonos de cada mapa temático, procede-se as etapas de ajuste de linha, inserção de centróides e poligonalização. O ajuste de linhas proporciona o fechamento dos nós dos diversos polígonos, viabilizando o processo de poligonalização. A inserção de centróides identifica as áreas e define as classes dos polígonos fechados ou em forma de ilha (Capítulo 3). Finalmente, a poligonalização gera os polígonos dos mapas temáticos a partir das linhas e dos centróides digitalizados.

Na inserção dos centróide deve-se tomar cuidado especial com os polígonos que apresentam ilhas no seu interior. Assim, procura-se evitar, conforme Sano *et al.* (1993), a inserção do centróide na área hachurada indicada pela Figura 4.9, evitando erros na fase de poligonalização. Tal cuidado

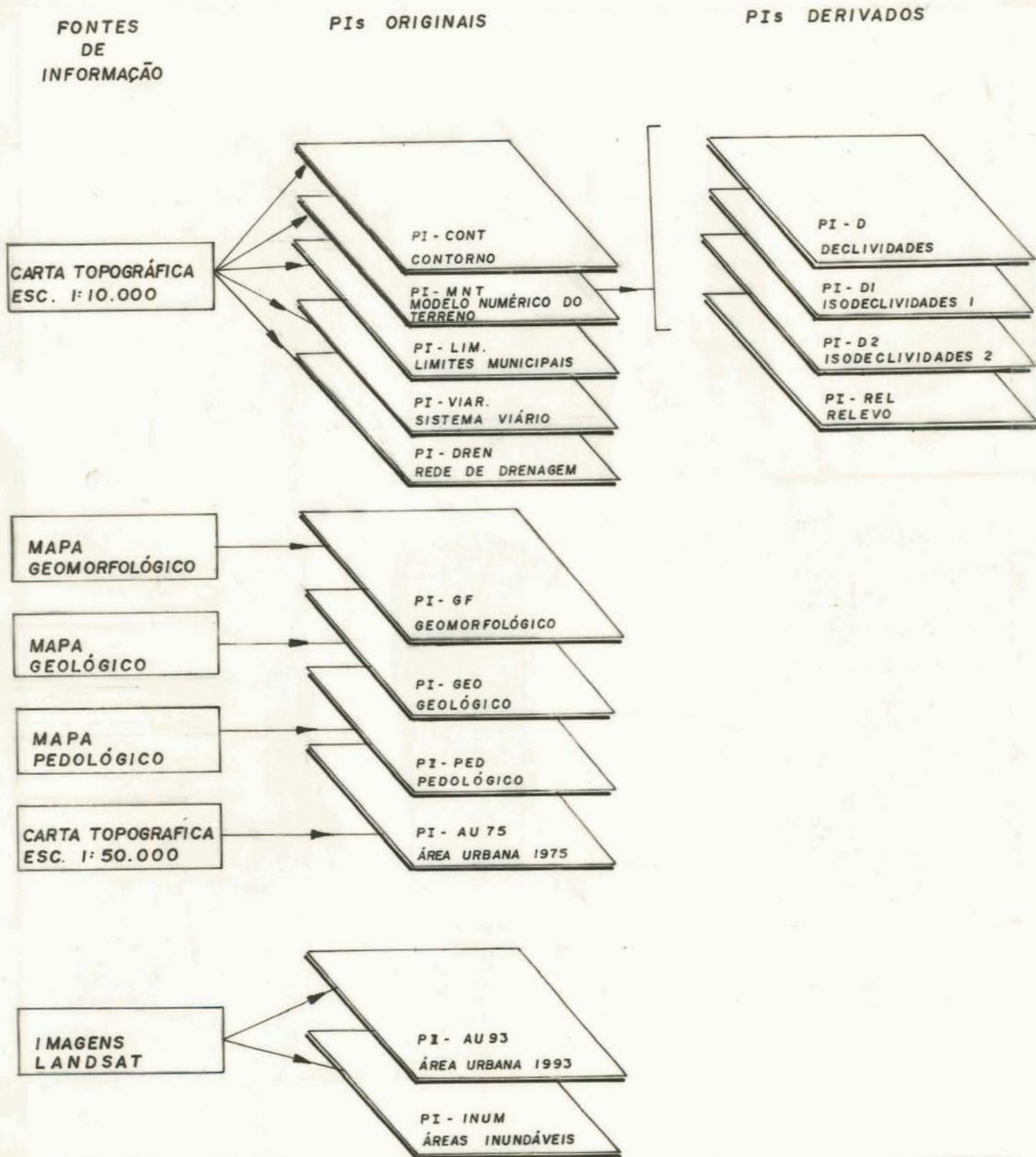


Figura 4.8 - PIs integrantes da etapa 3 da metodologia proposta.

deve-se ao fato de que o processo de identificação das linhas mais próximas do centróide, que constituirão os limites da classe do referido centróide, inicia-se pela linha à direita mais próxima do centróide analisado. Conforme ainda aqueles autores, a inserção do centróide na região hachurada fará com que a linha à direita mais próxima deste centróide seja a que delimita a ilha e não a que faz o limite externo correto do polígono.

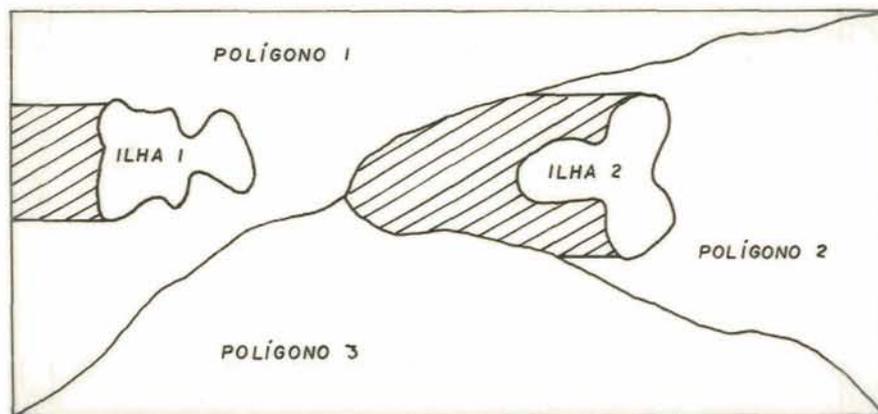


Figura 4.9 - Região inadequada (rachurada) para inserção do centróide.
Fonte: Sano *et al.* (1993)

Concluída a poligonalização, são fornecimentos os atributos rótulo, cor e tipo de preenchimento dos polígonos que localizam cada classe nos PIs. Segue-se a conversão dos PIs do formato vetorial para o formato raster de modo a possibilitar o mascaramento, a quantificação de áreas pelo sistema e os cruzamentos previstos na metodologia.

Posteriormente, a operação de mascaramento permite o recorte dos PIs de forma que os mesmos possuam apenas as informações contidas dentro dos limites da área estudada. Para isso, utiliza como máscara positiva o PI-CONT.

As imagens sofrem ainda um processo de refinamento, quando passam a obter a resolução espacial (5m x 5m) adotada para todos os PIs com o objetivo de viabilizar os programas de cruzamento entre os mesmos.

Os demais planos de informação previstos na metodologia apresentam peculiaridades no processo de entrada de dados no SGI. Por isso, os

procedimentos adotados encontram-se juntos à descrição de cada PI. Por último, cabe lembrar que todos os conceitos utilizados na descrição do procedimento geral e em cada PI estão definidos no Capítulo 3.

A seguir estão descritos os PIs originais e derivados da etapa 3 da metodologia aplicados à área teste. Cada plano de informação especifica as fontes originais de dados e as características do meio físico relativas à sub-bacia do Arroio Feijó.

4.3.2 - PLANO DE INFORMAÇÃO CONTORNO — PI - CONT

a) Dados iniciais

O PI-CONT é um plano de informação no formato vetorial pertencente à categoria temática, contendo os limites da região estudada, determinados conforme o procedimento descrito na etapa 1 da metodologia.

A finalidade principal do PI-CONT é servir como máscara positiva para o mascaramento dos demais planos de informação.

Como já foi citado anteriormente, através da operação "mascarar plano", disponível no SGI, é possível fazer com que cada PI contenha apenas as informações referentes à área de estudo.

O PI-CONT é utilizado também para determinar a superfície total da área analisada. Esse valor para a sub-bacia do Arroio Feijó é de 5.712 ha.

b) Entrada de dados no SGI

A entrada dos limites topográficos da área estudada no SGI ocorre através da digitalização de arcos, atendendo ao procedimento geral já descrito. Esse plano de informação constitui-se de apenas um polígono ou classe temática.

A Figura 4.10, mostra o PI-CONT com os limites topográficos da área teste e pode ser encontrada, assim como os demais PIs, no final da descrição da etapa 3.

4.3.3 - PLANO DE INFORMAÇÃO MODELO NUMÉRICO DO TERRENO — PI - MNT

a) Dados iniciais

O PI - MNT, Modelo Numérico do Terreno, é gerado no SGI a partir da digitalização dos dados altimétricos extraídos de cartas topográficas.

Para a geração do PI - MNT da área teste são utilizadas as cartas topográficas da Região Metropolitana da Grande Porto Alegre (Folhas 2970.4 X e Y, Folhas 2987.2 C, D, H, I, J), escala 1:10.000, ano 1972 e elaboradas pela METROPLAN, apresentando curvas de nível com equidistância de 5m.

b) Entrada de dados no SGI e geração do MNT

Para a digitalização das curvas de isovalor, denominadas isolinhas, e de pontos isolados de cota ou altitude conhecidas é utilizada a mesa digitalizadora. Cada coleta de amostra sobre as isolinhas é tomada a uma distância equivalente a dez metros no terreno. A Figura 4.11 apresenta o resultado da digitalização das isolinhas de altitude na sub-bacia do Arroio Feijó.

Para a geração do MNT é escolhido o modelo matriz de altitude ou grade retangular (Capítulo 3) que, segundo Burrough (1996), é o mais adequado para a obtenção posterior das declividades. No entanto, antes da geração da grade, torna-se necessário organizar os pontos digitalizados. Esses pontos, no caso da área teste, atingem um total de 28215 amostras no formato 3D, isto é, amostras esparsas em três dimensões (x, y, z) com posição geográfica e valores de cotas ou altitudes conhecidas.

A organização dos pontos tem por finalidade reestruturar o arquivo de dados gerados na digitalização, agilizando o acesso às amostras por ocasião do procedimento de geração da grade regular. Através desse procedimento, a área do PI referente ao MNT é particionado em células, contendo cada uma delas um máximo de 100 pontos.

Cabe destacar que o processo de particionamento, conforme especifica o Manual de Referência do SGI, é tanto mais demorado quanto maior o número de amostras digitalizadas e quanto menor o número de pontos definidos por célula. Por outro lado, o tempo na geração da grade regular será menor quanto menor for o número de pontos por célula.

Na geração da grade regular procura-se alcançar uma resolução espacial mais próxima da resolução das imagens orbitais utilizadas no estudo (30 x 30 metros). Dessa forma a grade de altitude gerada para a área teste fica constituída por 505 linhas e 334 colunas.

O processo de interpolação, para gerar a grade regular, transcorre através do método da média móvel ponderada (Burrough, 1986). Utiliza como elemento ponderador o inverso da distância, entre as amostras de altimetria, elevada ao quadrado em conjunto com o método da procura dos n pontos mais próximos por cota e por quadrante (Felgueiras *et al.*,1988). Para isso, utiliza a opção 6 entre os interpoladores disponíveis no SGI.

Gerada a grade regular, a operação seguinte é o refinamento da mesma de forma a permitir a representação do MNT no formato raster ou imagem (Capítulo 3). Nesse procedimento utiliza-se resoluções horizontal e vertical igual a 5 e o algoritmo de interpolação bilinear, disponível no SGI.

O PI-MNT mostrando as isolinhas de altitude da área teste está representado na Figura 4.11.

4.3.4 - PLANO DE INFORMAÇÃO DECLIVIDADES — PI - D

a) Dados iniciais

O Plano de Informação Declividades, PI-D, constitui-se num PI da categoria Modelo Numérico do Terreno. É gerado no SGI a partir do PI-MNT no formato raster, obtendo as suas declividades também em formato raster.

b) Geração do PI-D

O modelo escolhido para a geração do PI-D é o denominado **declividade** que representa o valor do ângulo perpendicular à normal, em relação ao plano horizontal, em cada ponto do terreno. Nesse caso, os intervalos de declividades 0 a 90 graus são mapeados em 256 níveis de cinza. Após a geração do PI-D é procedido o mascaramento do mesmo através da utilização do PI-CONT.

O Plano de Informação Declividades para a área teste está mostrado na Figura 4.12.

4.3.5 - PLANO DE INFORMAÇÃO ISODECLIVIDADES 1 — PI - D1

a) Dados iniciais

O PI-D1 apresenta as classes de isodeclividades descritas na Tabela 4.2, cujos limites estão de acordo com os intervalos propostos por Salomão (IPT-1992) e assumidos pelo PROTEGER (1994) para o mapeamento de áreas suscetíveis a processos de erosão laminar.

b) Geração do PI-D1

O Plano de Informação Isodeclividades 1, PI-D1, é gerado pelo fatiamento do PI-MNT, obtendo-se um plano com regiões que agrupam as classes de intervalo de isodeclividades especificadas na Tabela 4.2. O PI-D1 resultante é de categoria temática, representado no formato raster. Após a sua geração, o PI-D1 passa pelo processo de mascaramento através do PI-CONT. O PI-D1 referente à área teste pode ser visto na Figura 4.13.

Tabela 4.2 - Classes de isodeclividades 1 para a sub-bacia do Arroio Feijó

CLASSES DE ISODECLIVIDADES	CARACTERÍSTICAS
Classe 1 0% a 6 %	Relevos planos a suaves ondulados, abrangendo a planície de inundação do rio Gravataí e arroio Feijó e a zona de transição para um relevo de terraços e colinas de vertentes suavizadas.
Classe 2 Acima de 6% a 12%	Relevo suave ondulado a ondulado, constituído por colinas rebaixadas, com altitudes não muito elevadas, representando um relevo de transição.
Classe 3 Acima de 12% a 20%	Transição das fases de relevo ondulado para forte ondulado, relacionado às vertentes de colina e morros. Ocorrem nas morrarias granitóides da região do município de Porto Alegre, na porção oeste da sub-bacia do Arroio Feijó.
Classe 4 Acima de 20%	Constituem áreas declivosas a muito declivosas, formadas por um relevo de encostas e vertentes abruptas. Ocorre na porção sul e oeste da sub-bacia do Arroio Feijó.

Fonte: extraído e adaptado do PROTEGER (1994)

A Tabela 4.3 apresenta a quantificação das áreas, obtidas no SGI, referentes às diversas classes de isodeclividades 1, na área teste.

Tabela 4.3 - Quantificação de áreas ocupadas pelas classes de isodeclividades 1 na sub-bacia do Arroio Feijó.

CLASSES	ÁREA (ha)
Classe 1 0% a 6%	2.648,52
Classe 2 6% a 12 %	1.216,28
Classe 3 12 % a 20%	1.420,57
Classe 4 Acima de 20%	426,63
TOTAL	5.712,00

4.3.6 - PLANO DE INFORMAÇÃO ISODECLIVIDADES 2 — PI - D 2

a) Dados iniciais

Este Plano de informação tem por objetivo permitir o estudo do uso e ocupação do solo em função das declividades do terreno, visando a determinação posterior das áreas com restrições à ocupação urbana.

As classes de isodeclividades adotadas no PI-D2 estão apresentadas abaixo:

- Classe 1: Áreas com declividades de 0% a 3%

Esta classe está estabelecida em função das características específicas da área teste selecionada.

Declividades de 0% a 3% ocorrem predominantemente ao norte da sub-bacia do Arroio Feijó, caracterizando-se por áreas de extravasamento do rio Gravataí e do Arroio Feijó nos períodos de cheias. As baixas declividades,

permeabilidade e capacidade de carga admissível do solo verificada nessas áreas, somadas a presença do lençol freático próximo à superfície, torna-as inadequadas ao uso urbano.

- Classe 2: Áreas com declividades de 3% a 15%

O limite superior desta classe (15%) é estabelecido em função de ser esse o valor de declive máximo indicado por Hofmann em 1976 (Maciel Filho, 1989) para o desenvolvimento urbano. Por outro lado, esse valor é também considerado o máximo tolerável para a inclinação longitudinal das vias locais de circulação de veículos (IPT, 1991). São, portanto, áreas indicadas para uso urbano.

- Classe 3: Áreas com declividades de 15% a 30%

São áreas onde apenas o fator declividade não restringe totalmente a ocupação urbana. Deverão ser considerados, contudo, outros aspectos do meio físico, como por exemplo, a presença de solos com suscetibilidade à processos erosivos e a ocorrência de deslizamentos, além dos custos da infra-estrutura básica.

- Classe 4: Áreas com declividades superiores a 30%

A Lei Federal 6766/79, referente ao parcelamento do solo urbano, restringe a ocupação em áreas com declividades superiores a 30%, salvo se atendidas as exigências específicas das autoridades competentes.

b) Geração do PI-D2

O Plano de Informação Isodeclividades 2, PI-D2, a exemplo do PI anterior é gerado a partir da operação fatiamento do PI-MNT, obtendo-se um plano com regiões que agrupam as classes de intervalo de declividades acima descritas. O PI-D2 pertence à categoria temática e é representado no formato raster. Após a sua geração, este PI é também mascarado através do PI-CONT.

A Figura 4.14 apresenta o PI-D2 relativo à área teste da metodologia e a Tabela 4.4 mostra a quantificação das diversas classes de isodeclividades correspondentes.

Tabela 4.4 - Quantificação de áreas referentes às classes de isodeclividades 2 na sub-bacia do Arroio Feijó.

CLASSES	ÁREA (ha)
Classe 1 0 a 3%	2.211,51
Classe 2 3 a 15 %	2.760,60
Classe 3 15 a 30%	658,06
Classe 4 > 30%	81,83
TOTAL	5.712,00

4.3.7 - PLANO DE INFORMAÇÃO RELEVO — PI - REL

a) Dados iniciais

Este Plano de informação tem por objetivo a classificação do relevo da região estudada de acordo com as classes de relevo encontradas em Lemos & Santos (1984) e especificadas na Tabela 4.5.

b) Geração do PI-REL

O PI-REL, pertencente à categoria MNT, é obtido também a partir do fatiamento do PI-MNT em classes de intervalos de declividades.

O PI-REL relativo à área teste encontra-se na Figura 4.15 e a quantificação das áreas correspondentes pode ser vista na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 - Classes de relevo.

CLASSES DE RELEVO	CARACTERÍSTICAS	DECLIVIDADES
Classe 1 Relevo Plano	Superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos.	menores que 3%
Classe 2 Relevo Suavemente ondulado	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros	suaves de 3 a 8%
Classe 3 Relevo Ondulado	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/outeiros	acentuada entre 8 e 20%
Classe 4 Relevo Forte Ondulado	Superfície de topografia movimenada, formada por outeiros e/ou morros	forte entre 20 e 45%
Classe 5 Relevo Montanhoso	Superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente, constituída por morros, montanhas e maciços montanhosos e alinhamento montanhosos.	forte e muito forte entre 45 a 75%
Classe 6 Relevo Escarpado	Regiões ou áreas com predomínio de forma abruptas, compreendendo escarpamentos.	maiores que 75%

Fonte: baseado em Lemos & Santos (1984)

Tabela 4.6 - Quantificação de áreas referentes às classes de relevo na sub-bacia do Arroio Feijó.

CLASSES	ÁREA (ha)
Classe 1 Plano	2.239,81
Classe 2 Suavemente Plano	143,44
Classe 3 Ondulado	2.950,11
Classe 4 Forte Ondulado	367,38
Classe 5 Montanhoso	11,12
Classe 6 Escarpado	0,14
TOTAL	5.712,00

4.3.8 - PLANO DE INFORMAÇÃO GEOLÓGICO — PI - GEO

a) Dados iniciais

Este plano de informação tem a finalidade de conter os dados referentes às diversas unidades litológicas da área estudada.

No caso da área teste, as informações para o PI-GEO são extraídas da Carta Geológica, escala 1:50.000, ano 1993, constante no trabalho "Extração Mineral na Bacia do Rio Gravataí" elaborada pelo Comitê de Gerenciamento da Bacia do Rio Gravataí. Segundo relatório do referido Comitê, a Carta Geológica resultou da compilação e atualização de trabalhos desenvolvidos por órgãos diversos em épocas distintas, bem como de vistorias realizadas na área.

Assim, com base na Carta Geológica e Relatório Técnico do Comitê Gravataí, conclui-se que na região de Porto Alegre afloram as rochas mais antigas da área teste, cuja litologia, segundo o referido estudo, é a seguinte:

- pEi - Pré-Cambiano Indiviso

"São corpos de granodioritos, dioritos,...podendo ocorrer corpos de granitos isolados."

"A cobertura do solo é variável, dependendo da composição mineralógica das rochas, ocorrendo em vários locais processos de Lateritização."

"As rochas se apresentam bastante fraturadas, mostrando efeitos de tectonismo, com direções dominantes NE e NW."

- Te - Depósitos Gravitacionais de Encosta (Era Cenozóica - Período Terciário)

"..., ocorrem sedimentos dispostos em superfície ondulada, recortada por canais de drenagem, representando aluviões e coluviões interdigitados lateralmente ou sobre postos; são depósitos de deslizamento de massa formados por fragmentos de areia e matacões envoltos por matriz argilosa ou argilo-siltica. Os fragmentos são provenientes das unidades litológicas vizinhas e o grau de compactação é pequeno."

