

*Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Departamento Engenharia Civil e Ambiental - ENC
Pós-Graduação em Geotecnia*

MODELAGEM DE PREVISÃO DE EVOLUÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS

Giulliano Renato Molinero

Orientador: Prof. Newton Moreira de Souza, DSc

Brasília/DF, Maio de 2007

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

MODELAGEM DE PREVISÃO DE EVOLUÇÃO DE PROCESSOS
EROSIVOS

GIULLIANO RENATO MOLINERO

TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

Newton Moreira de Souza, DSc, UnB

José Camapum de Carvalho, PhD, UnB

André Pacheco de Assis, PhD, UnB

Adelaida Pallavicini Fonseca, DSc, UnB

Joaquim Pedro Soares Neto, DSc, UNEB

FICHA CATALOGRÁFICA

MOLINERO, GIULLIANO RENATO

Modelagem de Previsão de Evolução de Processos Erosivos.

xix, 162 p, 210x297 mm. (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2007).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Erosões

2. Geoprocessamento

I. ENC/FT/UnB

3. Geoestatística

4. Análise Espacial

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOLINERO, Giulliano Renato (2007). Modelagem de Previsão de Processos Erosivos. Brasília. Tese de Doutorado, Publicação GTD-046/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 162 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Giulliano Renato Molinero

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Modelagem de Previsão de Evolução de Processos Erosivos.

GRAU: Doutor

ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Giulliano Renato Molinero

Rua 08, Chácara 186, casa 16. Bairro Vicente Pires

(34) 3397-2076 / 8406-0841

CEP. 72110-800 – Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela possibilidade de concretizar o sonho de haver realizado o curso de Doutorado em Geotecnia pela UnB.

Ao meu filho Giulliano Júnior, a razão de tudo isto, a pessoa que é a razão da minha vida, que me motivou cada segundo para não desistir dessa jornada, agradeço por estar presente na minha vida.

Aos meus pais Januário Molinero e Maria Inês, sou grato pela vida e pelos ensinamentos, especialmente a perseverança, a honestidade, a dignidade.

Agradeço também aos meus irmãos, Giovanni, Waleska e Vanessa o apoio em várias etapas de minha vida pessoal, me dando força para continuar firme no propósito de concluir este trabalho.

Meu obrigado a Regina que, em todos esses anos, tem me dado tanto apoio, compreensão e carinho. Agradeço ainda pela ajuda nos trabalhos de campo.

Agradecimentos especiais:

- Ao professor Newton, pessoa ímpar, pelos ensinamentos, orientação, paciência, apoio e incentivo em todos os momentos, me auxiliando a vencer cada desafio.
- Ao professor Feitosa (in memorian) que, como sempre digo a todos, foi o anjo que me trouxe para a Geotecnia.
- Ao professor Camapum pelo apoio e auxílio especialmente com as imagens de satélite.
- Ao professor André pelo exemplo que procurei seguir como educador da disciplina de Estatística.
- A professora Adelaida pelo apoio, incentivo e dicas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.
- Aos demais professores da pós-graduação em Geotecnia, pelos conhecimentos transmitidos.
- Aos laboratoristas Oswaldo e Wilton pelo apoio nos trabalhos de laboratório.
- Ao amigo e companheiro Kleber pelo apoio em campo.

- Ao CNPQ pelo apoio financeiro, disponibilizado pelo programa Pronex, na aquisição das imagens de satélite quickbird.

Agradeço também aos colegas de turma, especialmente ao Joaquim Neto, ao João Carlos, ao Petrócio, a Aline, a Elidiane, a Karoline, ao Adriano, ao Gregório e ao Diego pelo convívio, amizade e troca de experiências e conhecimentos.