Qf - Depósitos Fluviais (Era Cenozóica- Período Quartenário)

"ocorrem..., na forma de terraços, planícies aluvionares e canais fluviais, mostrando depósitos isolados, não litificados de cascalhos e areias ou corpos tabulares siltico-argilosos com restos vegetais. A estratificação é irregular com imbricações de seixos."

Fonte: Extração Mineral na Bacia do Rio Gravataí (1993)

b) Entrada dos dados originais e geração do mapa das unidades geológicas

A entrada no SGI dos dados referentes ao PI-GEO ocorre no formato vetorial de acordo com o procedimento geral já descrito.

A Figura 4.16 e a Tabela 4.7 mostram respectivamente a distribuição espacial das unidades litológicas na área teste e a quantificação das áreas ocupadas pelas referidas unidades, obtidas a partir do SGI.

Tabela 4.7 - Quantificação de áreas ocupadas pelas unidades geológicas na sub-bacia do Arroio Feijó.

UNIDADES	ÁREA (ha)
pEi	2.176,05
Te	1.788,56
Qf	1.747,39
TOTAL	5.712,00

4.3.9 - PLANO DE INFORMAÇÃO PEDOLÓGICO — PI - PED

a) Dados iniciais

Este PI tem a finalidade de fornecer as informações a respeito das unidades pedológicas integrantes da área estudada.

Para a área teste, essas informações são extraídas do Mapa Pedológico, escala 1:50.000 (Folhas Porto Alegre e São Leopoldo) da Bacia do Rio Gravataí e seu respectivo Caderno Técnico, PROTEGER (1994). Nesse trabalho, onde um dos objetivos principais da equipe do PROTEGER era a verificação da suscetibilidade à erosão laminar do solo, o comportamento homogêneo do solo frente à erosão foi o fator mais relevante considerado para a separação das diversas classes de solo em unidades de mapeamento simples ou compostas. A classificação dos solos foi realizada segundo o Sistema Brasileiro utilizado pelo Serviço Nacional de Levantamentos e Conservação de Solos, EMBRAPA (1988), PROTEGER (1994). As unidades de mapeamento pedológico da área teste e suas principais características, estão descritas a seguir:

- Unidade de mapeamento PV1

"a) Classificação

A classe dos solos predominante nesta unidade de mapeamento denomina-se:

PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO distrófico Tb A moderado textura média/argilosa cascalhenta, relevo suave ondulado a ondulado, substrato granito.

b) Características Gerais

Esta unidade está representada por perfis de solo medianamente profundos a profundos ($e > 150$ cm) e bem drenados. A coloração varia de bruno a bruno escura no horizonte A a vermelho-amarelado no horizonte B. A textura no horizonte A é franco a franco arenosa e no horizonte B varia de franco-argilosa a argilo arenosa. A estrutura no A é fracamente desenvolvida em blocos subangulares ou mesmo granular. No horizonte B a estrutura é fraca a moderada em blocos subangulares, com cerosidade forte e pouca. A transição entre os horizontes é clara e plana.

O horizonte C é composto por rochas graníticas e ortognáissicas em diversos estágios de alteração. Nas porções inferiores, menos intemperizadas, é possível observar a presença de minerais primários, como quartzo, dispersos na massa, ou como veios, bem como feldspato semi-alterado. É comum também a ocorrência de micas parcialmente alteradas.

Esses solos possuem erodibilidade de moderada a alta.

De acordo com Brasil (1973), estes solos possuem baixa capacidade de troca de cátions no horizonte A e baixa a média no B. A saturação de bases é inferior a 40% ao longo do perfil e a soma de bases é também baixa. São pobres em matéria orgânica e fósforo disponível. Os teores de alumínio trocável são baixos na superfície, aumentando com a profundidade. São ácidos nos horizontes A e B.

c) Variações e Inclusões

As principais inclusões são solos hidromórficos nas zonas mal drenadas da unidade, e ainda os solos Litólicos, em menor proporção..."

- Unidade de mapeamento PV2

"a) Classificação

Nesta unidade de mapeamento predomina a classe de solos denominada:

PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO distrófico Tb A moderado textura média/argilosa cascalhenta, relevo suave ondulado a ondulado, com substrato granítico.

b) Características Gerais

As características morfológicas dos perfis de solo desta unidade são bastante semelhantes às do solo da unidade PV1. A diferença básica é que os perfis da unidade PV2 são mais profundos, com teores de argila um pouco mais elevados, embora haja ainda uma significativa fração cascalho, com formas mais arredondadas, evidenciando transporte deste material.

c) Inclusões

As inclusões mais comuns são de solos hidromórficos do tipo Glei pouco Húmico."

- Unidade de mapeamento PL

"a) Classificação

Nesta unidade predominam as seguintes classes taxonômicas de solos:

PLANOSSOLO eutrófico Ta A moderado textura arenosa/média e média/argilosa, relevo plano substrato depósitos flúvio-lagunares.

GLEI POUCO HÚMICO eutrófico Ta A moderado textura média e argilosa, relevo plano substrato de depósitos flúvios-lagunares.

b) Características Gerais

Estes solos estão relacionados às zonas que apresentam má drenagem, favorecendo os processos de hidromorfismo destes materiais. Apresentam predominantemente cores cinzentas, típicas de processos de redução do ferro...

Os planossolos, que apresentam sequências de horizontes A, Bt e C, possuem muitas vezes um horizonte E, de máxima iluviação de argila para os horizontes inferiores. As texturas predominantes são, no horizonte A, franco a franco argilo arenosas. A estrutura neste horizonte é fracamente desenvolvida, em blocos subangulares ou granular. A transição para o horizonte B é abrupta e plana.

O horizonte B, de coloração bruno acinzentada, possui comumente mosqueados avermelhados e amarelados. A textura é franco argilo arenosa a argilosa. Outra característica típica dos Planossolos é a estrutura prismática fortemente desenvolvida e com cerosidade forte e abundante. A transição para o horizonte C é clara e plana.

O horizonte C possui cores cinzentas e textura silto arenosa, sendo comum os mosqueados em tons escuros. A erodibilidade é nula. Os solos Glei pouco Húmico estão relacionados às zonas de pior drenagem que os Planossolos, e, em geral não possuem gradiente textural bem marcado como no caso destes últimos...

O horizonte A destes solos possui coloração bruno acinzentada escura e textura franca. Estrutura variando de granular fraca a maciça, com certa tendência a ser prismática. São plásticos e pegajosos. A transição para o horizonte B é clara e plana.

O horizonte B possui colorações pretas e cinzento escuras, textura franco a franco argilosa e estrutura prismática. São comuns neste caso a presença de mosqueados. O horizonte Cg, de cores cinzentas, possui textura siltosa e apresenta mosqueados abundantes. A erodibilidade é nula."

- Unidade de mapeamento R1

a) Classificação

Associação complexa de **SOLOS LITÓLICOS** Tb A moderado e proeminente textura média cascalhenta substrato granito relevo forte ondulado com **CAMBISSOLOS** Tb A moderado e proeminente textura média relevo ondulado a forte ondulado, substrato granito.

b) Características Gerais

Os solos Litólicos desta unidade de mapeamento estão relacionados principalmente a fase de relevo forte ondulado, sendo solos rasos e pouco desenvolvidos, numa sequência de horizontes A, C, R. São solo bem drenados, de textura franco arenosa e com significativa presença de cascalho em função do material de origem granítica.

As línguas de material do horizonte A, que penetram no horizonte C, são uma característica morfológica típica destes solos. As colorações do horizonte A são escuras, podendo apresentar tons um pouco avermelhados e/ou amarelados. A espessura deste horizonte é em geral inferior a 50 cm. Possui estrutura em blocos subangulares, sendo ainda friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso. A transição para o horizonte C é abrupta e irregular.

O horizonte C, com diferentes estágios de alteração do material de origem, apresenta-se muitas vezes mosqueado, com tons amarelados, róseos e avermelhados textura franco arenosa, com características estruturais relacionados à rocha mãe, sem desenvolvimento de estrutura de origem pedogenética... Apresentam erodibilidade muito alta.

Os Cambissolos encontram-se associados aos Solos Litólicos, caracterizados pelo desenvolvimento incipiente do horizonte C. São pouco profundos, bem drenado e com colorações bruno a bruno escuras no horizonte A, e bruno avermelhadas no horizonte B. A textura do horizonte A é franco-argilo-arenosa, passando a argila siltosa no B. A estrutura no horizonte A é em blocos subangulares, sendo ligeiramente plástico a plástico e ligeiramente pegajoso a pegajoso. A presença de linhas de seixos entre os horizontes A e B é bastante comum nestes solos.

O horizonte B, com espessuras inferiores a 50 cm, possui textura mais fina que o horizonte A, com presença de cascalho e placas de muscovita parcialmente alterada. A estrutura é moderada grande colunar, que se quebra em moderada, média e grandes blocos subangulares. Ocorrem ainda "coatings"recobrimdo os agregados estruturais colunares. Ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso. A transição para o horizonte C é clara e ondulada.

O horizonte C apresenta profundidades variáveis, textura grosseira, com silte e cascalho em abundância. Apresentam erodibilidade muito alta."

Fonte: PROTEGER (1994)

Na Tabela 4.8 estão apresentadas as características gerais dos solos das unidades de mapeamento da área teste.

Finalmente, as quatro unidades de mapeamento pedológico da área teste, compostas por uma ou mais classes taxonômicas de solos, apresentam as seguintes características quanto à suscetibilidade à erosão laminar:

" Nos municípios de Porto Alegre e Viamão destaca-se a ocorrência das unidades PV1 e PV2, relacionadas às rochas graníticas da área. Possuem normalmente textura média/argilosa cascalhenta, e quando expostas apresentam também sérios problemas relacionados ao processos erosivos.

A unidade R1 refere-se a associação complexa de Solos Litólicos, Cambissolos e Afloramentos de Rocha. As características morfológicas e as altas declividades a que estão relacionados estes solos, conferem uma alta suscetibilidade à erosão dos mesmos.

Os solos hidromórficos, referente à unidade PL... estão associados ao relevo plano, possuindo suscetibilidade à erosão praticamente nula."

Fonte: PROTEGER (1994)

Tabela 4.8 - Características gerais dos solos das unidades de mapeamento da sub-bacia do Arroio Feijó.

UNIDADES DE MAPEAMENTO	CLASSE TAXONÔMICA	ESPESSURA	DRENAGEM (PERMEABILIDADE)	ERODIBILIDADE	RELEVO REGIONAL	SUBSTRATO
PV1	Podzólico Vermelho-Amarelo	Profundo	Bem drenado	Moderada a alta	Ondulado	Granito
PV2	Podzólico Vermelho-Amarelo	Profundo	Bem drenado	Moderada a alta	Suave ondulado a ondulado	Granito
R1	Solos Litólicos	Raso	Bem drenado	Muito alta	Ondulado a forte ondulado	Granito
	Cambissolo	Pouco Profundos	Bem drenado	Muito alta	Ondulado a forte ondulado	Granito
PL	Planossolo	Profundo	Mal drenado	Nula	Plano	Depósitos Flúvio Lagunares
	Glei Pouco Húmico	Profundo	Mal drenado	Nula	Plano	Depósitos Flúvio Lagunares

Fonte: extraído do projeto PROTEGER (1994)

b) Entrada dos dados e geração do mapa das unidades pedológicas

O PI - PED é um plano de informação pertencente à categoria temática, sendo portanto constituído de diversas classes correspondentes às

unidades de solo mapeadas. A entrada das informações ocorre no formato vetorial, através do procedimento geral já mencionado.

A Figura 4.17 e a Tabela 4.9 trazem a distribuição espacial das unidades de mapeamento do solo na área teste e a quantificação das áreas ocupadas pelas referidas unidades.

Tabela 4.9 - Quantificação de áreas ocupadas pelas unidades de mapeamento de solos na sub-bacia do Arroio Feijó.

UNIDADES	ÁREA (ha)
PV1	2.256,61
PV2	2.106,26
PL	1.129,40
R1	219,73
TOTAL	5.712,00

4.3.10 - PLANO DE INFORMAÇÃO GEOMORFOLÓGICO — PI - GF

a) Dados iniciais

Este plano de informação é constituído pelas unidades geomorfológicas da área em estudo.

Para a área teste, os dados geomorfológicos são extraídos do Mapa Geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, Folha Porto Alegre, na escala 1:50.000, ano 1994, sob a base cartográfica do Serviço Geográfico do Exército e integrante do PROTEGER (1994).

A seguir estão transcritas as unidades geomorfológicas integrantes da sub-bacia do Arroio Feijó e suas principais características de acordo com o Caderno Técnico, que acompanha o citado mapa.

- PTL — Planície e Terraços Lagunares

O relevo dessa unidade geomorfológica é constituído por terras baixas e com declividades inferiores a 1%. Predomina relevo do tipo

Depósito de Planícies Flúvio-Lagunar (DFL), cujas principais características são:

- terras planas, vales de fundo plano, predomínio da porção siltico-argilosa e acúmulo de matéria orgânica;
- presença de terraços flúvio-lagunares onde há ruptura de declive em relação à planície flúvio-lacustre recente;
- sedimentos de textura areno-argilosa (idade quaternária);
- escoamento freático e superficial difuso devido a má drenagem associada às declividades baixas (0 a 1%);
- problemas de erosão desconhecidos ou inexistentes;
- movimentos de terra relacionados aos desbarrancamentos das margens de canais fluviais e transporte superficial de sedimentos em porções instabilizadas do terreno.

- PRM — Planalto Rebaixado Marginal

Entre as principais características dessa unidade geomorfológica destacam-se:

- relevo suavemente ondulado;
- colinas com encostas suavizadas, caindo em direção aos arroios;
- presença de depósitos de planície e canal fluvial (DPCF)
- dominância de relevos residuais do tipo morro testemunho, geralmente com topos planos, vertentes íngremes e depósitos de tálus associados;
- presença de colinas com vertentes convexo-alongadas (coxilhas);
- solos favorecendo revestimento campestre;
- dominância de atividades pastoris.

-DRJ —Depressão Rio Jacuí

- relevo sem grandes variações altimétricas, dando à paisagem um caráter monótono, onde dominam formas alongadas de topo convexo, conhecido como coxilhas, ao lado de superfícies planas.

- PRC — Planalto Residual Canguçu

Nessa unidade geomorfológica ocorrem:

- relevo na forma de morros graníticos com topos geralmente convexos;
- solos pouco profundos nas encostas dos morros.

Fonte: extraído do PROTEGER (1994)

b) Entrada dos dados e geração do mapa geomorfológico no SGI

A entrada dos dados e a geração das unidades geomorfológicas no SGI segue o procedimento geral dos PIs da categoria temática.

A Tabela abaixo apresenta a quantificação das áreas correspondentes às unidades geomorfológicas na área teste e o PI - GF encontra-se na Figura 4.18.

Tabela 4.10 - Quantificação de áreas referentes às unidades geomorfológicas na sub-bacia do Arroio Feijó.

CLASSES	ÁREA (ha)
PTL-DFL	1.125,39
PTL	185,69
DRJ	281,58
PRM	2.964,46
PRM-DPCF	361,62
PRC	793,26
TOTAL	5.712,00

4.3.11 - PLANO DE INFORMAÇÃO INUNDAÇÃO — PI - INUM

O objetivo deste plano de informação é conter as áreas inundáveis na região em estudo, obtidas a partir da classificação digital da imagem LANDSAT/TM 5.

Entende-se por **áreas inundáveis** as regiões em que a lâmina d'água formada sobre a superfície do terreno é resultante do extravasamento do leito dos canais naturais da rede de drenagem superficial (PROTEGER, 1994).

Para a área teste, o PI-INUN é obtido a partir da classificação digital da imagem LANDSAT/TM 5, de 11 de julho de 1984, período de maior cheia no intervalo dos últimos vinte e um anos, de acordo com PROTEGER (1994). Maiores detalhes sobre esse procedimento pode ser encontrado no item 4.2.3.

Cabe lembrar que a imagem utilizada para a classificação digital encontra-se georeferenciada com o Projeto ALV.

A área sujeita à inundação na área teste perfaz um total de 606,74 ha e pode ser vista na Figura 4.19.

4.3.12 - PLANO DE INFORMAÇÃO REDE DE DRENAGEM — PI - DREN

O objetivo deste PI é fornecer informações sobre a localização da rede de drenagem na área estudada.

Para a área teste selecionada o traçado da rede de drenagem é extraído das cartas topográficas da Região Metropolitana da Grande Porto Alegre (Folhas 2970.4 X e Y, Folhas 2987.2 C, D, H, I, J), escala 1:10.000, ano 1972 e elaboradas pela METROPLAN.

Na entrada da rede de drenagem no SGI utiliza-se a mesa digitalizadora. Os cursos d'água são digitalizados no formato vetorial, empregando-se polígonos abertos e posteriormente a operação ajuste de linhas.

Este plano de informação para a sub-bacia do Arroio Feijó está mostrado na Figura 4.20.

4.3.13 - PLANO DE INFORMAÇÃO SISTEMA VIÁRIO — PI - VIAR

As informações para o PI-VIAR, que tem por finalidade identificar a localização do sistema viário principal dentro da área estudada, são obtidas através de cartas topográficas e digitalizadas no formato vetorial através de polígonos abertos.

Para a área teste, cujo PI-VIAR está mostrado na Figura 4.21, é utilizada a carta topográfica da Região Metropolitana de Porto Alegre, na escala 1:10.000 já mencionada neste trabalho.

4.3.14 - PLANO DE INFORMAÇÃO LIMITES MUNICIPAIS — PI - LIM

Este plano de informação visa identificar, dentro da área de estudo, os limites dos municípios que a integram, a fim de facilitar a análise da evolução da área urbana.

As informações também são obtidas através de cartas topográficas e a entrada dos dados no SGI ocorre no formato vetorial, utilizando polígonos abertos.

Para a área teste o traçado dos limites municipais é realizado com base na carta topográfica da região metropolitana de Porto Alegre, escala 1:10.000. O PI-LIM resultante pode ser encontrado na Figura 4.22 e a quantificação das áreas correspondentes na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Quantificação de áreas referentes aos municípios de Porto Alegre, Alvorada e Viamão no interior da sub-bacia do Arroio Feijó em 1975.

MUNICÍPIO	ÁREA (ha)
Alvorada	1.721,70
Porto Alegre	1.554,39
Viamão	2.434,77
TOTAL	5.712,00

4.3.15 - PLANO DE INFORMAÇÃO ÁREA URBANA 1975 — PI - AU75

Este plano de informação tem a finalidade de registrar as três classes de uso do solo (área urbana, loteamento e área não urbana), definidas no item 4.2.1 e existentes na área em estudo, na data a partir da qual tem início a análise da evolução da área urbana. Para a área teste, é o ano de 1975 e as informações correspondentes são obtidas através da carta topográfica da DSG (Divisão de Serviço Geográfico do Exército), escala 1:50.000, ano 1977, Folha São Leopoldo, MI-2970/4 e Folha Porto Alegre, MI 2987/2, que apresenta a área construída em 1975 a partir de levantamento aerofotogramétrico

A entrada dos dados e a geração do PI segue o procedimento geral descrito no início desta etapa da metodologia.

O PI-AU75 relativo à área teste e a quantificação das áreas correspondentes, determinadas por meio da função Calcular Área das Classes, podem ser encontrados na Figura 4.23 e Tabela 4.12 respectivamente.

Tabela 4.12 - Quantificação de áreas referentes às classes área urbana, loteamento e área não urbana na sub-bacia do Arroio Feijó em 1975.

CLASSES	ÁREA (ha)
Área Urbana	1.396,18
Loteamento	169,88
Área Não urbana	4.145,94
TOTAL	5.712,00

4.3.16 - PLANO DE INFORMAÇÃO ÁREA URBANA 1993 — PI - AU93

A exemplo do PI anterior, esse plano de informações é constituído pelas três classes de uso do solo especificadas anteriormente e existentes na área de estudo na data referente ao término da análise da evolução da área urbana.

Para a área teste este PI (Figura 4.24) corresponde ao ano de 1993 e as informações necessárias resultam da classificação visual da imagem

LANDSAT/TM 5, de acordo com o procedimento descrito no item 4.2.2. A quantificação das três classes obtidas encontra-se na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Quantificação de áreas referentes às classes área urbana, loteamento e área não urbana na sub-bacia do Arroio Feijó para o ano de 1993.

CLASSES	ÁREA (ha)
Área Urbana	2.429,81
Loteamento	309,70
Área Não urbana	2.972,49
TOTAL	5.712,00

As Figuras 4.10 a 4.24 referem-se aos planos de informação da etapa 3 da metodologia aplicados à área teste. As Figuras 4.25 a 4.29 mostram também vistas parciais da área teste.

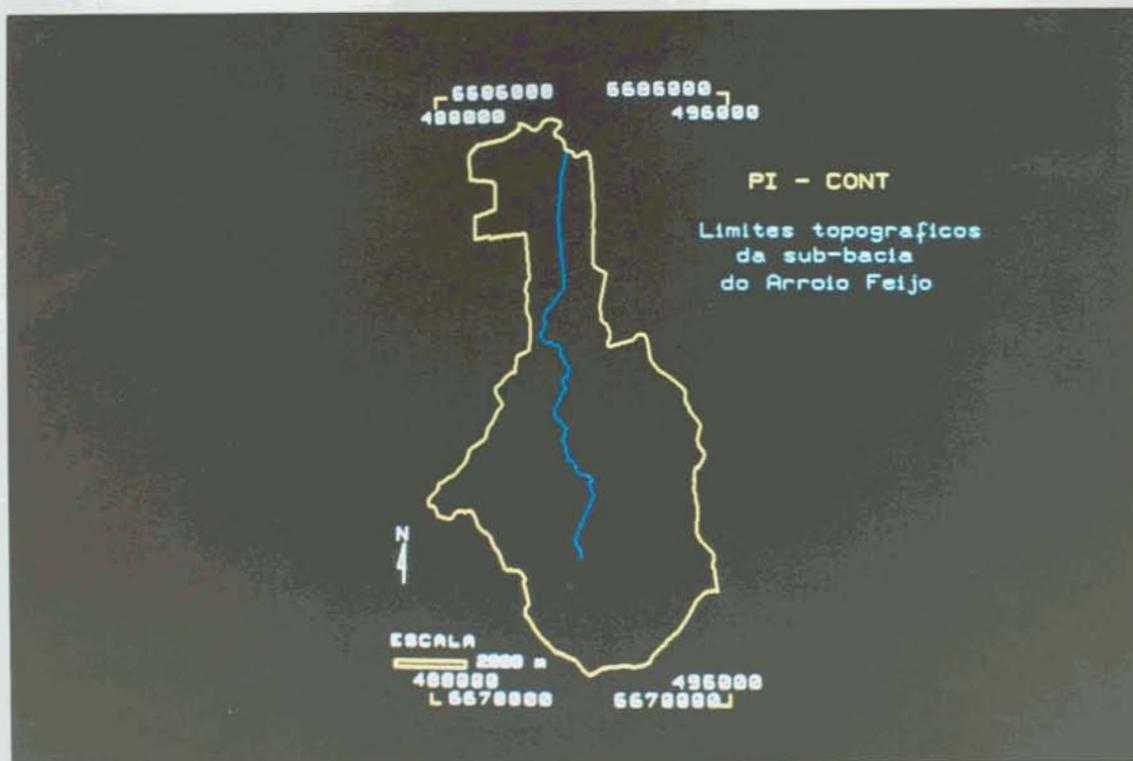


Figura 4.10 - PI-CONT, com os limites topográficos da sub-bacia do Arroio Feijó.

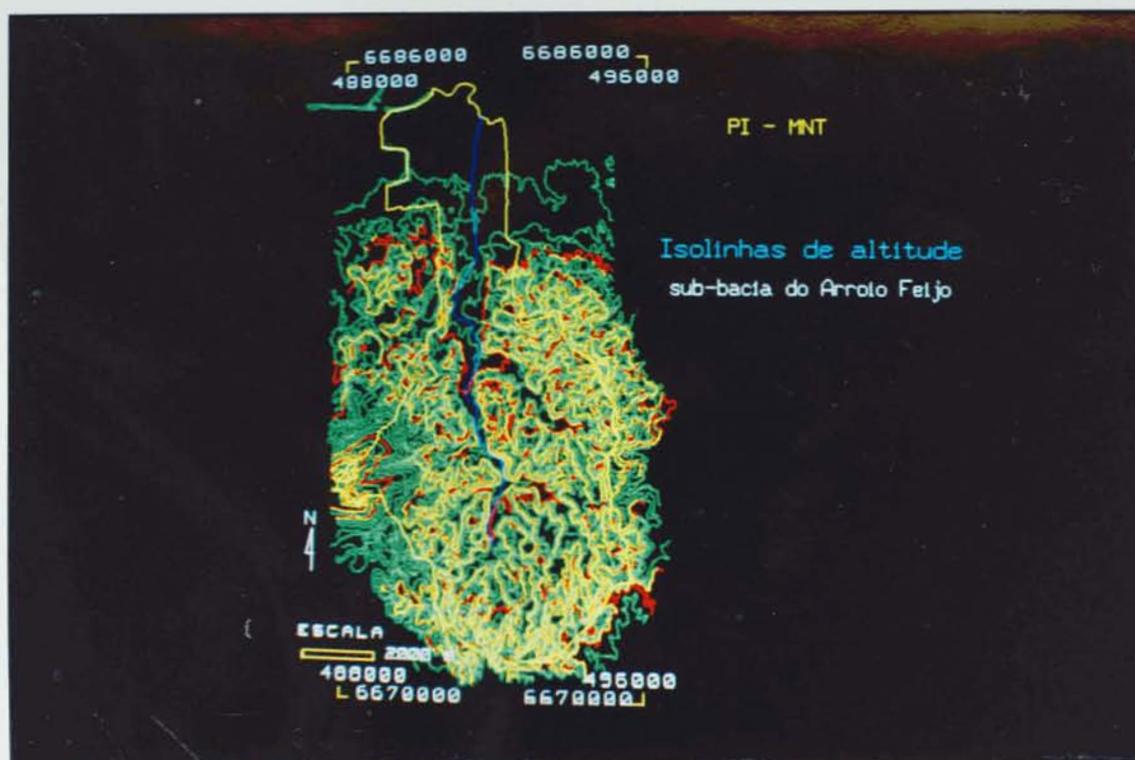


Figura 4.11- PI-MNT, mostrando as isolinhas de altitude da sub-bacia do Arroio Feijó.

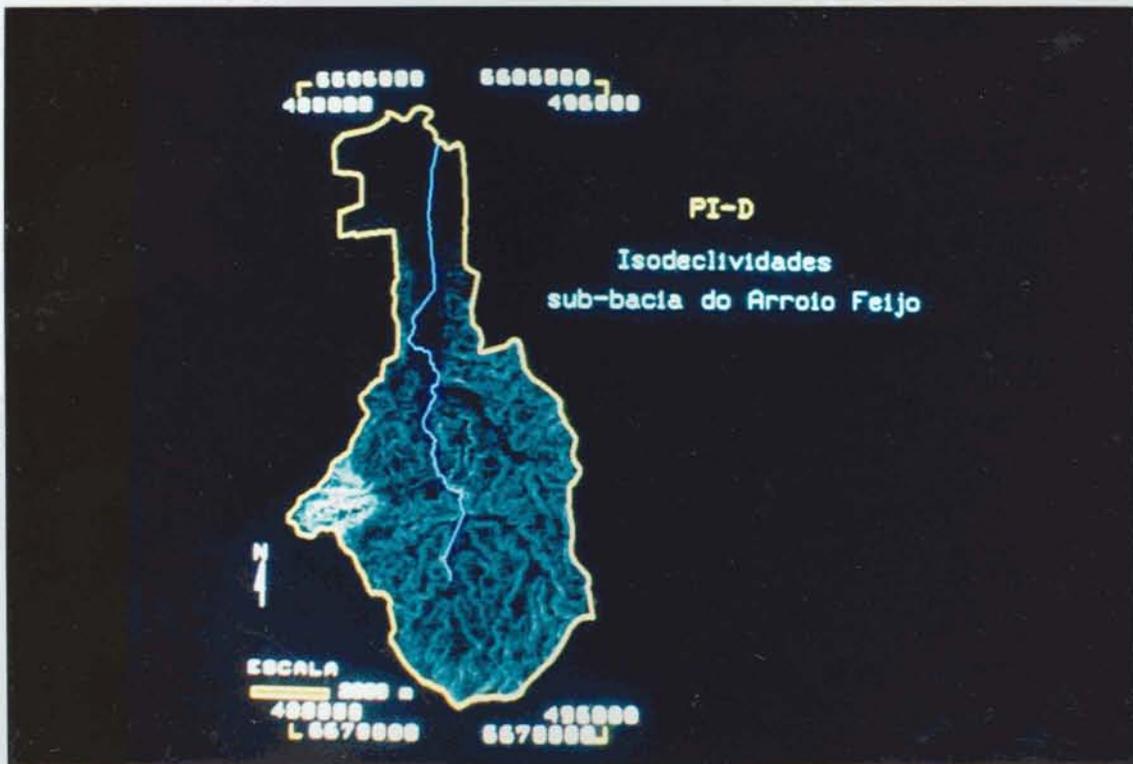


Figura 4.12 - PI-D, declividades, gerado no SGI a partir do MNT.

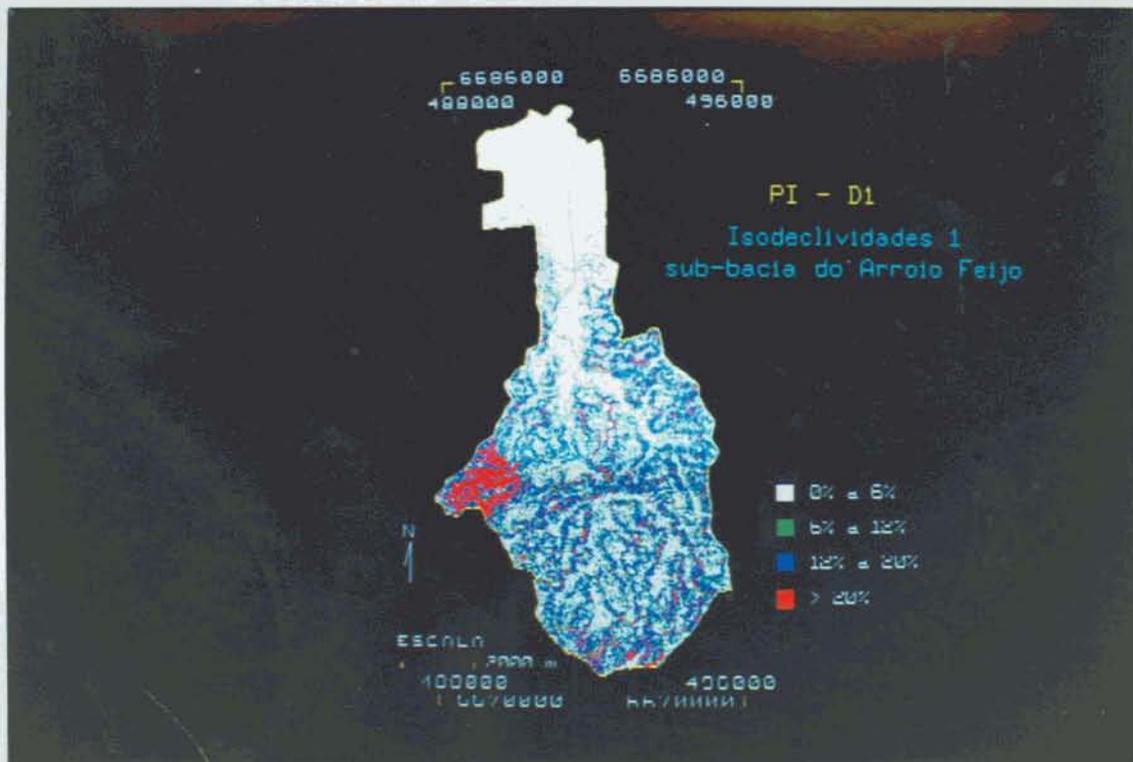


Figura 4.13 - PI-D1, isodeclividades 1, obtido no SGI pelo fatiamento do MNT.

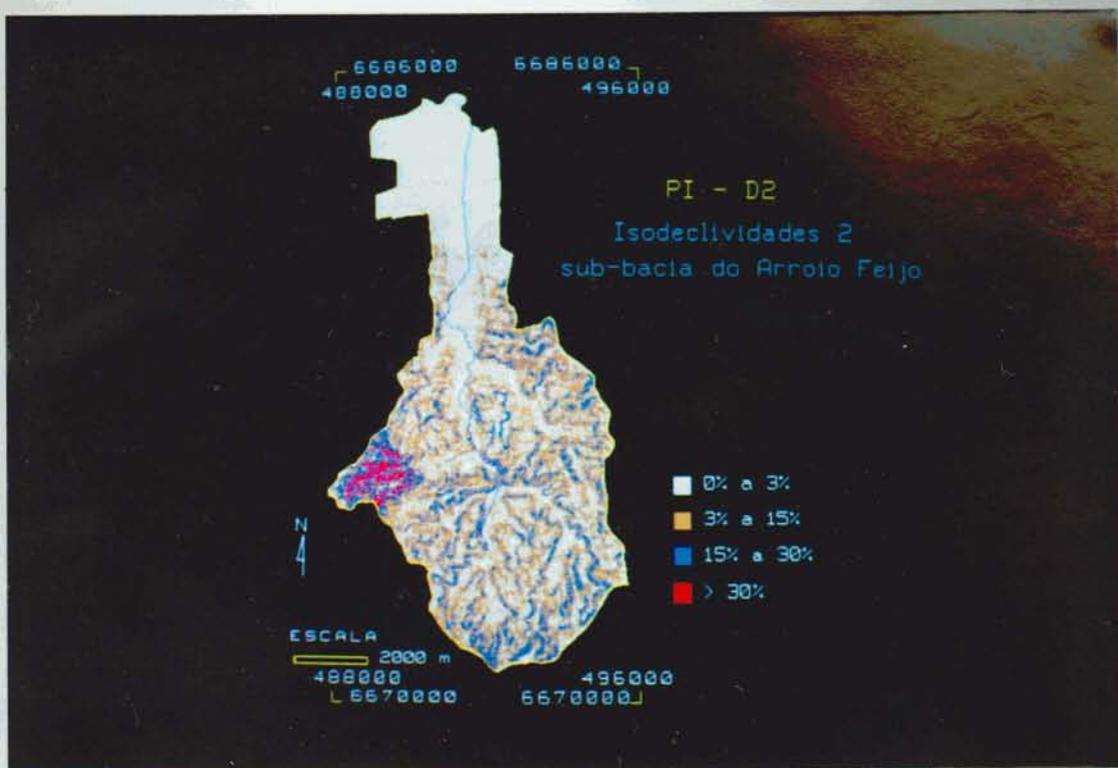


Figura 4.14 - PI-D2, isodeclividades 2, obtido no SGI pelo fatiamento do MNT.

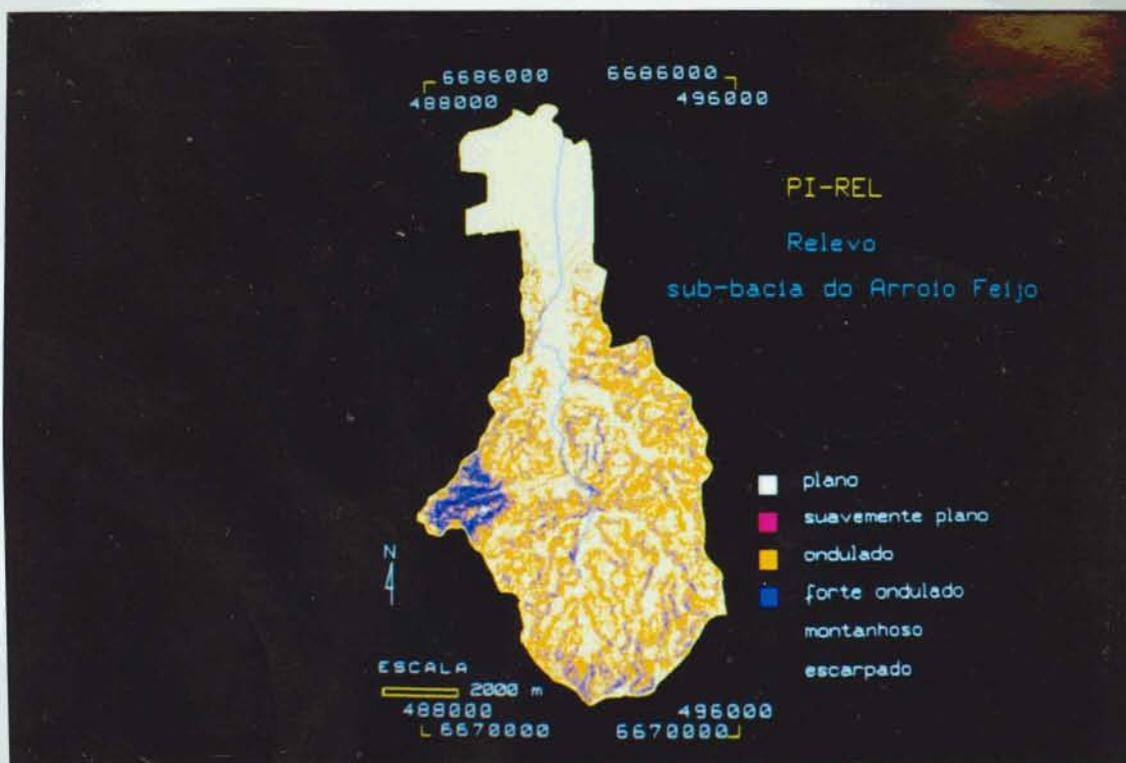


Figura 4.15 - PI-REL, mostrando o mapeamento das áreas da sub-bacia do Arroio Feijó em função do relevo de acordo com a classificação de Lemos & Santos (1984).



Figura 4.16 - PI-GEO, apresentando as unidades litológicas da sub-bacia do Arroio Feijó.
 Fonte: Mapa Geológico/Comite Gravataí, (1993)

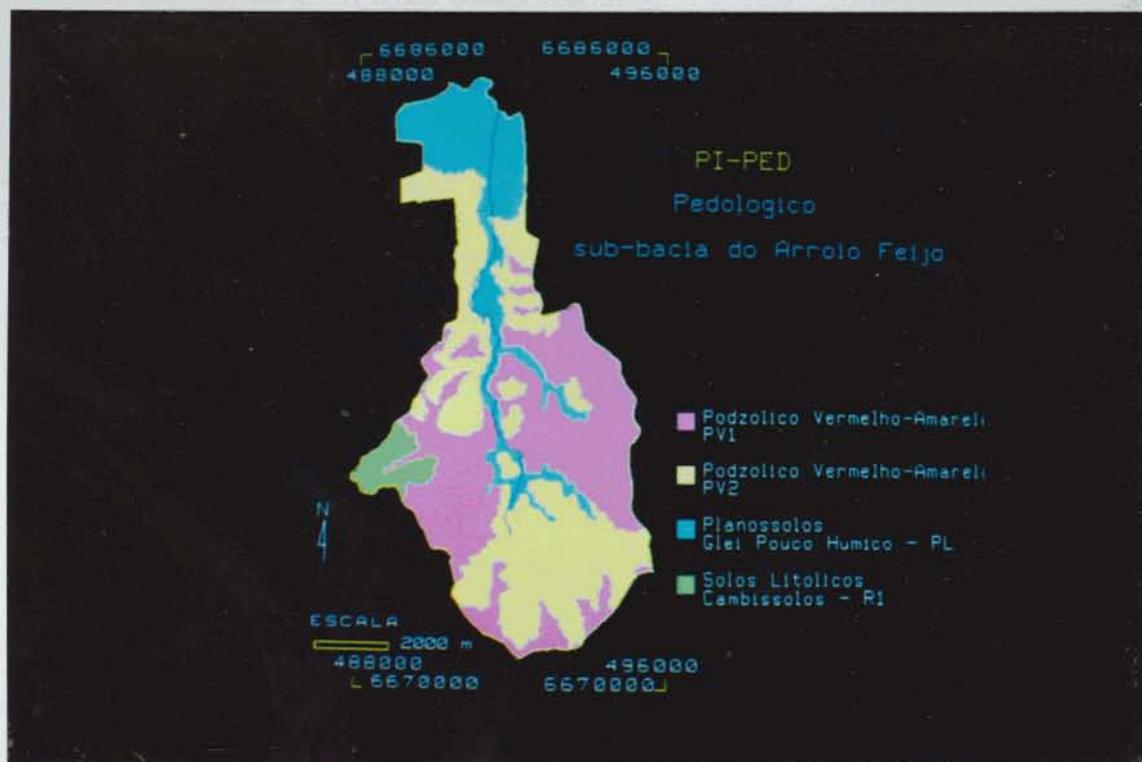


Figura 4.17 - PI-PED com as unidades de mapeamento de solos da sub-bacia do Arroio Feijó.
 Fonte: PROTEGER (1994)

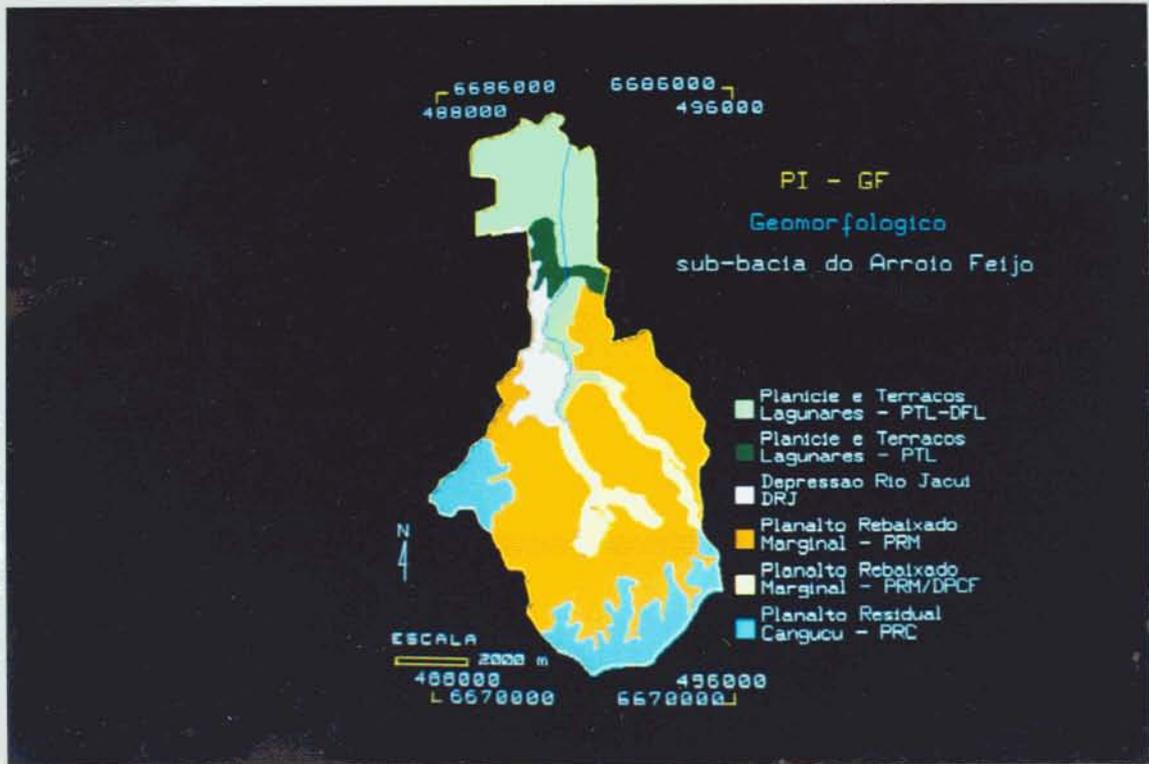


Figura 4.18 - PI-GF com as unidades geomorfológicas existentes na sub-bacia do Arroio Feijó.
Fonte: PROTEGER (1994)