RESUMO

MODELAGEM DE PREVISÃO DE EVOLUÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS

Este trabalho apresenta uma proposta metodológica para o desenvolvimento de modelagem para previsão de evolução de processos erosivos ao longo de rodovias. No desenvolvimento da pesquisa foram estudadas as rodovias BR-060, BR-080, DF-220, e DF-290. Para tanto, inicialmente foi desenvolvida uma modelagem determinística para a previsão pontual dos processos erosivos localizados às margens das rodovias, com base nas informações obtidas em ensaios com amostras de solos coletados em campo e cartas temáticas obtidas pelo projeto Radam Brasil. Na seqüência essas informações foram aprimoradas a partir da fotointerpretação de imagens de satélite de alta resolução - 0,60 m – Quick Bird aliadas a pesquisas de campo. Assim, as informações contidas nas cartas temáticas do projeto Radam Brasil foram melhor compartmentadas. A partir da modelagem determinística foi desenvolvida uma proposta de espacialização do modelo para trabalhos em escala regional. Para isso as variáveis pontuais (umidade higroscópica e massa específica aparente seca dos solos) foram espacializadas a partir de análises geoestatísticas, pela Krigeagem Ordinária. Como forma de validar as novas modelagens determinística e espacializada outras inspeções de campo foram realizadas para conferência, em campo, dos resultados obtidos pelos modelos. Os modelos encontrados foram validados estatisticamente com uma confiança de 75%.

ABSTRACT

FORECAST MODELLING OF EROSION PROCESSES EVOLUTION

This work shows a methodological proposal for the forecast modelling development of erosive processes evolution along highways. In the development of the research there were studies in the highways BR-060, BR-080, DF-220, and DF-290. For so, initially a deterministic modelling was developed for the punctual forecast of the located erosive processes into the margins of the highways, based in informations obtained thru rehearsals with samples of soils collected in field and thematic letters obtained by the Radam Brasil project. In the sequence those information were improved with the Quick Bird satellite's high resolution images fotointerpretation - 0,60 m - allied to the field research. So, the information contained in the thematic letters of the Radam Brasil project were better compartmented. Starting from the deterministic modeling, the research was developed into proposal the model's spacialization, to be worked in regional scale. For that, the punctual variables (higroscopic humidity and specific apparent mass of the drought soils) were spacialized from geoestatistics analyses, by Ordinary Krigeagem. As a form of validating the new deterministic and spacialized modellings, other field inspections was achieved for checking, in field, the obtained results by the models. The found models were validated statistically with a 75% 's trust.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	03
1.2. JUSTIFICATIVA	07
1.3. HIPÓTESE	09
1.4. OBJETIVO	09
1.5. ESCOPO DA TESE	10
2. PRINCIPAIS TRABALHOS DESENVOLVIDOS NA MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS	11
2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS	11
2.2. PRINCIPAIS MODELAGENS REALIZADAS	13
2.3. MODELAGENS DE PROCESSOS EROSIVOS UTILIZANDO FERRAMENTAS GEOTECNOLÓGICAS E AFINS	15
2.4. MODELAGEM EM ESCALA REGIONAL	19
2.5. A GEOESTATÍSTICA E A MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS	20
3. METODOLOGIA PARA A MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS	27
3.1. LEVANTAMENTO GERAL DE INFORMAÇÕES E DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	27
3.2. SELEÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS	32
3.3. COLETA DE AMOSTRAS E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS AMOSTRADOS	43
3.3.1. Análise do Mapa Temático de Geologia.....	43
3.3.2. Análise do Mapa Temático de Geomorfologia.....	58

3.3.3.	Análise do Mapa Temático de Vegetação.....	59
3.3.4.	Análise do Mapa Temático de Solos.....	59
3.3.5.	Análise do Mapa Temático de Declividade	60
3.4.	DESCRIÇÃO DOS SOLOS COLETADOS	60
3.5.	PROCESSO DE VALIDAÇÃO DAS AMOSTRAS SELECIONADAS	78
3.5.1.	O Ensaio de Absorção de Água	80
3.5.2.	O Ensaio de Perda de Peso por Imersão	81
3.5.3.	Análise dos Resultados Obtidos nos Ensaios	86
4.	MODELAGEM PONTUAL DETERMINISTICA DOS PROCESSOS EROSIVOS	88
4.1.	PRIMEIRA FASE DA MODELAGEM: SELEÇÃO DE VARIÁVEIS	88
4.2.	SEGUNDA FASE DA MODELAGEM: ANÁLISE DE REGRESSÃO – PRIMEIRO MODELO	90
4.3.	TERCEIRA FASE DA MODELAGEM: DETALHAMENTO DAS VARIÁVEIS – SEGUNDO MODELO	93
4.4.	QUARTA FASE DA MODELAGEM: EXPANSÃO DO MODELO 2 PARA TODA A ÁREA DA PESQUISA.....	101
5.	MODELAGEM ESPACIALIZADA DOS PROCESSOS EROSIVOS.	116
5.1.	VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DA ESPACIALIZAÇÃO DE VARIÁVEIS	117
5.2.	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ERROS ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE	126
5.3.	A ESPACIALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS – PROCEDIMENTOS FINAIS	128

6. VALIDAÇÃO DOS MODELOS	135
6.1. VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DETERMINÍSTICA DE PREVISÃO DE PROCESSOS EROSIVOS	136
6.2. VALIDAÇÃO DA MODELAGEM ESPACIALIZADA DE PREVISÃO DE PROCESSOS EROSIVOS	141
7. CONCLUSÕES	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
3.1 - Características gerais dos pontos amostrados	44 a 47
3.2 - Resumo das informações de campo para cada ponto amostrado	61 e 62
4.1 - Análise quanto a presença de <i>Outliers</i> da Amostra (1)	89
4.2 - Valores de Correlações entre as variáveis (1)	90
4.3 - Resultados estatísticos do modelo de regressão linear composta obtido para trinta pontos amostrais.....	92
4.4 - Análise quanto a presença de <i>Outliers</i> na amostra (2)	99
4.5 - Resultados estatísticos do melhor modelo de regressão linear composta obtido para o primeiro trecho da rodovia BR-080	100
4.6 - Variáveis adotadas no modelo de previsão de erosão	112
4.7 - Análise quanto a presença de <i>Outliers</i> na amostra (3)	113
4.8 - Valores de correlações entre as variáveis (2)	113
4.9 - Resultados estatísticos do melhor modelo de regressão obtido no estudo	114
5.1 - Tipos de solos e umidade higroscópica para pontos amostrados nas rodovias BR-060 / DF-290	117
5.2 - Valores de escores Z em função da significância (α) e dos graus de liberdade	131
5.3 - Resultados da análise bidimensional para dados estimados por geoestatística e dados reais obtidos em laboratório	132
6.1 - Valores dos parâmetros utilizados para a validação da modelagem determinística de propensão a processos erosivos	140

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 - Voçoroca localizada na BR-070, próximo a cidade de Brazlândia - DF.....	05
1.2 - Erosão localizada na BR-080, próximo à cidade de Brazlândia – DF.....	06
1.3 - Erosão localizada às margens da BR-080, próximo à DF-220.....	06
1.4 - Erosão localizada na BR-060, próximo ao Rio Areias - GO.....	08
1.5 - Erosão localizada às margens da BR-080, próximo à cidade de Santo Antônio do Descoberto - DF.....	08
2.1 - Principais componentes da variação espacial	23
3.1 - Área inventariada para o desenvolvimento dos estudos	29
3.2 - Detalhe da primeira subárea de estudos	30
3.3 - Detalhe da segunda subárea de estudos	31
3.4 - Região de estudo pelo satélite sino-brasileiro CBERS 2	33
3.5 - Detalhe da região de estudo pelo satélite americano Landsat 7	34
3.6 - Detalhe de ponto de coleta em erosão em imagem quickbird em alta resolução	35
3.7 - Detalhes de ponto de coleta sem erosão em are de empréstimo em imagem quickbird em alta resolução	36
3.8 - Detalhes de ponto de coleta em erosão e Entroncamento BR-080 com DF-290 em imagem quickbird em alta resolução	37
3.9 - Detalhes de ponto de coleta em erosão e estradas vicinais na DF-290 em imagem quickbird em alta resolução	38
3.10 - Detalhes de ponto de coleta em erosão e geomorfologia na entrada da cidade do Gama/DF na DF-290 em imagem quickbird em alta resolução	39
3.11 - Detalhes de ponto de coleta sem erosão e lago na BR-080 em imagem quickbird em alta resolução	40
3.12 - Detalhes de ponto de coleta sem erosão próximo a cidade de Brazlândia às margens da BR-080 em imagem quickbird em alta resolução.....	41
3.13 - Detalhe de ponto de coleta em erosão em área de empréstimo às margens da DF-220 em imagem quickbird em alta resolução	42