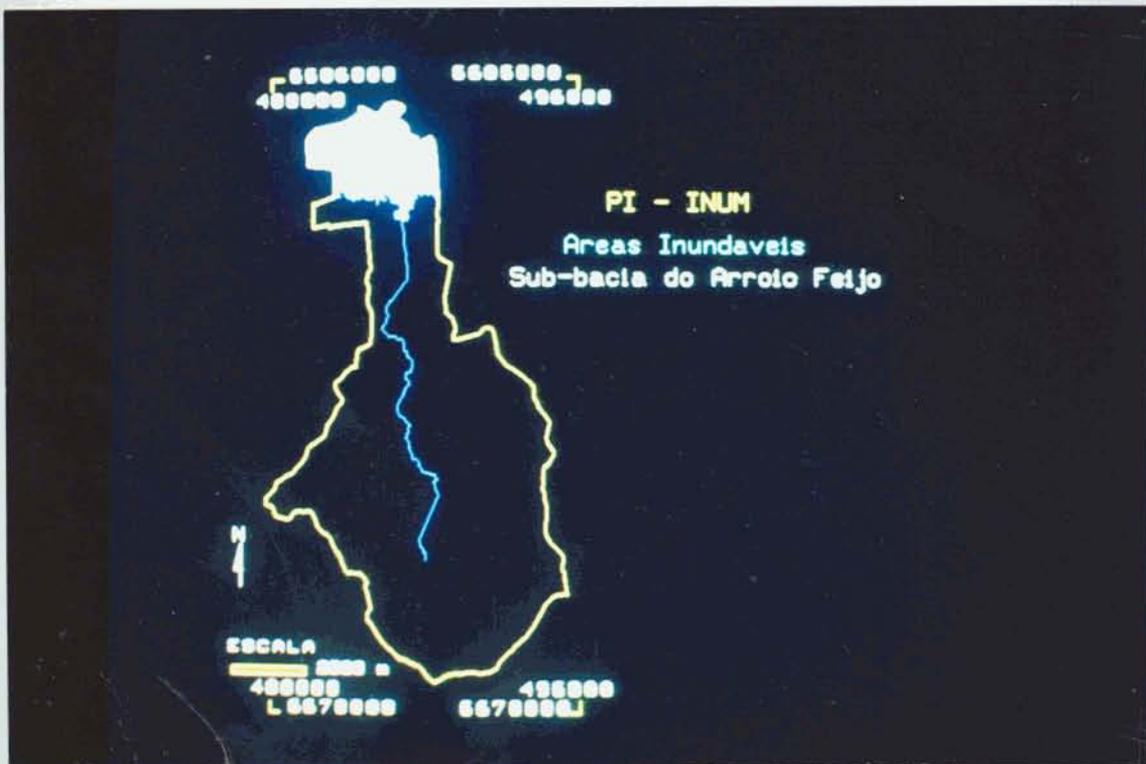


Figura 4.19 - PI-INUN com a área inundada na sub-bacia do Arroio Feijó.

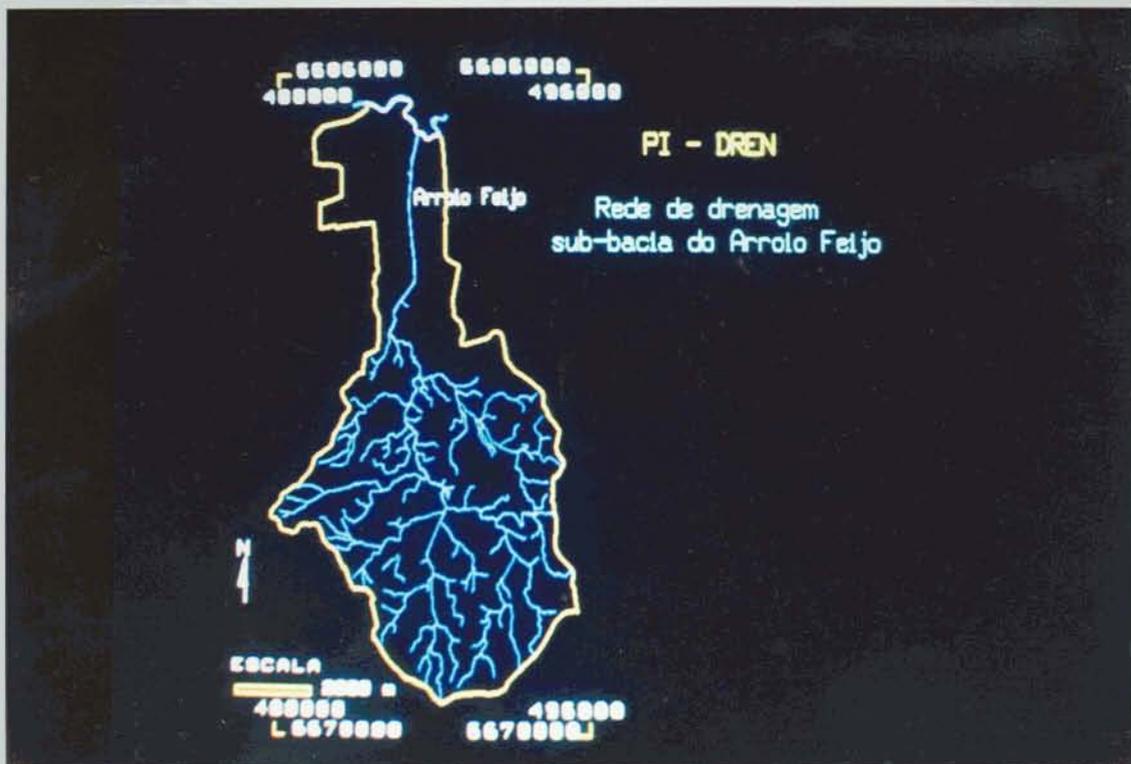


Figura 4.20 - PI-DREN, mostrando a rede de drenagem da sub-bacia do Arroio Feijó.



Figura 4.21 - PI-VIAR com o sistema viário principal existente na sub-bacia do Arroio Feijó.



Figura 4.22 - PI-LIM mostrando os limites, dentro da sub-bacia do Arroio Feijó, dos municípios de Alvorada, Porto Alegre e Viamão.

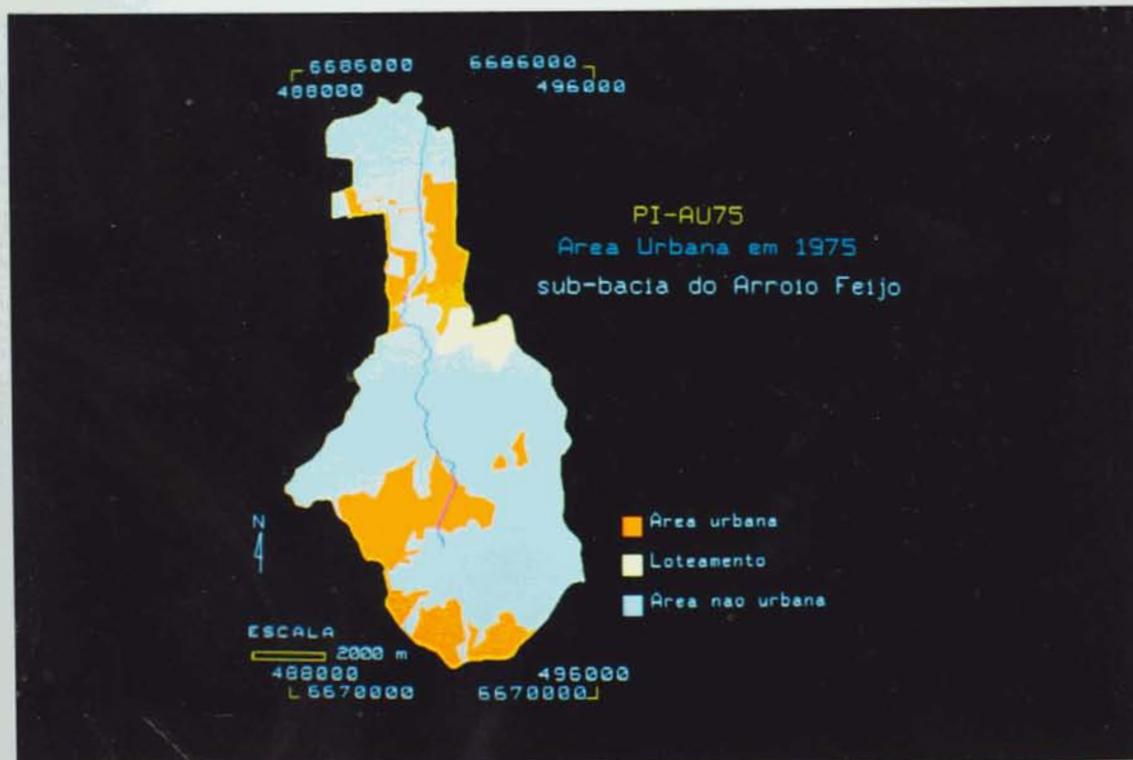


Figura 4.23 - PI-AU75 com as classes área urbana, loteamento e área não urbana obtidas a partir da carta topográfica da DSG de 1977.

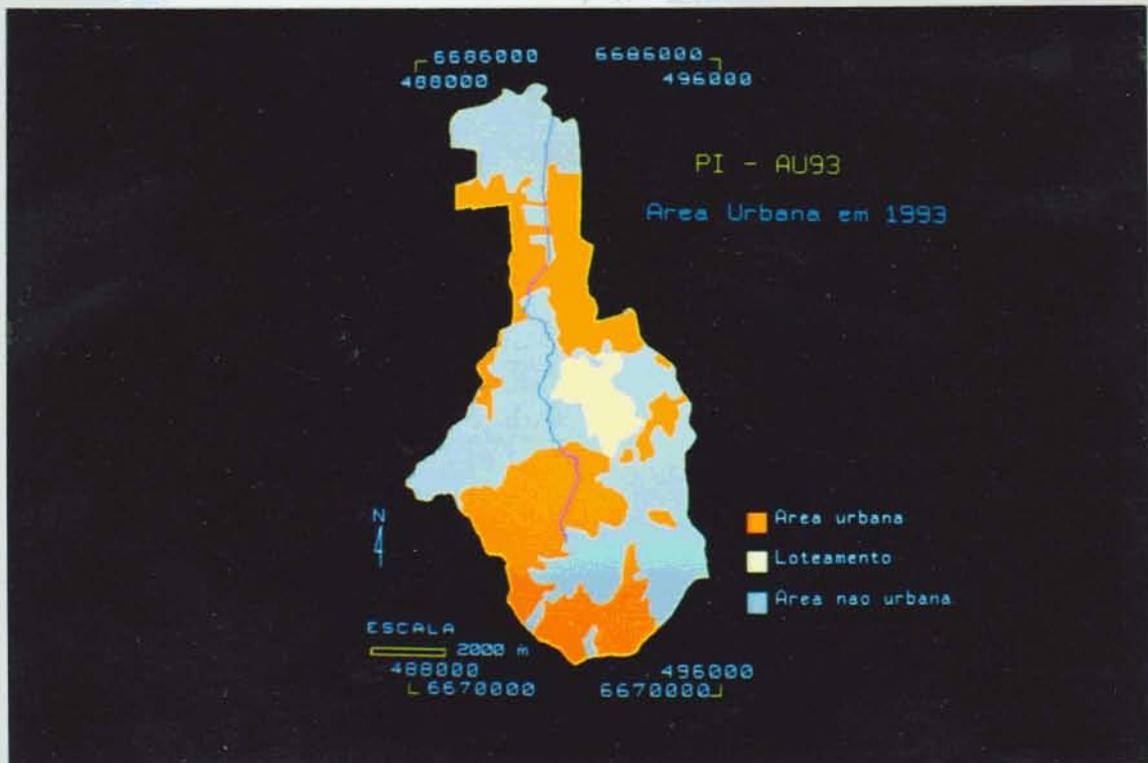


Figura 4.24 - PI-AU93 com as classes área urbana, loteamento e área não urbana resultantes da classificação visual (procedimento 1, etapa 2) da imagem LANDSAT/TM5 de 8 de setembro de 1993.



Figura 4.25 - Vista parcial da classe área urbana (município de Viamão) na sub-bacia do Arroio Feijó.



Figura 4.26 - Vista parcial da classe área urbana (município de Alvorada) na sub-bacia do Arroio Feijó.



Figura 4.27 - Vista parcial da classe loteamento (Loteamento Algarve, situado no município de Alvorada).



Figura 4.28 - Vista parcial da classe área não urbana pertencente ao município de Viamão, situada ao sul da sub-bacia do Arroio Feijó.



Figura 4.29 - Vista parcial da classe área não urbana, situada ao norte da sub-bacia do Arroio Feijó, junto ao município de Alvorada.

4.4 - ETAPA 4 - CRUZAMENTO DE INFORMAÇÕES NO SGI

4.4.1 - ASPECTOS GERAIS

Esta é a etapa mais importante da pesquisa.

Aqui, em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SGI-INPE) são desenvolvidos modelos de cruzamentos de vários planos de informações georeferenciadas com a finalidade de:

- a) analisar a expansão da área urbana (mancha urbana contínua) no período de 1975 a 1993;
- b) identificar áreas com suscetibilidade preliminar à erosão laminar;
- c) estabelecer áreas com restrição ao uso urbano em função de características do meio físico;
- d) mapear áreas com probabilidade de ocorrência de eventos perigosos;
- e) identificar áreas de risco.

Como mancha urbana entende-se a feição relativa à área urbana na área teste, que permite visualizar a ocupação total da superfície com uso urbano (PROTEGER, 1994). Portanto, a partir da etapa 4 da metodologia proposta, a área urbana, considerada como mancha urbana contínua é constituída pelas classes área urbana e loteamento definidas no item 4.2.1.

A expansão da área urbana e os demais aspectos citados acima são obtidos na forma de novos Planos de Informação, denominados nesta pesquisa de PI Cruzados. Os PIs Cruzados resultam do cruzamento de dois ou mais planos de informações originais ou secundários (etapa 3) e pertencem à categoria temática.

Para o cruzamento dos diversos PIs torna-se necessário que os mesmos apresentem a mesma resolução ao longo das linhas e das colunas. Por isso os PIs que não atendem ainda essa condição (5m x 5m) são convertidos a partir da operação Converter Resolução. Em seguida, para cada operação de cruzamento é constituído um arquivo de regras, onde estão definidos os planos de informações envolvidos, as classes resultantes do cruzamento e as regras, que exprimem as operações de cruzamento entre os PIs, isto é, o modelo propriamente dito. Para a elaboração dos arquivos de regras é utilizado nesta pesquisa o editor de texto Norton Editor. Todos os arquivos de regras desenvolvidos encontram-se no Anexo.

4.4.2 - EXPANSÃO DA ÁREA URBANA—PI - EXAU

A expansão da área urbana, considerada como mancha urbana contínua e envolvendo as classes área urbana e loteamento no período estudado é obtida pelo cruzamento dos PIs originais denominados no caso da área teste de PI-AU75 e PI-AU93, de acordo com o modelo especificado na Figura 4.31. O arquivo de regras é denominado Regra 1.

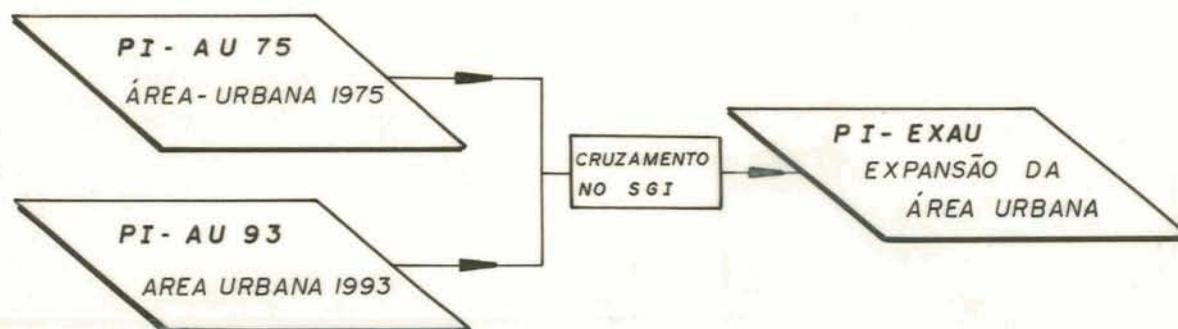


Figura 4.30 - Modelo de cruzamento dos PIs para a análise da expansão da área urbana na área teste.

Ainda para a área teste, o gráfico da Figura 4.31 mostra o valor total da área urbana existente nas duas datas. O PI-EXAU com a área urbana em 1975 e a área urbana acrescida até 1993 está apresentado na Figura 4.32.

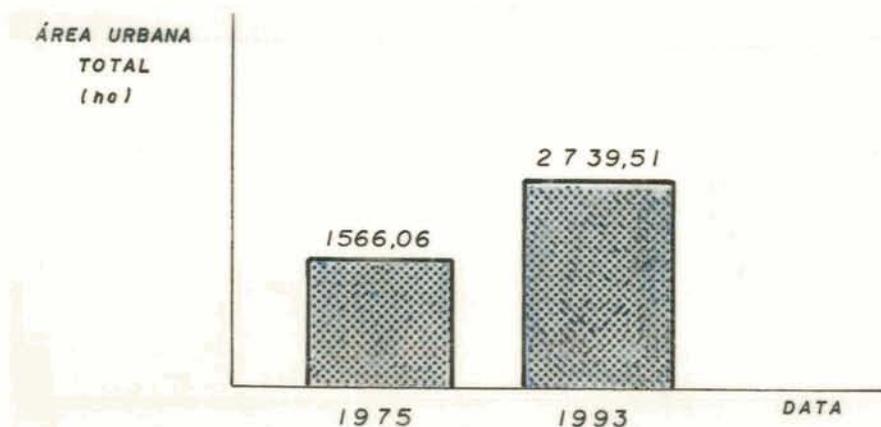


Figura 4.31 - Área urbana existente na área teste em 1975 e 1993.



Figura 4.32 - PI-EXAU, apresentando a área urbana existente na sub-bacia do Arroio Feijó até 1975 e a área urbana acrescida no período de 1975 a 1993

4.4.3 - ÁREA URBANA EM 1975 X LIMITES MUNICIPAIS — PI - 75XL

Este plano de informação tem por finalidade identificar e quantificar, em cada município integrante da área de estudo, as áreas urbanas existentes na data a partir da qual tem início a análise da evolução da área urbana. Para a área teste, o modelo de cruzamento está especificado na Figura 4.33 e o PI resultante na Figura 4.34. O arquivo de regras denomina-se Regra 2. A Figura 4.35 mostra graficamente os valores obtidos.

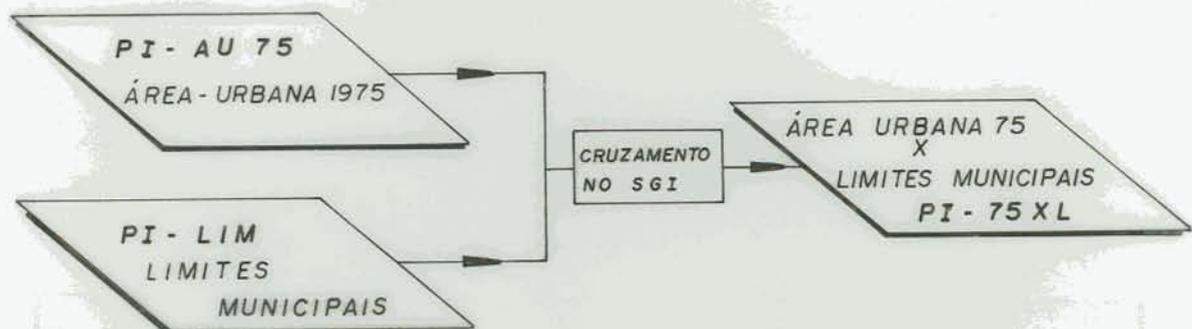


Figura 4.33 - Modelo de cruzamento para obtenção do PI-75XL



Figura 4.34 - PI-75XL, mostrando a área urbana existente em 1975 nos municípios de Alvorada, Porto Alegre e Viamão, dentro dos limites da sub-bacia do Arroio Feijó.