3.14 - Carta geológica da área de estudo nas rodovias BR-080 e DF-220 com base no Projeto Radam Brasil	48
3.15 - Carta geológica da área de estudo nas rodovias BR-060 e DF-290 com base no Projeto Radam Brasil.....	49
3.16 - Carta geomorfológica da área de estudo nas rodovias BR-080 e DF-220 com base no Projeto Radam Brasil	50
3.17 - Carta geomorfológica da área de estudo nas rodovias BR-060 e DF-290 com base no Projeto Radam Brasil.....	51
3.18 - Carta de vegetação da área de estudo nas rodovias BR-080 e DF-220 com base no Projeto Radam Brasil	52
3.19 - Carta de vegetação da área de estudo nas rodovias BR-060 e DF-290 com base no Projeto Radam Brasil	53
3.20 - Carta de solos da área de estudo nas rodovias BR-080 e DF-220 com base no Projeto Radam Brasil	54
3.21 - Carta de solos da área de estudo nas rodovias BR-060 e DF-290 com base no Projeto Radam Brasil.....	55
3.22 - Carta de precipitação e declividade da área de estudo nas rodovias BR-080 e DF-220 com base no Projeto Radam Brasil	56
3.23 - Carta de precipitação e declividade da área de estudo nas rodovias BR-060 e DF-290 com base no Projeto Radam Brasil.....	57
3.24 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 01 – DF-220	63
3.25 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 02 – DF-220	63
3.26 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 03 – DF-220	64
3.27 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 04 – DF-220	64
3.28 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 05 – DF-220	65
3.29 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 06 – DF-220	65
3.30 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 07 – DF-220	66
3.31 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 08 – DF-220	66
3.32 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 09 – DF-220	67
3.33 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 10 – DF-220	67
3.34 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 11 – DF-220	68
3.35 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 12 – DF-220	68
3.36 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 13 – DF-220	69
3.37 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 14 – DF-220	69

3.38 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 15 – DF-220	70
3.39 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 16 – DF-220	70
3.40 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 17 – DF-220	71
3.41 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 18 – DF-220	71
3.42 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 19 – DF-220	72
3.43 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 20 – DF-220	72
3.44 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 21 – DF-220	73
3.45 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 22 – DF-220	73
3.46 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 23 – DF-220	74
3.47 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 24 – DF-220	74
3.48 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 25 – DF-220	75
3.49 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 26 – DF-220	75
3.50 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 27 – DF-220	76
3.51 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 28 – DF-220	76
3.52 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 29 – DF-220	77
3.53 - Detalhe do ponto de coleta da amostra 30 – DF-220	77
3.54 - Detalhe de extração de amostra indeformada no campo	79
3.55 - Detalhe do equipamento utilizado no ensaio de absorção	80
3.56 - Detalhe da água atingindo o topo da amostra	81
3.57 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo para o solo 02	82
3.58 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo para o solo 03	82
3.59 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo para o solo 06	83
3.60 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo para o solo 08	83
3.61 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo para o solo 09	84
3.62 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo para o solo 22	84
3.63 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo para o solo 24	85