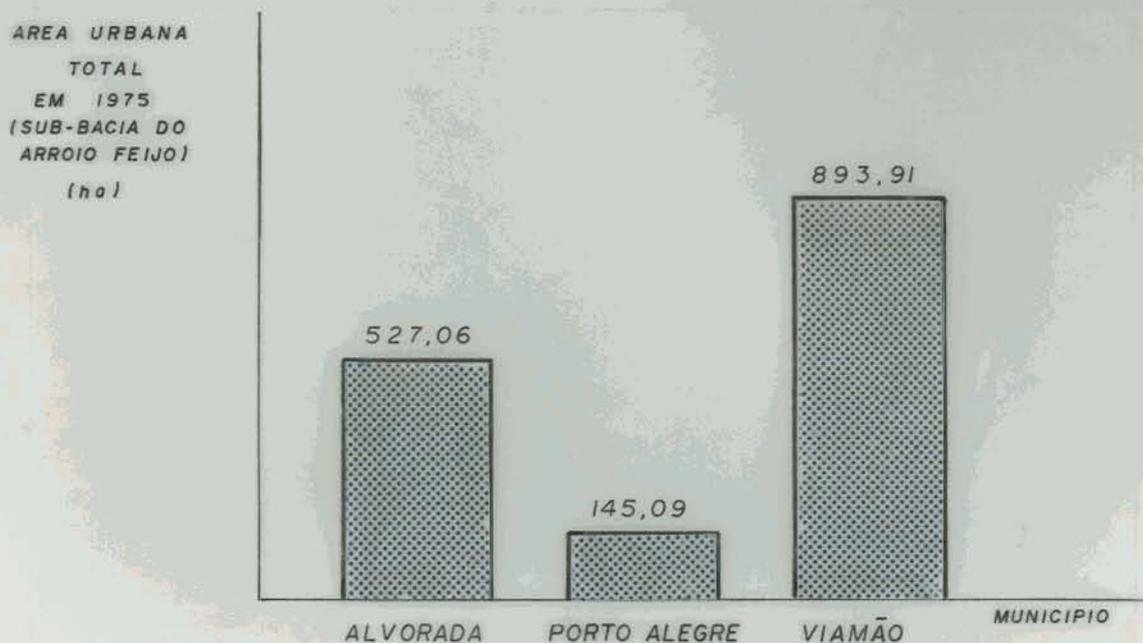


Figura 4.35 - Resultados obtidos pela quantificação das áreas do PI-75XL

4.4.4 - ÁREA URBANA EM 1993 X LIMITES MUNICIPAIS — PI - 93XL

Este plano de informação visa o mesmo estudo do PI anterior, mas agora para a data correspondente ao término do período de análise da evolução da área urbana. Para a área teste da metodologia proposta, esse PI recebe a denominação de PI-93XL e pode ser encontrado na Figura 4.37. O modelo de cruzamento e a quantificação das áreas obtidas estão nas Figuras 4.36 e 4.38 respectivamente. O arquivo de regras denomina-se Regra 3.



Figura 4.36 - Modelo de cruzamento para obtenção do PI-93XL



Figura 4.37 - PI-93XL, mostrando a área urbana na área teste em 1993 em função dos municípios que a integram.

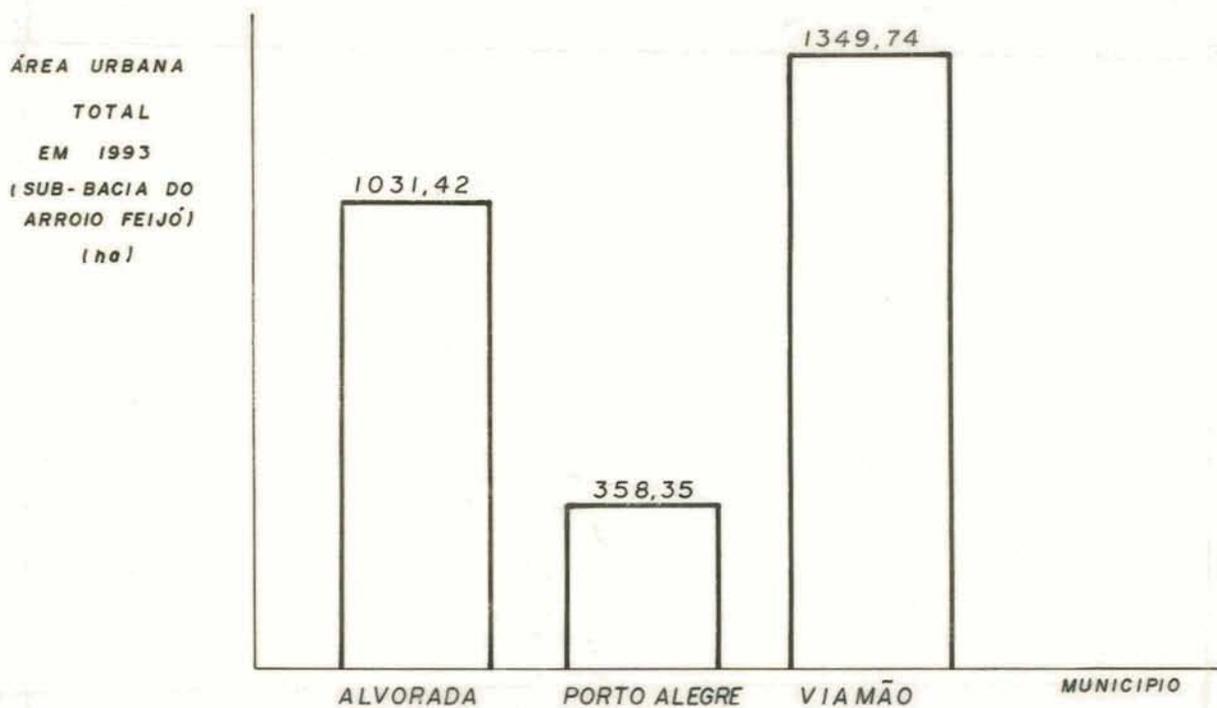


Figura 4.38 - Resultados obtidos pela quantificação das áreas do PI-93XL

4.4.5 - SUSCETIBILIDADE PRELIMINAR À EROSÃO LAMINAR — PI - ERL

A suscetibilidade preliminar à erosão laminar resulta do cruzamento do PI-Pedológico (PI-PED) com o PI Isodeclividades 1 (PI-D1). O modelo adotado, Figura 4.39, é baseado na metodologia proposta por Salomão (1992) para a determinação qualitativa da suscetibilidade preliminar à erosão laminar a partir da erodibilidade dos solos e da declividade do terreno. Constitui-se numa técnica preliminar ou simplificada para a avaliação da suscetibilidade à erosão laminar, utilizada em planejamento urbano. Para um estudo mais detalhado deverá ser considerada a Equação Universal de Perdas do Solos (Universal Soil Loss Equation - USLE) desenvolvida por Wischmeier e Smith na década de 50. A obtenção e a manipulação dos parâmetros da USLE através de técnicas de geoprocessamento encontramos em Risso (1993).

No caso da área teste, os graus de suscetibilidade preliminar à erosão laminar em função das diversas classes de solo e de declividades existentes e que subsidiam o arquivo de regras do PI-ERL, Regra 4, estão baseados no PROTEGER (1994) e podem ser vistos na Tabela 4.14. Após o cruzamento, resultam dezesseis novas classes. Essas classes posteriormente são agrupadas e quantificadas, como mostra a Tabela 4.15, em função dos cinco graus de suscetibilidade preliminar à erosão laminar adotados. O PI-ERL resultante para a sub-bacia do Arroio Feijó pode ser encontrado na Figura 4.40.

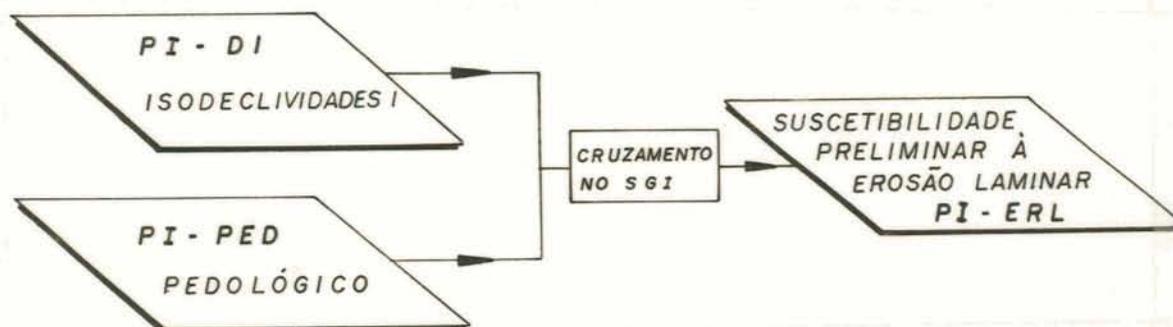


Figura 4.39 - Modelo de cruzamento dos PIs para a determinação da suscetibilidade preliminar à erosão laminar, baseado na metodologia proposta por Salomão (1992).

Tabela 4.14 - Graus de suscetibilidade preliminar à erosão laminar para a área teste

		ISODECLIVIDADES D1			
TIPO DE SOLO	ESPECIFICAÇÃO DOS TIPOS DE SOLOS	Classe 4 > 20%	Classe 3 12 - 20%	Classe 2 6 - 12%	Classe 1 0 - 6%
PV1 Classe 1	Podzólico vermelho-amarelo, não abruptico, médio/argiloso	MA	A	A	M
PV2 Classe 2	Podzólico vermelho-amarelo, médio/argiloso	A	M	M	B
PL Classe 3	Planossolo	-	-	-	N
R1 Classe 4	Litólico e cambissolo médio/cascalhento/argiloso	MA	MA	A	A

Fonte: extraído do PROTEGER (1994)

MA - muito alta A - alta M - moderada B - baixa N - nula

Tabela 4.15 - Quantificação de áreas referentes às classes de suscetibilidade preliminar à erosão na sub-bacia do Arroio Feijó.

CLASSES	ÁREA (ha)
Muito Alta	335,16
Alta	1.513,12
Moderada	1.761,58
Baixa	975,91
Nula	1.126,23
TOTAL	5.712,00



Figura 4.40 - PI-ERL com a distribuição espacial das classes de suscetibilidade preliminar à erosão laminar para a área teste.

As Figuras 4.41 a 4.43 mostram locais na área teste onde constata-se a ocorrência de processos erosivos devido à ação antrópica.



Figura 4.41 - Área de implantação do loteamento Algarve, município de Alvorada.



Figura 4.42 - Avançado estágio de erosão em sulcos junto ao loteamento Algarve.



Figura 4.43 - Arruamento no município de Viamão, ao sul da sub-bacia.

4.4.6 - ÁREAS COM RESTRIÇÃO AO USO URBANO — PI - RUU

As áreas de restrição ao uso urbano são aquelas que apresentam limitações físicas e (ou) legais a esse tipo de uso do solo, em função dos seus aspectos geotécnicos.

Nesta dissertação está estabelecido um sistema para a classificação de áreas com restrição ao uso urbano na área teste da metodologia proposta.

A partir das informações sobre o substrato geológico, tipo de solo, relevo e declividades predominantes estão definidas quatro classes referentes ao maior ou menor grau de restrição à ocupação urbana. O sistema proposto considera ainda a minimização dos custos para a implantação de edifícios e obras de infra-estrutura urbana e poderá ser empregado em outras áreas, desde que adaptado às características geotécnicas peculiares de cada região.

As classes estabelecidas para a sub-bacia do Arroio Feijó são as seguintes:

CLASSE I - menor número de restrições à ocupação urbana

Nessa classe predominam declividades de 3 a 15%, atendendo, portanto, o intervalo de declives ótimos para a ocupação urbana e para edifícios de habitação convencionais (0 a 15 %) indicados pela Kansas Geological Survey, apud Maciel Filho, 1989 e o limite máximo de 15% considerado por Hofmann em 1976 (Maciel Filho, 1989) para usos urbanos gerais. Atende também ao limite máximo (15%) para a inclinação longitudinal de vias de circulação de veículos (IPT 1991).

O relevo é suavemente ondulado a ondulado.

Os solos são do tipo solos podzólicos vermelho-amarelo (PV1 e PV2) com substrato do Pré-Cambriano Indiviso ou Depósitos Terciários. São solos profundos, bem drenados, não apresentando maiores restrições à urbanização.

Nas declividades inferiores a 6% poderão ocorrer problemas de erosão, mas restritos à ocorrência de cortes ou aterros. Nesse caso, cuidados especiais devem ser tomados para evitar o aumento da declividade natural do terreno pelo mal dimensionamento dos taludes.

Nas declividades de 6% a 15% quando os solos podzólicos vermelho-amarelo poderão apresentar suscetibilidade alta ou moderada à erosão, os projetos de ocupação e uso do solo devem contemplar técnicas conservacionistas. Da mesma forma, nesse intervalo de Declividades poderão surgir problemas localizados de instabilidade de taludes, obrigando a adoção de técnicas construtivas específicas como obras de contenção (muros de ocorrência) e sistemas de drenagens artificiais (canaletas e valas revestidas). Nas encostas suaves é recomendada a proteção da vegetação e preservação dos sistemas de drenagens. Atenção especial deve ser dada, segundo PROTEGER (1994), para áreas com declividades superiores a 12% onde ocorram solos suscetíveis a erosão de forma a evitar que processos erosivos provoquem o assoreamento dos cursos d'água.

Considerando a espessura do solo superficial e as condições de boa drenagem do terreno, não há maiores restrições aos projetos de loteamentos. São áreas inclusive indicadas para um maior adensamento urbano.

Nos projetos de fundações e de infra-estrutura subterrânea devem ser observadas as características específicas do terreno, não dispensando a investigação do sub-solo para edificações de qualquer porte a fim de evitar problemas de recalques. Cuidados especiais devem ser dispensados às fundações

de edifícios de maior porte sobre zonas onde ocorrem Depósitos Terciários cujo grau de compactação do substrato é pequeno.

Devem ser considerados também de acordo com Coelho (1980, apud Maciel Filho, 1989) os custos progressivos das obras de edifícios e saneamento básicos para declividades a partir de 5%.

Estão classificadas ainda na Classe 1, com menor número de restrições à ocupação urbana, as áreas da sub-bacia do Arroio Feijó onde ocorrem relevo plano, declividades de 0 a 3%, solos podzólicos vermelho-amarelo e substrato constituído ou procedente de rochas graníticas (PEi e Te).

CLASSE II - áreas problemáticas à ocupação urbana

São áreas constituídas por relevo ondulado a forte ondulado e declividades entre 15 e 30%, solos podzólicos vermelho-amarelo (PV1 ou PV2) e substrato de origem granítica (PEi e Te).

Embora não sejam áreas totalmente desfavoráveis à ocupação urbana, estão acima do declive de 15% "limite normalmente adotado como fronteira prática corrente da engenharia civil" (Coelho 1980, apud Maciel Filho, 1989). Segundo o autor, esse fato poderá exigir a adoção de soluções técnicas não convencionais como fundações especiais e obras de contenção.

Por maior razão, deverão ser executadas, nessas áreas, sistemas de drenagens artificiais e exigida a aplicação de técnicas conservacionistas nos projetos de ocupação urbana nos locais onde a erodibilidade dos solos é alta ou moderada.

Segundo o Guia de Utilização da Carta de Aptidão Física ao Assentamento Urbano de São Paulo (1986) áreas com essas características de relevo e declividades poderão estar sujeitas a graves problemas geotécnicos se os projetos de parcelamento do solo forem padronizados, isto é, não adequarem as dimensões dos lotes e a largura das vias públicas às condições topográficas do terreno.

Além disso, o custo da implantação da infra-estrutura urbana sofre considerável acréscimo nessas áreas com declividades elevadas. É recomendada inclusive a execução de pavimentação nos sistemas viários com declividades superiores a 15% a fim de evitar processos erosivos (IPT 1991).

Nas áreas com declividades entre 20% e 30% é contra-indicado o processo de urbanização, principalmente à construção de loteamentos de alta

densidade, que implica em custos elevados de infra-estrutura, além de riscos de erosão e deslizamento (baseado no PROTEGER, 1994).

Foram também classificadas como áreas problemáticas à ocupação urbana as áreas que apresentam substrato instável formado por Depósitos Fluviais (Qf), onde não é recomendada a construção de edificações de maior porte.

CLASSE III - áreas com maior restrição à ocupação urbana

São áreas que apresentam relevo forte ondulado a montanhoso, com declividades iguais ou superiores a 30% e portanto proibidas ao parcelamento do solo de acordo com a lei 6766/79, salvo se atendidas as exigências específicas das autoridades competentes. Essas exigências segundo IPT (1991, apud Vieira & Kurkdjian, 1993) são: "evitar terraplenagens excessivas; proteger contra a erosão áreas terraplanadas exatamente após a sua execução; evitar o escoamento de grandes volumes d'água no leito das ruas, lançando em drenagem natural."

Estão também classificadas com áreas com maior restrição à ocupação urbana àquelas onde predominam solos rasos como solos litólicos e cambissolos e que apresentam segundo Couto *et al.* (1993) aptidão insatisfatória ao uso residencial.

CLASSE IV - áreas impróprias ao uso urbano

São áreas constituídas por solos profundos, mal drenados como planossolos e solos glei pouco húmicos. O relevo é plano e formado por terrenos baixos junto às áreas de várzeas adjacente aos cursos d'água. As declividades encontram-se entre 0 e 3%. São áreas saturadas e normalmente alagadiças, com lençol freático próximo à superfície. São áreas impróprias ao uso urbano tendo em vista a baixa capacidade de carga admissível dos solos existentes, o que dificulta as fundações dos edifícios, a sustentação de aterros e encarece o custo das obras de drenagem, escavações e das próprias edificações. São indicadas, no entanto, para atividades agrícolas e de lazer.

Na sub-bacia em estudo esta área faz parte da área maior adjacente ao rio Gravataí que atua como efeito esponja. Isto é, armazena água na época das chuvas, e libera gradativamente em períodos de seca, minimizando problemas de cheias e estiagens (PROTEGER, 1994). Áreas classificadas como Classe IV são encontradas ainda em determinadas zonas adjacentes ao arroio Feijó.

Para a identificação espacial das quatro classes de restrição ao uso urbano na área teste, realiza-se o cruzamento dos PIs originais e secundário conforme o modelo apresentado na Figura 4.44. A Figura 4.45 mostra o PI-RUU resultante do cruzamento efetuado e a Tabela 4.16 descreve as quantificação das áreas correspondentes a cada uma das classes empregadas. O arquivo de regras denomina-se Regra 5.

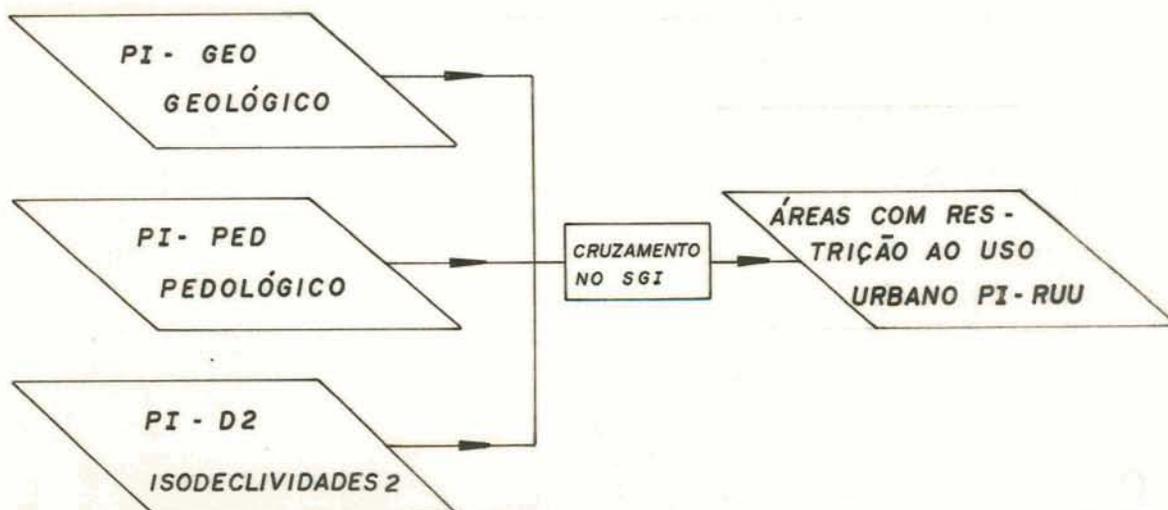


Figura 4.44 - Modelo de cruzamento de PIs para a identificação de áreas com restrição ao uso urbano.

Tabela 4.16 - Quantificação das áreas referentes às classes com restrições ao uso urbano na sub-bacia do Arroio Feijó.

CLASSES	ÁREA (ha)
Classe I Menor número de restrições à ocupação urbana	3073,97
Classe II Áreas problemáticas à ocupação urbana	1.421,94
Classe III Áreas com maior restrição à ocupação urbana	241,73
Classe IV Áreas impróprias ao uso urbano	974,36
TOTAL	5712,00

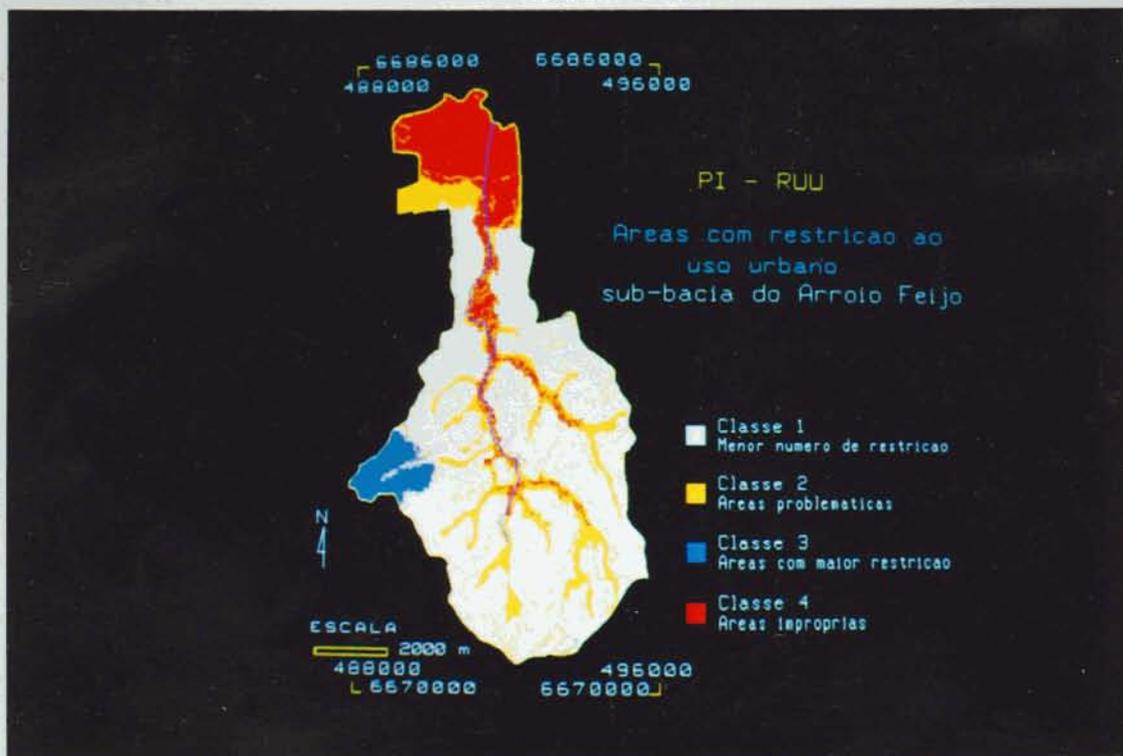


Figura 4.45 - PI-RUU com a distribuição espacial das áreas com restrição ao uso urbano na sub-bacia do Arroio Feijó.

4.4.7 - ÁREA URBANA EM 1975 X ÁREAS COM RESTRIÇÃO AO USO URBANO — PI - 75XR

Este plano de informação tem por finalidade permitir a análise da área urbana existente na data inicial do estudo da evolução da área urbana em função das restrições identificadas a esse tipo de uso do solo por ocasião do PI-RUU.

A Figura 4.46 apresenta o modelo de cruzamento para a área teste.

Já a Figura 4.53 mostra o PI-75xR resultante, enquanto a Tabela 4.17 apresenta a quantificação das áreas obtidas.

O arquivo de regras neste caso denomina-se Regra 6.



Figura 4.46 - Modelo de cruzamento para a análise da área urbana em 1975 em função das áreas com restrição ao uso urbano na área teste.

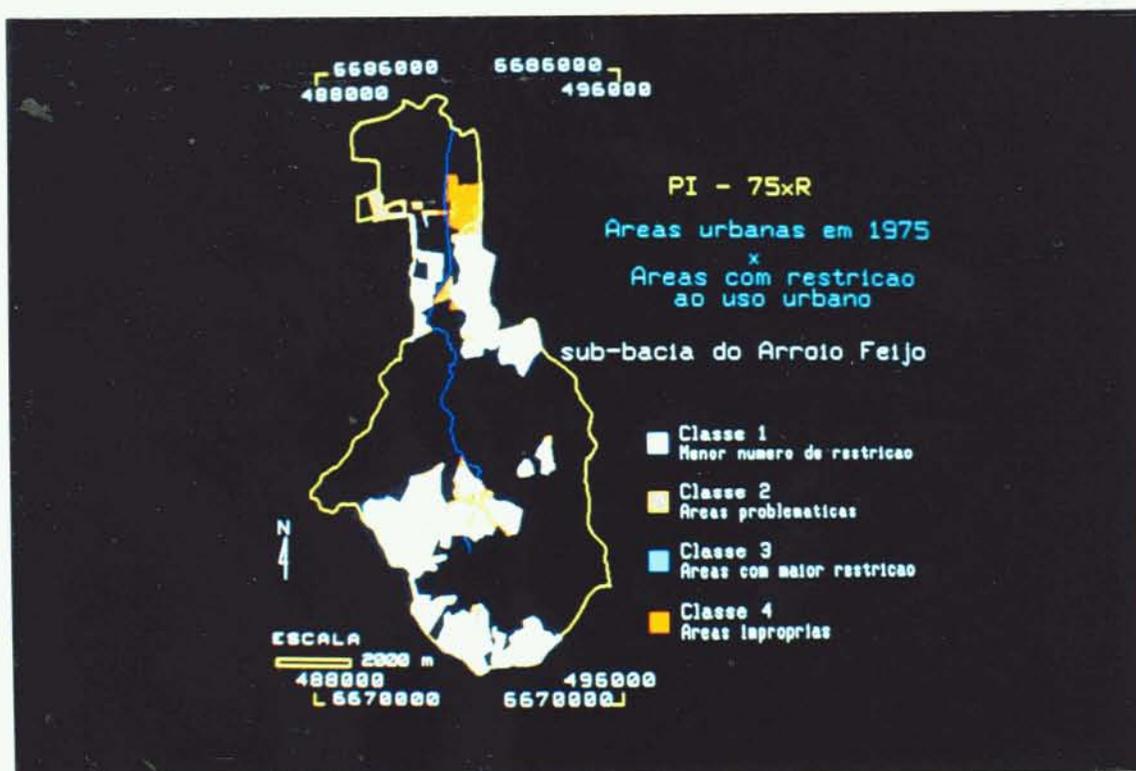


Figura 4.47 - PI - 75XR, apresentando a distribuição espacial da área urbana existente em 1975, na sub-bacia do Arroio Feijó, em função das áreas com restrição ao uso urbano.

Tabela 4.17 - Quantificação das áreas resultantes do cruzamento das áreas com restrição ao uso urbano e área urbana existente em 1975 na sub-bacia do Arroio Feijó.

CLASSES	ÁREA URBANA EXISTENTE EM 1975 (ha)
Classe I Menor número de restrições à ocupação urbana	1.018,27
Classe II Áreas problemáticas à ocupação urbana	390,76
Classe III Áreas com maior restrição à ocupação urbana	10,73
Classe IV Área impróprias ao uso urbano	146,30
TOTAL	1.566,06

4.4.8 - ÁREA URBANA EM 1993 X ÁREAS COM RESTRIÇÃO AO USO URBANO — PI - 93XR

Este plano de informação tem por finalidade a análise da área urbana existente, ao término do período da análise da evolução da área urbana, em função das restrições definidas por ocasião do PI-RUU.

Para a área teste o modelo de cruzamento das informações está mostrado na Figura 4.48.



Figura 4.48 - Modelo de cruzamento para a análise da área urbana em 1993 em função das áreas com restrição a esse tipo de uso na área teste.

A quantificação das áreas e o PI-93XR podem ser vistos na Tabela 4.18 e na Figura 4.49 respectivamente. O arquivo de regras denomina-se Regra 7.

Tabela 4.18 - Quantificação das áreas com restrição ao uso urbano x área urbana existente em 1993 na sub-bacia do Arroio Feijó.

CLASSES	ÁREA URBANA EXISTENTE EM 1993 (ha)
Classe I Menor número de restrições à ocupação urbana	1.701,43
Classe II Áreas problemáticas à ocupação urbana	771,57
Classe III Áreas com maior restrição à ocupação urbana	12,66
Classe IV Área impróprias ao uso urbano	253,85



Figura 4.49 - PI-93XR com a distribuição espacial da área urbana existente em 1993 na sub-bacia do Arroio Feijó em função das áreas com restrição ao uso urbano.

4.4.9 - ÁREAS COM PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS PERIGOSOS — PI - EVP

As áreas com probabilidade de ocorrência de eventos perigosos são entendidas, a partir de Zuquete (1994), como sendo aquelas sujeitas a fenômenos físicos de origem natural ou provocados pelo homem, com dimensões e localização geográfica conhecidas no tempo e que oferecem perigo latente à população ou equipamentos urbanos.

Para a área teste, as áreas com probabilidade de ocorrência de eventos perigosos (Figura 4.51) resultam do cruzamento, no SGI, dos planos de informação referentes a inundações (PI-INUM), áreas com suscetibilidade preliminar à erosão laminar (PI-ERL) e áreas com restrição ao uso urbano (PI-RUU), conforme o modelo especificado na Figura 4.50 e arquivo de regras Regra 8.

Os eventos considerados perigosos em função dos PIs citados acima são: áreas inundáveis (PI-INUN), suscetibilidade preliminar à erosão laminar alta e muito alta (PI-ERL) e áreas impróprias ao uso urbano, onde há presença de solos com baixa capacidade de carga e consequentemente capazes de provocar recalques nas edificações (PI-RUU). A Tabela 4.19 mostra a quantificação das áreas obtidas no PI-EVP.

Quando a metodologia proposta for aplicada em regiões sujeitas a outros fenômenos decorrentes do meio físico ou da ação antrópica, como por exemplo, movimentos de massa, desertificações, agentes poluidores ou tóxicos, poderão ser previstos cruzamentos de outros planos de informação.

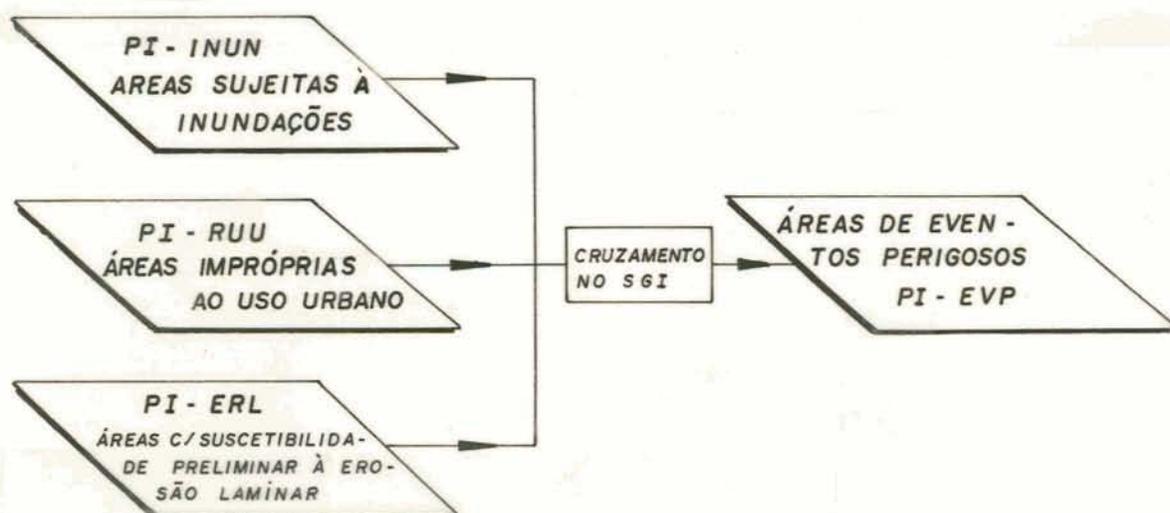


Figura 4.50 - Modelo para o cruzamento de PIs para a determinação das áreas com probabilidade de ocorrência de eventos perigosos na área teste.



Figura 4.51 - PI-EVP com as áreas com probabilidade de ocorrência de eventos perigosos na sub-bacia do Arroio Feijó.

Tabela 4.19 - Quantificação das áreas com probabilidade de ocorrência de eventos perigosos estudados na sub-bacia do Arroio Feijó.

FENÔMENO ESTUDADO	ÁREA (ha)
Áreas com suscetibilidade preliminar à erosão laminar muito alta	335,16
Áreas com suscetibilidade preliminar à erosão laminar alta	1.513,08
Áreas sujeitas a inundações	606,73
Áreas impróprias ao uso urbano	384,20
TOTAL	2.839,17

4.4.10 - ÁREAS DE RISCO EM 1993 — PI - RISC-93

As áreas de risco estão associadas segundo Zuquete (1994) à ocorrência de perdas econômicas, sociais e ambientais, além de um valor limite considerado normal ou aceitável, devido a um fenômeno geológico, atmosférico ou hidrológico provocado pelo homem ou de origem natural. Essas perdas são portanto resultantes da relação entre a ocorrência de um evento perigoso e a presença vulnerável da população e bens materiais.

Dessa forma, na presente dissertação as áreas de risco resultam do cruzamento do plano de informação referente à probabilidade de ocorrência de eventos perigosos com o plano de informação da área urbana existente na data estudada.

Para a área teste, as áreas de risco são determinadas para o ano de 1993, de acordo com o modelo de cruzamento apresentado na Figura 4.52 e o arquivo de Regras 9.

O PI-RISC93 e a quantificação correspondente das áreas de risco identificadas encontram-se na Figura 4.53 e na Tabela 4.20 respectivamente.

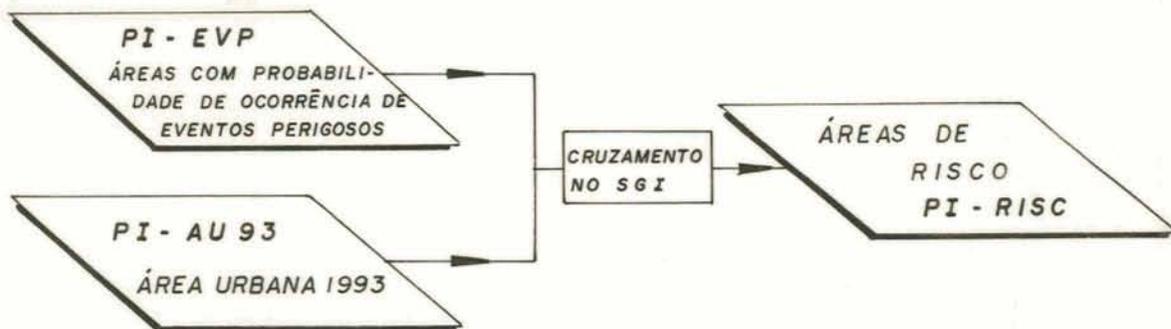


Figura 4.52 - Modelo de cruzamento de informações para a determinação das áreas de risco na área teste.



Figura 4.53 - PI-RISC93, mostrando a distribuição espacial das áreas de risco consideradas na área teste.

Tabela 4.20 - Quantificação das áreas de risco na sub-bacia do Arroio Feijó

TIPO DE RISCO	ÁREA (ha)
Áreas com risco muito alto à erosão laminar	84,74
Áreas com risco alto à erosão laminar	809,12
Áreas com risco de inundações	40,30
Áreas com risco de recalques nas edificações devido à baixa capacidade de carga.	177,75
TOTAL	1.111,91

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia, utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, Modelagem Numérica do Terreno (MNT) e Sistema de Informações Geográficas (SIG), visando o planejamento racional do uso do solo urbano tendo em vista o processo de expansão da área urbana e sua interação com o meio físico da área estudada.

Com a finalidade de testar a metodologia proposta nesta dissertação, foi selecionada uma área teste, conforme descrito no Capítulo 1.

Os resultados obtidos mostram a importância e a contribuição do uso conjunto das ferramentas básicas Modelagem Numérica do Terreno (MNT), técnicas de Sensoriamento Remoto através de imagens orbitais e Sistema de Informações Geográficas (SIGs) no monitoramento da expansão das áreas urbanas, (mancha urbana contínua), bem como na identificação de parâmetros relevantes ao problema, tais como a identificação de áreas com suscetibilidade preliminar à erosão laminar e áreas sujeitas à inundação, na determinação de áreas com restrição à ocupação urbana e áreas com probabilidade de ocorrência de eventos perigosos ou ainda aquelas caracterizadas como de risco.

Cabe lembrar aqui, que mancha urbana é entendida como a feição relativa à área urbana que permite visualizar a ocupação total da superfície com uso urbano. Na metodologia proposta a mancha urbana é constituída pelas classes área urbana e loteamento, definidas no Capítulo 4, item 4.2.1.

Os resultados referentes à aplicação da metodologia na área teste selecionada podem ser resumidos da seguinte forma:

a) quanto à expansão urbana

A metodologia proposta permitiu o fácil acompanhamento do processo de expansão da área urbana e a análise da presença ou não de direções preferenciais de crescimento (vetores de expansão).

Quando aplicada à área teste, os seguintes resultados foram constatados:

Em 1975, data inicial do estudo, a área urbana (mancha urbana contínua) na sub-bacia do Arroio Feijó perfazia um total de 1.566,06 ha ou seja 27,42% da superfície da sub-bacia. Desse total, 33,65% (527,06 ha) pertenciam ao município de Alvorada, 9,27% (145,09 ha) encontrava-se no município de Porto Alegre e os 57,08% (893,91 ha) restantes situavam-se no município de Viamão.

Em 1993, a área urbana atingiu 2.739,50 ha, passando a ocupar 47,96% da superfície da sub-bacia. Houve, portanto, um crescimento de 74,93% da mancha urbana num período de dezoito anos. O maior crescimento relativo verificou-se no município de Porto Alegre (147%) que atingiu 358,35 ha, seguindo-se o município de Alvorada (96%) referente a uma área urbana de 1031,42 ha em 1993 e finalmente o município de Viamão (51%) com um total de 1349,74 ha na mesma data. Nota-se, contudo, que em valores absolutos o município de Viamão continuou contribuindo com os maiores valores de área urbana na sub-bacia.

Não constatou-se, especificamente, um vetor de expansão urbana no período estudado, mas sim um crescimento generalizado em torno das áreas existentes em 1975. A tendência observada é de preenchimento dos espaços vazios da área urbana nos três municípios que integram a sub-bacia. Destaca-se no entanto, na parte central da sub-bacia a implantação do loteamento Algarve, situado no município de Alvorada, que contribuiu de forma decisiva para o acréscimo da área urbana na área teste.

b) quanto à suscetibilidade preliminar à erosão laminar

A metodologia desenvolvida mostrou ser capaz de identificar as áreas com suscetibilidade preliminar à erosão laminar.

Na área de estudo, utilizada para testar a metodologia proposta, concluiu-se que 36,80% da sua superfície apresenta suscetibilidade preliminar

baixa ou nula à erosão laminar, 30,84 % suscetibilidade moderada, 26,49 % alta e 5,87 % muito alta.

Áreas com suscetibilidade preliminar à erosão laminar muito alta situam-se na porção oeste, nos municípios de Porto Alegre e Viamão, onde ocorrem declividades superiores a 12% na presença de solos litólicos e cambissolos. Aparece também em pontos esparsos da sub-bacia, onde são encontrados solos podzólicos vermelho-amarelo com declividades superiores a 20%.

Suscetibilidade preliminar alta à erosão laminar verifica-se principalmente na parte central da sub-bacia do Arroio Feijó, na presença de solos do tipo podzólicos vermelho-amarelo (PV1) com declividades superiores a 6%.

Suscetibilidade preliminar moderada à erosão laminar constata-se praticamente em zonas esparsas por quase toda a sub-bacia, exceto na porção situada ao norte, onde a suscetibilidade é baixa ou nula devido à presença de solos do tipo planossolos e glei pouco húmico ou ainda podzólicos vermelho-amarelo em declividades inferiores a 6%. Suscetibilidade preliminar baixa à erosão laminar ocorre ainda na porção centro-sul, junto ao município de Viamão. Já as zonas de várzeas ao longo da rede de drenagem são caracterizadas pela suscetibilidade nula à erosão laminar graças à presença de planossolos e solos glei pouco húmico.

O maior problema de erosão constatado na área de estudo, ocorre no entanto, devido a ação antrópica, junto ao loteamento Algarve. Esse loteamento localiza-se no município de Alvorada, na porção centro-oeste da sub-bacia, onde predominam suscetibilidade preliminar à erosão laminar muito alta a moderada. Ali, a retirada da vegetação para a construção do loteamento, que ocorreu de forma parcial, e o abandono do sistema viário sem pavimentação e sem sistema de drenagem para as águas pluviais tornaram-se fatores decisivos no desencadeamento de processos erosivos. Assim, além da ocorrência de erosão laminar, constata-se naquele local a erosão na forma de sulcos ou ravinas com intensa degradação e comprometimento do meio ambiente.

A identificação de áreas com problemas erosivos através da metodologia proposta auxiliam os técnicos na elaboração de recomendações. Assim, como exemplo, na área teste utilizada, pode-se recomendar a execução de aterros compactados e a recomposição da vegetação através de gramíneas. Pode-se recomendar também que as áreas mais degradadas após a sua recuperação sejam destinadas ao lazer ou proteção ambiental, não sendo aconselhável a ocupação com edificações. Ainda pode-se recomendar no restante da sub-bacia, que nas áreas com suscetibilidade alta e muito alta à erosão laminar, a ocupação

urbana adote técnicas que impeçam o surgimento de processos erosivos, evitando dessa forma a perda do solo e o assoreamento dos cursos d'água.

c) quanto às áreas de restrição ao uso urbano

A metodologia proposta nesta dissertação mostrou também ser capaz de auxiliar os técnicos de planejamento urbano na identificação de áreas com restrições ao uso urbano devido às condições do meio físico.

Os testes desenvolvidos ao longo da área teste permitiram as seguintes conclusões:

- 53,8 % da sub-bacia estudada (3073,97 ha) pertencem à classe I, com menor número de restrições à ocupação urbana. São áreas indicadas para a execução de projetos de loteamento e um maior adensamento urbano. No entanto, pode-se sugerir, que sejam observados nessas áreas os aspectos técnicos recomendados pela metodologia proposta na descrição da referida classe (item 4.4.6);

- 24,9 % (1421,94 ha) pertencem à classe II, áreas problemáticas à ocupação urbana, tendo em vista principalmente as declividades elevadas (entre 15 e 30 %). Pode-se sugerir também, neste caso, a observância das considerações técnicas descritas nessa classe, no item 4.4.6;

- 17% (974,35 ha) fazem parte da classe IV, denominada áreas impróprias ao uso urbano, devido a presença de solos mal drenados com declividades até 3%, com baixa capacidade de carga e sujeitos a alagamentos. A partir da identificação dessas áreas contra indicadas para o uso urbano, pela aplicação da metodologia proposta na região de estudo, pode-se sugerir a preservação das mesmas, tanto ao longo da rede de drenagem como ao norte da sub-bacia, onde atualmente predominam atividades agrícolas. Pode-se sugerir ainda, neste caso, para a área teste, o estabelecimento de diretrizes na legislação urbanística de forma a restringir e incentivar a utilização dessas áreas com atividades agrícolas ou atividades de lazer.