3.64 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo para o solo 25	85
3.65 - Gráfico proposto por Nogami e Villibor (1979) – Índice de Absorção de Água x Porcentagem de Perda por Imersão	87
3.66 - Gráfico proposto por Pejon (1992) – Índice de Absorção de Água x Porcentagem de Perda por Imersão	87
4.1 - Carta de Geologia do trecho compreendido entre a DF-205 e a cidade de Brazlândia - DF, na BR-080	94
4.2 - Carta de Geomorfologia do trecho compreendido entre a DF-205 e a cidade de Brazlândia – DF, na BR-080.....	95
4.3 - Carta de Ocupação do Solo do trecho compreendido entre a DF-205 e a cidade de Brazlândia – DF, na BR-080.....	96
4.4 - Carta de Solos do trecho compreendido entre a DF-205 e a cidade de Brazlândia DF, na BR-080.....	97
4.5 - Carta de Declividade do trecho compreendido entre a DF-205 e a cidade de Brazlândia – DF, na BR-080.....	98
4.6 - Carta de Geologia da área de estudos – BR-080 – DF - 220	102
4.7 - Carta de Geologia da área de estudos – BR-060 – DF - 290	103
4.8 - Carta de Geomorfologia da área de estudos – BR-080 – DF - 220.....	104
4.9 - Carta de Geomorfologia da área de estudos – BR-060 – DF - 290.....	105
4.10 - Carta de Uso dos Solos da área de estudos – BR-080 – DF - 220.....	106
4.11 - Carta de Uso dos Solos da área de estudos – BR-060 – DF - 290.....	107
4.12 - Carta de Solos da área de estudos – BR-080 – DF - 220.....	108
4.13 - Carta de Solos da área de estudos – BR-060 – DF - 290.....	109
4.14 - Carta de Declividade da área de estudos – BR-080 – DF - 220.....	110
4.15 - Carta de Declividade da área de estudos – BR-060 – DF - 290.....	111
5.1 - Carta de propensão a processos erosivos nas rodovias BR-080 / DF-220	118
5.2 - Carta de propensão a processos erosivos nas rodovias BR-060 / DF-290	119
5.3 - Estatísticas Descritivas - dados amostrais de Umidade Higroscópica - BR-060	121
5.4 - Histograma dos dados amostrais de Umidade Higroscópica - BR-060	121
5.5 - Dados amostrais normalizados de Umidade Higroscópica – BR-060	122

5.6 - Semivariogramas para 0, 45, 90 e 135° dos dados de Umidade Higroscópica – BR-060	122
5.7 - Parâmetros Estruturais para composição do modelo de Krigagem para 0°	123
5.8 - Parâmetros Estruturais para composição do modelo de Krigagem para 45°	124
5.9 - Parâmetros Estruturais para composição do modelo de Krigagem para 90°	124
5.10 - Parâmetros Estruturais para composição do modelo de Krigagem para 135°	125
5.11 - Parâmetros Estruturais da modelagem final da variável Umidade Higroscópica para a BR-060	125
5.12 - Distribuição espacial do “Erro”	126
5.13 - Estatísticas do “Erro”	126
5.14 - Histograma do “Erro”	127
5.15 - Diagrama de valores observados x estimados	127
5.16 - Parâmetros finais para a Krigagem da variável Umidade Higroscópica	128
5.17 - Carta espacializada de Umidade Higroscópica (W hig) para trecho da rodovias BR-080	130
5.18 - Carta de propensão a processos erosivos nas rodovias BR-080 – DF-220 (2)	133
5.19 - Carta de propensão a processos erosivos nas rodovias BR-060 – DF-290 (2)	134
6.1 - Detalhe dos pontos de coleta na BR-060 para validação do modelo estudado	136
6.2 - Detalhe do ponto de coleta 31 (em local sem a presença de processos erosivos)	137
6.3 - Detalhe do ponto de coleta 32 (em local com a presença de processos erosivos)	137
6.4 - Carta de geologia do trecho de validação do modelo proposto de análise de propensão a processos erosivos	138
6.5 - Carta de solos do trecho de validação do modelo proposto de análise de propensão a processos erosivos	139
6.6 - Carta de declividade do trecho de validação do modelo proposto de análise de propensão a processos erosivos	139
6.7 - Detalhe de pontos nas coordenadas S 16° 06' 41,87" e W 48° 18' 20,97"	141
6.8 - Visão geral da área de coordenadas S 16° 06' 41,87" e W 48° 18' 20,97"	142
6.9 - Visão geral do trecho sem erosão – coord. S 16° 06' 41,87" e W 48° 18' 20,97"	142
6.10 - Visão geral do trecho com erosão – coord. S 16° 06' 41,87" e W 48° 18' 20,97"	143
6.11 - Detalhe de pontos nas coordenadas S 16° 02' 37,10" e W 48° 15' 26,29"	143
6.12 - Visão geral do trecho de transição com e sem presença de processos erosivos. Coordenadas S 16° 02' 37,10" e W 48° 15' 26,29"	144