- 4,3% (241,73 ha) pertencem à classe III, definida como áreas com maior restrição à ocupação urbana onde ocorrem declividades superiores a 30% ou solos litólicos e cambissolos com altas declividades. Estas áreas em 1993 ainda não apresentavam processos significativos de ocupação urbana.

A metodologia proposta permitiu ainda o cruzamento das áreas com restrição ao uso urbano com as áreas urbanas existentes na área teste nas duas datas estudadas. Assim, de 1975 a 1993 constatou-se que o maior crescimento da área urbana na sub-bacia do Arroio Feijó ocorreu nas áreas classificadas como

Classe I, ou seja, menor número de restrição à ocupação urbana, com um acréscimo de 683,16 ha. Observou-se também que a classe III, que apresenta maior restrição a ocupação urbana, foi a que teve um menor crescimento urbano (1,93 ha). Essa classe localiza-se junto às altas declividades, a oeste da sub-bacia, no Morro Santana. Logo, considerando os resultados obtidos, pode-se sugerir a continuidade da preservação das áreas pertencentes à classe III através de uma fiscalização constante do Poder Público.

d) quanto às áreas consideradas de eventos perigosos

Os testes desenvolvidos na área de estudo, mostraram que a metodologia proposta é eficiente na identificação de áreas sujeitas a eventos perigosos.

Assim, verificou-se que as áreas consideradas de eventos perigosos perfazem um total de 2.839,17 ha, correspondendo a 49,7 % da área da sub-bacia. Entre elas estão, ao norte, as áreas sujeitas à inundação com 606,73 ha (10,62 %). Em 1993, a maior parte das áreas inundáveis estava ocupada com atividades agrícolas. Constatou-se, no entanto, ocupação urbana em pontos esparsos.

Também foram consideradas áreas de eventos perigosos as áreas com suscetibilidade preliminar à erosão laminar alta com 1513,08 ha (26,49 %) e muito alta com 335,16 ha (5,87 %). As primeiras estão distribuídas principalmente na porção central, ocorrendo também ao sul da sub-bacia. Já as segundas encontram-se a oeste, junto ao morro Santana, e em pontos isolados da sub-bacia do Arroio Feijó.

Acompanhando o traçado da rede de drenagem encontram-se ainda as áreas consideradas impróprias ao uso urbano. São áreas de várzea com solos com baixa capacidade de carga, podendo ocasionar recalques nas edificações. Por esse motivo foram também classificadas como áreas de eventos perigosos num total de 384,20 ha (6,73%).

A metodologia proposta permitiu detectar também a existência de áreas com suscetibilidade alta e muito alta à erosão laminar, consideradas de eventos perigosos, mas não ocupadas ainda com uso urbano no ano de 1993, embora muito próximas às áreas urbanizadas. Neste caso, pode-se recomendar para a área teste a adoção de medidas preventivas quanto à erosão. Como exemplo desses procedimentos, poderíamos citar a exigência de projetos de novos loteamentos com concepção específica para a área e criterioso acompanhamento na implantação dos mesmos por parte das autoridades municipais. Por outro lado, pode-se sugerir o esclarecimento dos ocupantes dos

novos lotes quanto à medidas que impeçam o surgimento de processos erosivos.

e) quanto às áreas de risco

A metodologia proposta nesta dissertação mostrou ser capaz de detectar áreas de risco para fins de ocupação urbana.

Quando aplicada à área teste, a metodologia permitiu as conclusões seguintes:

As áreas de risco, que pressupõe a presença vulnerável da população e bens materiais conforme o critério adotado neste estudo, resultaram em 1.111,91 ha, representando 19,46 % da área total da sub-bacia do Arroio Feijó assim distribuídos: áreas com risco alto e muito alto à erosão laminar, situadas na porção central, nos municípios de Alvorada e Viamão e ao sul, no município de Viamão; áreas com risco de inundação localizadas ao norte da sub-bacia, nos municípios de Alvorada e Porto Alegre e áreas com risco à estabilidade das edificações (impróprias ao uso urbano) junto às áreas de varzeas do Arroio Feijó, na região central da sub-bacia, no município de Viamão, e ao norte, nos municípios de Alvorada e Porto Alegre.

Com base nesses resultados pode-se sugerir algumas recomendações para a área teste como: esclarecimento à população quanto a procedimentos que impeçam a efetivação de processos erosivos como a conservação da cobertura vegetal e dos sistemas de drenagem das águas pluviais e a realização de cortes e aterros sob orientação técnica adequada. Da mesma forma, nas áreas com maior risco à estabilidade das edificações devido à baixa capacidade de carga dos solos, pode-se recomendar a adoção de medidas preventivas na legislação urbanística quanto ao porte das edificações, evitando a generalização de futuros problemas estruturais. Na área de risco à inundação medidas preventivas tem sido adotadas pelo poder Público como a construção de diques em Alvorada.

Dessa forma, conclui-se que as informações obtidas através da metodologia proposta além de facilitarem uma análise do meio físico e da ocupação urbana antiga e atual, são capazes de subsidiar a elaboração de Planos Diretores de Desenvolvimento Integrado, direcionando a expansão urbana para áreas menos desfavoráveis e de menor risco às populações.

A metodologia é simples e permite a atualização contínua e multitemporal dos dados com redução de custos e tempo, quando comparada aos métodos tradicionais. Por isso, pode ser adotada por órgãos de planejamento das

idades e regiões metropolitanas brasileiras que necessitam de informações dessa natureza com a agilidade que a metodologia oferece.

Utiliza um grande número de informações já existentes sobre a área de estudo como tipo de solo, unidades geológicas, cartas topográficas que constituem os diversos Planos de Informações originais. No entanto, na ausência dessas informações recomenda-se a previsão de novos procedimentos na Etapa 1 (Coleta de Dados) que envolvam levantamentos sobre o meio físico da região estudada. Nesse caso, as técnicas de Sensoriamento Remoto poderão também constituir ferramentas úteis para a agilização do trabalho de campo.

Quanto à aplicação das imagens orbitais em estudos urbanos, visando a análise da evolução da área urbana, considerada como mancha urbana contínua, conclui-se que os resultados são satisfatórios apesar das limitações devido à resolução espacial das imagens disponíveis. Portanto, o estudo ratifica o emprego de Sensoriamento Remoto a nível orbital nos estudos inter-urbanos e salienta a necessidade do uso complementar de fotografias aéreas em função de características específicas de cada região estudada.

Quanto aos três procedimentos utilizados para classificar a imagem LANDSAT/TM 5 nas classes área urbana, loteamento e área não urbana, os resultados obtidos ao longo da área teste são os seguintes:

a) a classificação visual da imagem, utilizando a banda 3 filtrada (filtro 3, passa-altas, item 4.2.2) e a composição colorida, é o procedimento que apresentou melhores resultados.

Essa conclusão deve-se possivelmente ao fato de que diferentes alvos presentes na cena urbana, como solo exposto ou coberto por vegetação pouco densa e áreas edificadas apresentam resposta espectral bastante semelhantes. Por essa razão, os processos de classificação por computador, que empregam atributos espectrais somente, não apresentam bons resultados. A interpretação visual, a partir de imagens orbitais originais ou previamente processadas em computador, foi por essa razão o método empregado preferencialmente. Ainda assim, em certos casos a identificação precisa de algumas classes em área urbana fica prejudicada pela menor resolução espacial de imagens orbitais como as fornecidas pelo sistema LANDSAT. Nesse caso, o uso de fotografias aéreas, permite verificar e corrigir a classificação realizada. Da mesma forma é indispensável a verificação "in locu" dos resultados obtidos;

b) no que diz respeito às técnicas de pre-processamento de imagens orbitais para posterior classificação visual, a aplicação do filtro passa-altas (Filtro 3, item 4.2.2) mostrou ser adequada, pois realçou o traçado do sistema viário e da malha urbana, facilitando a identificação da classe área urbana. Recomenda-se que

sejam testados outros filtros passa-altas quando a metodologia for aplicada em diferentes regiões de estudo;

c) o emprego de composição colorida (3B, 4G e 7R), embora não tenha se mostrado essencial, auxiliou na verificação da classificação visual da imagem orbital. As bandas 3 (com filtro passa-altas), 4 e 7 associadas respectivamente às cores azul (B), verde (G) e vermelho (R) permitiram a visualização dos alvos urbanos em cores mais próximas da realidade, facilitando a identificação das classes área urbana, loteamento e área não urbana.

d) conforme mencionado no item a), a classificação da imagem LANDSAT/TM 5 por computador não apresentou os resultados desejados na identificação das três classes de uso do solo empregadas neste estudo. Áreas edificadas, áreas com solo exposto e com vegetação rala, por apresentarem respostas espectrais semelhantes, foram classificadas em determinados pontos da imagem como sendo todas áreas urbanas. Por esse motivo, o procedimento não foi levado adiante na metodologia;

e) a classificação visual da imagem LANDSAT/TM 5, empregando técnicas de componentes principais também não alcançou os resultados esperados, quando utilizou-se apenas três bandas (3, 5 e 7). A imagem resultante na primeira componente principal apresentou as feições urbanas de forma mais homogênea e com menor contraste, tornando mais difícil a identificação do sistema viário e conseqüentemente da mancha urbana. Assim, recomenda-se, quando houver disponibilidade, que sejam envolvidas nessa técnica um maior número de bandas.

Os resultados acima descritos poderão obviamente apresentar variações quando a metodologia for aplicada em outras áreas. Esse fato é constatado na própria sub-bacia do Arroio Feijó, em função da diversidade das características do tecido urbano existente. Na porção norte da sub-bacia, por exemplo, nos municípios de Porto Alegre e Alvorada, a área urbana é identificada mais precisamente tanto na classificação visual quanto na classificação por computador, devido a um maior adensamento urbano e baixo índice de vegetação. Já na parte sul da sub-bacia, junto ao município de Viamão, a área urbanizada é menos densa, com um maior índice de vegetação, dificultando pelos dois métodos a classificação da imagem. Recomenda-se em futuros estudos que sejam incluídos e testados outros procedimentos na Etapa 2 da metodologia, como por exemplo a transformação IHS (Intensity, saturation, Hue) para a classificação da área urbana e não urbana.

A classificação por computador, empregando o método da Maxverossimilhança Gaussiana, quando utilizada para identificar as áreas sujeitas a inundações através da imagem LANDSAT/TM 5, mostrou resultados satisfatórios, provavelmente devido às características de resposta espectral dessas áreas, distintas das demais.

A implementação de técnicas de Sistema de Informações Geográficas (SIGs), em especial o SGI-INPE, mostrou-se muito eficiente na integração de dados necessários ao planejamento urbano e oriundos de diversas fontes como cartas e imagens orbitais. Da mesma forma, ressalta-se a importância do cruzamento das informações permitido pelo sistema. Esse recurso permitiu de uma forma ágil o monitoramento da expansão da área urbana, a identificação eficiente e rápida de áreas inadequadas ou com restrições ao uso urbano e áreas com suscetibilidade preliminar à erosão. Permitiu ainda a identificação de áreas mais apropriadas a ocupação urbana tendo em vista aspectos do meio físico. Embora não prescindindo de um levantamento detalhado "in locu", o emprego do SGI auxiliou no direcionamento do trabalho de campo com redução de tempo e agilização dos resultados finais.

No entanto, cabe ressaltar que durante o desenvolvimento dos testes de validação da metodologia, a utilização do PI Geomorfológico mostrou alguma dificuldade. Embora de fácil observação, as características geomorfológicas mostraram-se bastante refratárias à uma quantificação, operação essa necessária à construção de um PI. Por essa razão, o PI Geomorfológico não foi utilizado na etapa 4 da metodologia proposta.

A Modelagem Numérica do Terreno (MNT), por sua vez, demonstrou-se também ferramenta fundamental para as atividades de planejamento urbano, principalmente quando o modelo foi cruzado com outras informações georeferenciadas provenientes de levantamento geotécnico. Através desse recurso foi possível identificar regiões problemáticas e impróprias ao uso urbano devido à erosão do solo e a altas declividades.

Finalmente, cabe salientar que a metodologia proposta não é um produto final e acabado. Novas variáveis relacionadas aos aspectos geotécnicos poderão constituir novos planos de informações, permitindo outros cruzamentos de informações e aprofundando o estudo das áreas urbanas e sua interface com o meio físico. Da mesma forma, poderá ser aplicada na elaboração de cartas geotécnicas e em atividades de planejamento urbano e regional.

ANEXO

;ARQUIVO DE REGRAS - REGRA 1

;EXPANSAO DA AREA URBANA - PERIODO DE 1975 A 1993 (PI-EXAU)

;DECLARACAO DOS PIS DE ENTRADA

AU75 A
AU93 B

;DECLARACAO DAS CLASSES DO PI RESULTADO

*U75 71
*EXP93 10

;DECLARACAO DAS REGRAS DE CRUZAMENTO

:U75 = A1 A1
:U75 = A2 A2
:EXP93 = B1°A1
:EXP93 = B2°A2
:EXP93 = B1°A2
:EXP93 = B2°A1

;ARQUIVO DE REGRAS - REGRA 2

;AREAS URBANAS 1975 X LIMITES MUNICIPAIS (PI-75XL)

;DECLARACAO DOS PIS DE ENTRADA

AU75 U ; PI area urbana em 1975
LIMT L ; PI limites municipais

;DECLARACAO DAS CLASSES PI RESULTADO

*C1 127 ; municipio de Alvorada L1
*C2 59 ; municipio de Porto Alegre L2
*C3 110 ; municipio de Viamao L3

;REGRAS

:C1 = U1 L1
:C1 = U2 L1
:C2 = U1 L2
:C2 = U2 L2
:C3 = U1 L3
:C3 = U2 L3

;ARQUIVO DE REGRAS - REGRA 3

;AREAS URBANAS 1993 X LIMITES MUNICIPAIS (PI-93XL)

;DECLARACAO DOS PIS DE ENTRADA

AU93 U ; PI area urbana em 1993
LIMT L ; PI limites municipais

;DECLARACAO DAS CLASSES PI RESULTADO

*C1 127 ;municipio de Alvorada L1
*C2 59 ;municipio de Porto Alegre L2
*C3 110 ;municipio de Viamao L3

;REGRAS

:C1 = U1 L1
:C1 = U2 L1
:C2 = U1 L2
:C2 = U2 L2
:C3 = U1 L3
:C3 = U2 L3

;ARQUIVO DE REGRAS - REGRA 4

;SUSCETIBILIDADE A EROSAO LAMINAR (PI-ERLM)

;DECLARACAO DOS PIS DE ENTRADA

pedo P ; PI pedologico
D1 D ; PI isodeclividades 1

;DECLARACAO DAS CLASSES DO PI RESULTADO

*C1 120
*C2 14
*C3 14
*C4 112
*C5 13
*C6 120
*C7 120
*C8 14
*C9 1
*C10 1
*C11 1
*C12 1
*C13 14
*C14 14
*C15 112
*C16 112

;DECLARACAO DAS REGRAS DE CRUZAMENTO

:C1 = P1 D1
:C2 = P1 D2
:C3 = P1 D3
:C4 = P1 D4
:C5 = P2 D1
:C6 = P2 D2
:C7 = P2 D3
:C8 = P2 D4
:C9 = P3 D1
:C10 = P3 D2
:C11 = P3 D3
:C12 = P3 D4
:C13 = P4 D1
:C14 = P4 D2
:C15 = P4 D3
:C16 = P4 D4

;descricao das classes agrupadas usadas

;muito alta cor 112
;alta cor 116
;moderada cor 120
;baixa cor 105
;nula cor 1

;ARQUIVO DE REGRAS - REGRA 5

;AREAS COM RESTRICAO AO USO URBANO (PI-RUU)
;CRUZAMENTO DOS PIS DECLIVIDADE-D2,PEDOLOGICO E GEOLOGICO

;DECLARACAO DOS PIS DE ENTRADA

#D2m D ; PI isodeclividades 2
#PEDm P ; PI pedologico
#GEOm G ; PI geologico

;DECLARACAO DAS CLASSES DO PI RESULTADO

*C1 127
*C2 120
*C3 87
*C4 52

;DECLARACAO DAS REGRAS DE CRUZAMENTO

:C1 = D1 P1 G1
:C1 = D1 P1 G2
:C1 = D1 P2 G1
:C1 = D1 P2 G2
:C1 = D2 P1 G1
:C1 = D2 P1 G2
:C1 = D2 P2 G1
:C1 = D2 P2 G2
:C2 = D3 P1 G1
:C2 = D3 P1 G2
:C2 = D3 P2 G1
:C2 = D3 P2 G2
:C3 = D1 P4 G1
:C3 = D1 P4 G2
:C3 = D2 P4 G1
:C3 = D2 P4 G2
:C3 = D3 P4 G1
:C3 = D3 P4 G2
:C3 = D4 P1 G1
:C3 = D4 P1 G2
:C3 = D4 P2 G1
:C3 = D4 P2 G2
:C3 = D4 P4 G1
:C3 = D4 P4 G2
:C2 = D1 P1 G3
:C2 = D1 P2 G3
:C3 = D1 P4 G3
:C4 = D1 P3 G1
:C4 = D1 P3 G2

:C4 = D1 P3 G3
:C2 = D2 P1 G3
:C2 = D2 P2 G3
:C3 = D2 P4 G3
:C2 = D2 P3 G1
:C2 = D2 P3 G2
:C2 = D2 P3 G3
:C2 = D3 P1 G3
:C2 = D3 P2 G3
:C3 = D3 P4 G3
:C2 = D3 P3 G1
:C2 = D3 P3 G2
:C2 = D3 P3 G3
:C3 = D4 P1 G3
:C3 = D4 P2 G3
:C3 = D4 P4 G3
:C3 = D4 P3 G1
:C3 = D4 P3 G2
:C3 = D4 P3 G3

;ARQUIVO DE REGRAS - REGRA 6

;AREAS URBANAS 1975 X AREAS RESTRICAO AO USO URBANO (PI-75XR)

;DECLARACAO DOS PIS DE ENTRADA

#AU75 U ; PI area urbana em 1975
#RUU R ; PI areas com restricao ao uso urbano

;DECLARACAO DAS CLASSES PI RESULTADO

*C1 127 ;areas com menor numero de restricao a ocupacao urbana
*C2 9 ;areas problematicas a ocupacao urbana
*C3 87 ;areas com maior restricao a ocupacao urbana
*C4 112 ;areas improprias ao uso urbano

;REGRAS

:C1 = U1 R1
:C1 = U2 R1
:C2 = U1 R2
:C2 = U2 R2
:C3 = U1 R3
:C3 = U2 R3
:C4 = U1 R4
:C4 = U2 R4

;ARQUIVO DE REGRAS - REGRA 7

;AREAS URBANAS 1993 X AREAS RESTRICAO AO USO URBANO (PI-93XR)

;DECLARACAO DOS PIS DE ENTRADA

#AU93 U ; PI area urbana em 1993
#REU R ; PI areas com restricao ao uso urbano

;DECLARACAO DAS CLASSES PI RESULTADO

*C1 127 ;areas com menor numero de restricao a ocupacao urbana
*C2 9 ;areas problematicas a ocupacao urbana
*C3 87 ;areas com maior restricao a ocupacao urbana
*C4 112 ;areas improprias ao uso urbano

;REGRAS

:C1 = U1 R1
:C1 = U2 R1
:C2 = U1 R2
:C2 = U2 R2
:C3 = U1 R3
:C3 = U2 R3
:C4 = U1 R4
:C4 = U2 R4

;ARQUIVO DE REGRAS - REGRA 8

;AREAS COM PROBABILIDADE DE OCORRENCIA DE EVENTOS PERIGOSOS (PI-EVP)

;DECLARACAO DOS PIS DE ENTRADA

#erlm E ; PI suscetibilidade preliminar a erosao laminar
#inu I ; PI inundacao
#RUU R ; PI restricao ao uso urbano

;DECLARACAO DAS CLASSES PI RESULTADO

*C1 112 ;erosao laminar muito alta
;E4 E15 E16
*C2 57 ;erosao laminar alta
;E2 E3 E8 E13 E14
*C3 4 ; area inundavel I1
*C4 35 ; area impropria ao uso urbano

;REGRAS

:C1 = E4 ° I1 ° R4
:C1 = E15 ° I1 ° R4
:C1 = E16 ° I1 ° R4
:C2 = E2 ° I1 ° R4
:C2 = E3 ° I1 ° R4
:C2 = E8 ° I1 ° R4
:C2 = E13 ° I1 ° R4
:C2 = E14 ° I1 ° R4
:C3 = I1
:C4 = R4 ° I1

;prioridades estabelecidas para os eventos
;prioridade 1-inundacao
;prioridade 2-area impropria ao uso urbano
;prioridade 3-suscetibilidade a erosao laminar

;ARQUIVO DE REGRAS - REGRA 9

;AREAS DE RISCO EM 1993 (PI-RISC93)

;DECLARACAO DOS PIS DE ENTRADA

#EVP E ; PI probabilidade de ocorrencia de eventos perigosos
#AU93 U ; PI area urbana 1993

;DECLARACAO DAS CLASSES PI RESULTADO

*C1 112 ;risco de erosao laminar muito alta
*C2 116 ;risco de erosao laminar alta
*C3 4 ;risco de inundacao
*C4 35 ;risco de recalques nas edificacoes

;REGRAS

:C1 = E1 U1
:C1 = E1 U2
:C2 = E2 U1
:C2 = E2 U2
:C3 = E3 U1
:C3 = E3 U2
:C4 = E4 U1
:C4 = E4 U2

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, V.M.B. de & PEREIRA, M.N. 1989. Uso de características texturais na classificação digital de áreas urbanas. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 4., Bariloche, Argentina, 19-24 nov., 1989. t.1, p.401-13.
- ANJOS, R.S.A.dos 1993. Modelagem da dinâmica espacial urbana no Distrito Federal do Brasil utilizando produtos de sensoriamento remoto e recursos de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, PR. 10-14 maio, 1993. *Anais*. Curitiba. v.1, p.7-15.
- ALVES, R.A.; LAPOLLI, E.M.; FRANZONI, A.M.B. & LUZ, V.J.P. 1993. Integração de imagens multiespectral e pancromática SPOT visando ao estudo de áreas urbanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, PR. 10-14 maio, 1993. *Anais*. Curitiba. v.1, p.2-6.
- ARNOFF, S. 1991. *Geographic information systems: a management perspective*. WDL Publications. Canada. 294 p.
- BARKER, G. R. 1988. Remote Sensing: the unheralded component of geographic information systems. *Photogrammetric Engineering and remote sensing*. v.54. n.2, p. 195-99.
- BARROS, M.S.S.; BIANCO, D. D. & NETTO, O.B.Jr. 1982. Sensoriamento remoto na análise da evolução espaço-temporal da estrutura urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2., Brasília, DF, 10-14 maio, 1982. *Anais*. Brasília, DF, UnB. v.3, p.897-903.
- BARROS, M.S.S. & OLIVEIRA, M.de L.N.de. 1982. Dados de sensoriamento remoto na implementação de modelos urbanos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2., Brasília, DF, 10-14 maio, 1982. *Anais*. Brasília, DF, UnB. v.3, p.905-9.
- BOWKER, D.E.; DAVIS, R.E.; MYRICK, D.L.; STACY, K. & JONES, W.T. 1985. Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies. Hampton (NASA REFERENCE PUBLICATION 1139) 1985.

- BRUIJN, C. A. 1991. Spatial factors in urban growth: towards GIS models for cities in developing countries. *ITC Journal*. 4.
- BURROUGH, P.A. 1986. Principles of geographical information systems for land resources assesment. London: Clarendon Press, 1986. 193 p.
- CÂMARA NETO, G. & ERTHAL, G.J. 1987. Integração de modelos relacionais em sistemas geográficos de informação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE BANCO DE DADOS, 2., Porto Alegre, RS, 7-8 maio, 1987. *Anais*. Porto Alegre, PGCC/UFRGS. p.39-48.
- CAMPANA, N. A. 1992. *Estimação de parâmetros físicos de bacias utilizando técnicas de sensoriamento remoto e o sistema de informações geográficas*. Porto Alegre. UFRGS. 1992. Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA APLICADA AO PLANEJAMENTO NA GRANDE SÃO PAULO. Guia de utilização. Carta de Aptidão Física ao Assentamento Urbano. 1986. SICCT, IPT, SNN, EMPLASA. São Paulo.
- CECCATO, V.A.; FORESTI, C.& KURKDJIAN, M.L. 1993. Proposta metodológica para avaliação da qualidade de vida urbana a partir de dados convencionais e de sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas (SIG) e de um banco de dados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, PR. 10-14 maio, 1993 . *Anais*. Curitiba. v.1, p.32-39.
- COELHO, D. & PITANGA, J.F.S. 1982. Evolução do uso e cobertura do solo da cidade do Rio de Janeiro - 1972-1980. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2., Brasília, DF. 10-14 maio, 1982. *Anais*. Brasília. v.3, p. 863-67.
- COSTA, S.M.F. & FORESTI, C. 1989. Seleção das melhores bandas TM para a delimitação de áreas urbanas: o caso de São José dos Campos, São Paulo. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE PERCEPCION REMOTA,4., Bariloche, Argentina, 19-24 nov., 1989. t1, p. 359-67.
- COSTA, S.M. F. & SILVA, E.A. 1993. Urbanização da área metropolitana de Belo Horizonte - o monitoramento do crescimento urbano através do sistema de informações geográficas SGI/INPE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, PR. 10-14 maio, 1993 . *Anais*. Curitiba. v.1, p.41-46.
- CRÓSTA, A.P. 1992. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. UNICAMP, Campinas, SP. 1992. 170 p.

- CURRAN, P.J. 1985. Principles of Remote Sensing. Longman, London.
- DIAS, W.R. & TEIXEIRA, J.D. 1991. Sistemas de informações geográficas aplicados ao gerenciamento de pequenos municípios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., São Paulo, SP, 28 jul.-02 ago., 1991. *Anais*. São Paulo. v.3, p. 614-16.
- DUTRA, L.V. & MENESES, P.R. 1986. Aplicação da transformação IHS para realce de cores em imagens LANDSAT. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1., Gramado, RS, 10-15 ago., 1986. *Anais*. v.1, p.675-81.
- EHLERS, M.; JADKOWSKI, M.A.; HOWARD, R.R. & BROSTUEN, D.E. 1990. Application of SPOT data for regional growth analysis and local planning. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. v.56. n.2, p. 175-80.
- ESCADA, M.I.S. & KURKDJIAN, M.de L.N.de O. 1993. Utilização de tecnologia de sensoriamento remoto para o planejamento de espaços livres urbanos de uso coletivo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, PR, 10-14 maio, 1993. *Anais*. Curitiba. v.1, p.48-55.
- ESTES, J. E. 1992. Remote sensing and GIS integration: research needs, status and trends. *ITC Journal*. 1992-1. p. 2-9.
- EXTRAÇÃO MINERAL NA BACIA DO RIO GRAVATAÍ. 1993. Comitê de Gerenciamento da Bacia do Rio Gravataí.
- FELGUEIRAS, C.A. & CÂMARA, G. 1993. Sistema de informações geográficas do INPE. In: Sistema de Informações Geográficas Aplicações na Agricultura. Brasília. 1993. 274 p.
- FORESTI, C. 1986. Avaliação e monitoramento ambiental da expansão urbana do setor oeste da área metropolitana de São Paulo: análise através de dados e técnicas de sensoriamento remoto. Tese de Doutorado. São Paulo. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.
- FORESTI, C. 1987. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo de regiões metropolitanas - o setor oeste da área metropolitana de São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO PLANEJAMENTO MUNICIPAL, Campos do Jordão, SP. 22-23 out., 1987. *Anais*. São Paulo. SP. p.20-31.

- FORESTI, C. 1990. Proposta metodológica para o estudo ambiental e da estruturação do espaço urbano em áreas metropolitanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6., Manaus, AM. 24-29 jun., 1990. *Anais*. v.2, p.336-340.
- FORESTI, C.; FLORENZANO, T.G.; ERTHAL, G.J. & GODOY JR, M. 1989. Integração de dados do satélite spot com um modelo digital de terreno para avaliação de impacto ambiental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 14., Gramado, RS. 21-26 mai., 1989. *Anais*. p.686-89.
- FORESTI, C.; NIERO, M. & SANCHEZ, M.C. 1978. Avaliação do crescimento da área metropolitana de São Paulo, através da análise visual e automática dos dados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1., São José dos Campos, 27-29 nov., 1978. *Anais*. São José dos Campos, INPE. v.1, p.422-35.
- FORSTER, B.C. 1985. An examination of some problems and solutions in monitoring urban areas from satellite platforms. *International Journal of Remote Sensing*, v 6, n.1, p. 139-51.
- FRANÇOZO, M.T.; FREITAS, M.A.R.R. & MELLO, H.M.C.F. 1993. Sensoriamento remoto como fonte de dados para sistemas de informação geográfica aplicados ao transporte e urbanismo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, PR, 10-14 maio, 1993. *Anais*. Curitiba. v.1, p. 62-67.
- GALEMA, M. & GALEMA, M. 1991. Monitoring urban growth using Spot images and aerial photographs. *ITC Journal*, v.2, p.63-9.
- GARCEZ, L.N & ALVAREZ, G.A. 1988. *Hidrologia*. São Paulo. 2 ed. 294 p.
- GOMARASCA, M.A.; BRIVIO, P.A. & PAGNONI, F. 1993. One century of land use changes in the metropolitan area of Milan (Italy). *International Journal of Remote Sensing*, v.14, n.2, p.211-23.
- GOMES, W. & DIAS, L.A.V. 1990. Proposta de um novo método de amostragem para modelos digitais de elevação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6., Manaus, AM. 24-29 jun., 1990. *Anais*. v.3, p.724-731.
- GUPTA, D.M. & MUNSHI, M. K. 1985. Urban change detection and land-use mapping of Delhi. *International Journal of Remote Sensing*, v.6, n.3/4, p.529-34.

- GUPTILL, S.C. 1989. Evaluating geographic information systems technology. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. v.55, n.11, p. 1583-84.
- GUTIÉRREZ, E. Análise de modelos tri-dimensionais de terreno. 1991. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., São Paulo, SP, 28 jul.-02 ago.,1991. *Anais*. São Paulo. v.3, p. 520-524.
- HERZ, R.; BONETTI, J. & CASTRO, J.F.M. 1991. Potencialidades na utilização de sistemas de informações geográfica em estudos de uso do solo e cobertura vegetal de um ambiente costeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., São Paulo, SP, 28 jul.-02 ago.,1991. *Anais*. São Paulo. v.3, p. 587-88.
- IMAGEM GEOSISTEMAS E COMÉRCIO LTDA. 1993. Sistema de Informações Geográficas. Manual de referência.
- INPE. 1980. Curso de treinamento: introdução às técnicas de sensoriamento remoto e aplicações.
- IPT. 1991. MANUAL DE OCUPAÇÃO DE ENCOSTAS. São Paulo. Publicação IPT 1831.
- JENSEN, J.R.; BRYAN, M.L.; FRIEDMAN, S.Z.; HENDERSON, F.M.; HOLZ, R.K.; LINDGREN, D.; TOLL, D.L.; WELCH, R.A. & WRAY, J.R. 1983. Urban/suburban land use analysis. In: ESTES, J.E., ed. *Manual of remote sensing*. 2.ed. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry. v.2, p.1571-666.
- KHORRAM, S.; BROCHKHAUS, J.A. & GERACI, A. 1991. A regional assessment of land-use/land-cover types in sicily with TM data. *International Journal of Remote Sensing*, v.12. n.1, p.69-78.
- KURKDJIAN, M.L.N.O. 1988. Sensoriamento remoto orbital: um instrumento para monitorar o crescimento urbano. São José dos Campos, São Paulo. 1988, p.1-3.
- KURKDJIAN, M.L.N.O. 1990. Integração de dados de diferentes sistemas sensores através da técnica de transformação IHS, visando o estudo da estrutura intra-urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Manaus, AM, 24-29 jun., 1990. *Anais*. v.2, p.331-35.
- KURKDJIAN, M.L.N.O & II, S.S. 1989. Integração de imagem spot multiespectral e aerofoto pancromática para estudo do uso do solo urbano.

- In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, Bariloche, Argentina, 19-24 nov., 1989. t1, p.414-21.
- LAPOLLI, E. M.; ALVES, A.R.; LUZ, V.J.P. & ZARDO, S. M. 1993. Utilização de filtros para o realce de áreas urbanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO,7., Curitiba, PR, 10-14 maio, 1993. *Anais*. Curitiba. v.1, p.75-82.
- LEMONS, R.C. & SANTOS, R.D. 1984. MANUAL DE DESCRIÇÃO E COLETA DE SOLO NO CAMPO. SBCS e SNLCS. 2ª ed. Campinas.
- LO, C.P. 1981. Land use mapping of Hong Kong from LANDSAT images. An evaluation. *Int. J.Remote Sensing*. v.2, n.3, p.231-52.
- LO, C.P. & SHIPMAN, R.L. 1990. A GIS approach to land-use change dynamics detection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. v.56. n.11, p. 1483-91.
- LOCH, C.; KIRCHNER, F.F. & LOCH, R.E.N. 1993. Potencialidades de um sensor aerotransportável em relação a outros sensores mais conhecidos visando o planejamento municipal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7. Curitiba, PR, 10-14 maio, 1993. *Anais*. Curitiba. v.1, p92-98.
- LOPES, L.H.A.; SILVEIRA, R.G. & LOCH,C. 1993. Monitoramento da ocupação do espaço urbano em áreas de preservação permanente: um estudo de caso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO,7., Curitiba, PR, 10-14 maio, 1993. *Anais*. Curitiba. v.1, p.99-104.
- MAHAVIR & GALEMA, M. 1991. Monitoring urban growth using Spot images and aerial photographs. *ITC Journal* 1991-2.
- MACIEL FILHO, C.L. 1989. Experiência de mapeamento geotécnico de Santa Maria. In: COLÓQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS E SUAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL,2. Porto Alegre, RS, 29-30 nov - 1º dez, 1993. Porto Alegre. p.268-87.
- MANSO, A.P.; BARROS, M.S.S. & OLIVEIRA, M.de L.N.de.1978. Determinação da população urbana através de sensoriamento remoto.In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1., São José dos Campos, 27-29 nov., 1978. *Anais*. São José dos Campos, INPE. v.1, p.399-409.

- NAITHANI, K.K. 1990. Can satellite images replace aerial photographs? A photogrammetrist's view. *ITC Journal*, 1990-1, p.29-31.
- NASA. 1982. *The LANDSAT tutorial workbook*. Washington, DC.
- NIERO, M.; FORESTI, C. & LOMBARDO, M.A. 1982. Utilização de dados LANDSAT no monitoramento da expansão urbana da Grande São Paulo, em áreas de proteção aos mananciais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2., Brasília, DF, 10-14 maio, 1982. *Anais*. Brasília, DF, UnB. v.3, p.879-96.
- NOVO, E.M.L.M. 1978. Projeto UTVAP - Análise comparativa entre fotografias aéreas convencionais e imagens do LANDSAT para fins de levantamento do uso da terra. São José dos Campos, INPE, 1978.
- NOVO, E.M.L.M. 1989. Sensoriamento remoto, princípio e aplicações. São José dos Campos. editora Edgard Blucher Ltda. 309 p.
- OLIVEIRA, M.de L. N.de. & BARROS, M.S.S. 1982. Sensoriamento remoto e planejamento urbano: a identificação de setores residenciais prioritários para a localização de equipamentos de uso coletivo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2., Brasília, DF, 10-14 maio, 1982. *Anais*. Brasília, DF, UnB. v.3, p.869-78.
- OLIVEIRA, M.de L.N.de; MANSO, A.P. & BARROS, M.S.S. 1978. Setorização urbana através de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1., São José dos Campos, 27-29 nov., 1978. *Anais*. São José dos Campos, INPE. v.1, p.436-51.
- ORTH, D.M. & SILVEIRA, R.G. 1993. Avaliação da evolução da ocupação do balneário dos Ingleses-Florianópolis/SC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7. Curitiba, PR, 10-14 maio, 1993. *Anais*. Curitiba. v.1, p.119-28.
- PAREDES, E. A. 1991. Sistema de informação geográfica-urbano aplicado à administração e ao planejamento urbano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., São Paulo, SP, 28 jul.-02 ago., 1991. *Anais*. São Paulo. v.3, p. 598-606.
- PAREDES, E. A. 1991. Metodologia de implantação do sig-urbano em pequenas e médias prefeituras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., São Paulo, SP, 28 jul.-02 ago., 1991. *Anais*. São Paulo. v.3, p. 563-74.

- PAREDES, E. A. 1991. Metodologia de implantação do sig-urbano em pequenas e médias prefeituras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., São Paulo, SP, 28 jul.-02 ago.,1991. *Anais.* São Paulo. v.3, p. 563-74.
- PEREIRA, M.N; KURKDJIAN, M.L.N & SAMPAIO, B.O. 1987. Mapeamento do uso da terra do município de São José dos Campos por sensoriamento remoto, como subsídio para elaboração do seu P.D.D.I. In: ENCONTRO NACIONAL DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO PLANEJAMENTO MUNICIPAL. Campos do Jordão, SP, 22-23 out.,1987. *Anais.* São Paulo. SP. p.1-31.
- POHLMANN,J.P; VALENTE, A.L.S & LAHM, R.A. 1994. Delta do Jacuí - análise da evolução da área de ocupação urbana através de imagens orbitais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO. Florianópolis, SC, 7-10. ago, 1994. *Anais.* SC. p.11-14.
- PRANDINI, F.L. & NAKAZAWA, V.A. 1993. Parcelamento de solos urbanos: algumas lições em áreas com restrições de uso. In: FORUM NACIONAL SOBRE GEOLOGIA DE MEIO URBANO. 1993. p.92-104.
- PROGRAMA TÉCNICO PARA O GERENCIAMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE - PROTEGER 1994. SÉRIE GATE. Fundação de Planejamento Metropolitano e Regional (METROPLAN) e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).
- RICHARDS, J.A. 1986. *Remote sensing digital image analysis - an introduction.* 281p.
- RISSO, A. 1993. *Obtenção e manipulação dos parâmetros da equação universal de perdas de solos através de técnicas de geoprocessamento.* Porto Alegre: UFRGS - Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Curso de Pós-graduação de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.
- RODRIGUES, R.M.; MOREIRA, J.C. & VEADO, R.W. 1990. Análise da qualidade ambiental da bacia da Lagoa da Conceição-Florianópolis - SC com aplicação das técnicas de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6., 24-29 jun., 1990. v.2. *Anais.* Manaus, p.350-58.
- RODRIGUES, R.M. & QUINTANILHA, J.A. 1991. A seleção de software SIG para gestão urbana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., São Paulo, SP, 28 jul. - 02 ago.,1991. *Anais.* São Paulo. v.3, p. 513-19.

- RODRIGUES, R.M.; MOREIRA, J.C.; LAPOLLI, E.M.; ZARDO, S.M. & VIEIRA, V.F. 1991. Utilização do sistema de informações geográficas (SIGs) no mapeamento do uso do solo - lagoa da Conceição, Florianópolis/SC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., São Paulo, SP, 28 jul.-02 ago., 1991. *Anais*. São Paulo. v.3, p. 617-18.
- ROSA, F.S. 1987. A fotografia aérea como instrumento de planejamento municipal e regional - a área metropolitana de São Paulo-SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO PLANEJAMENTO MUNICIPAL, Campos do Jordão, SP. 22-23 out., 1987. *Anais*. São Paulo. SP. p.263-79.
- ROSA, ROBERTO. 1992. *Introdução ao sensoriamento remoto*. Uberlândia. Editora da UFU. 109 p.
- SALOMÃO, F.X.T. 1992. Erosão e a ocupação rural e urbana. 3º. Curso de Geologia de Engenharia Aplicada a Problemas Ambientais. IPT. São Paulo.
- SANO, E.E.; ASSAD, E.D.; MOREIRA, L. & MACEDO, J. 1993. Estruturação de dados geoambientais no contexto de fazenda experimental. In: *Sistema de Informações Geográficas. Aplicações na Agricultura*. Brasília. DF. EMBRAPA/ CPAC. 274p.
- SCHOWENGERDT, R.A. 1983. *Techniques for image processing and classification in remote sensing*. New York. Academic Press.
- SLATER, P.N. 1980. *Remote sensing. optics and optical systems*. Reading. Addison-Wesley.
- SHORT, N.M. 1982. *The landsat tutorial workbook. Scientific and Technical Information Branch. National Aeronautics and Space Administration 1982*. Washington, DC.
- SILVA, J. & SOUZA, M. 1988. *Análise Ambiental*. Rio de Janeiro. Editora da UFRJ.
- SILVA, M.V.M.; GREVE, P.G.; MARIANTE, G. & SILVA, P.F.P. 1992. Bacia do Arroio Feijó - Proposta de Saneamento.
- SIMÕES, M. & MOURA, H. 1989. Modelo digital de terreno como base cartográfica e suas aplicações em projetos de engenharia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 14., Gramado, RS. 21-26 mai., 1989. v.2. *Anais*. p.441-49.

- STAR, J. & ESTES, J. 1990. *Geographic information systems*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.
- STEFEN, C.A. & MORAES, E.C. 1993. Introdução à radiometria.
- SWAIN, P.H. & DAVIS, S.M. 1978. *Remote sensing: the quantitative Approach*. New York, McGraw-Hill. 1978. 396 p.
- TOLL, D.L. 1985. Analysis of digital LANDSAT MSS and SEASAT SAR data for use in discriminating land cover at the urban fringe of Denver, Colorado *International Journal of Remote Sensing*. v.6, n.7, p.1209-29.
- TREITZ, P.M.; HOWARTH, P. J. & GONG, P. 1992. Application of satellite and GIS technologies for land-cover and land-use mapping at the rural-urban fringe: a case study. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. v.58, n.4, p. 439-48.
- VIEIRA, I.M. & KURKDJIAN, M.L.N.O. 1993. Integração de dados de expansão urbana e dados geotécnicos como subsídio ao estabelecimento de critérios de ocupação em áreas urbanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7. Curitiba, PR, 10-14 maio, 1993. *Anais*. Curitiba. v.1, p.163-171.
- VIEIRA, I.M.; CANDEIAS, A.L.B.; SANTOS, A.C & HAMBURGER, D.S. 1990. Utilização de processamento digital de imagens na análise e monitoramento da expansão urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6., 24-29 jun., 1990. v.2. *Anais*. Manaus, p.395-403.
- WEBER, C. & HIRSCH, J. 1992. Some urban measurements from SPOT data: urban life quality indices. *International Journal of Remote Sensing*. v.13, n.17, p.3251-261.
- WELCH, R. 1982. Spatial resolution requirements for urban studies. *International Journal of Remote Sensing*. v.3, p.147-61.
- ZUQUETE, L. 1994. Metodologia de áreas de risco. 2ª Semana de Recursos Naturais da RMPA. Porto Alegre. RS.