6.13 - Detalhe de pontos nas coordenadas S 16° 00' 48,70" e W 48° 09' 52,94"	144
6.14 - Visão geral da área de coordenadas S 16° 00' 48,70" e W 48° 09' 52,94"	145
6.15 - Visão geral do trecho sem erosão – coord. S 16° 00' 48,70" e W 48° 09' 52,94"	145
6.16 - Visão geral do trecho com erosão – coord. S 16° 00' 48,70" e W 48° 09' 52,94"	146
6.17 - Detalhe de pontos nas coordenadas S 16° 01' 28,87" e W 48° 05' 34,82"	146
6.18 - Visão geral da área de coordenadas S 16° 01' 28,87" e W 48° 05' 34,82"	147
6.19 - Visão geral do trecho sem erosão – coord. S 16° 01' 28,87" e W 48° 05' 34,82"	147
6.20 - Visão geral do trecho com erosão – coord. S 16° 01' 28,87" e W 48° 05' 34,82"	148
6.21 - Detalhe de pontos nas coordenadas S 15° 33' 36,03" e W 48° 11' 48,61"	148
6.22 - Visão geral da área de coordenadas S 15° 33' 36,03" e W 48° 11' 48,61"	149
6.23 - Visão geral do trecho sem erosão – coord. S 15° 33' 36,03" e W 48° 11' 48,61"	149
6.24 - Visão geral do trecho com erosão – coord. S 15° 33' 36,03" e W 48° 11' 48,61"	150
6.25 - Detalhe de pontos nas coordenadas S 15° 36' 18,62" e W 48° 11' 53,66"	150
6.26 - Visão geral do trecho de transição com e sem presença de processos erosivos. Coordenadas S 15° 36' 18,62" e W 48° 11' 53,66"	151

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ap – Alta Plasticidade
at – Alta
bp – Baixa Plasticidade
BR – Brasil (Rodovia Federal)
bx - Baixa
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagens
DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura em Transportes
DNPM – Departamento Nacional de Proteção Mineral
DF – Distrito Federal
EUPS – Equação Universal de Perda de Solos
GO – Goiás
H₂O – Água
IP – Índice de Plasticidade
KCl – Cloreto de Potássio
km – Quilômetro
L – Leste
ld – Lado Direito
lde – Lados Direito e Esquerdo
le – Lado Esquerdo
LEGAL – Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
Ln – Logaritmo Natural
m – Metro
m² - Metro Quadrado
ma - Muito Alta
MCT – Miniatura, compactado, tropical
MG – Minas Gerais
mp – Média Plasticidade
N – Norte
np – Não Plástico
USLE - Universal Soil Loss Equation

S – Sul

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

W – Oeste

WEPP - Water Erosion Prediction Project

w_{hig} – Umidade Higroscópica

w_L – Limite de Liquidez

w – Umidade Natural

w_p – Limite de Plasticidade

ρ – Massa Especifica Real dos Grãos

\wedge - Potenciação

1 - INTRODUÇÃO

A forma como a superfície terrestre se apresenta é resultado da atuação das forças da natureza assim como da influência de ações humanas. Os fenômenos naturais e também os artificiais, criados pelo homem, provocam constantes alterações no perfil da crosta terrestre. Em consequência da atuação, tanto do homem, como da natureza, sobre a superfície terrestre é que surgem os processos geodinâmicos no solo. Para os processos provocados pela natureza têm-se os que se manifestam internamente, como os vulcões e os terremotos ou os que se apresentam externamente, como a erosão, os escorregamentos de massas, as quedas de blocos e a sedimentação. Já para os processos provocados pelo homem podem-se evidenciar de forma superficial, as erosões e sedimentações.

Os fenômenos naturais e artificiais, em determinadas condições, podem refletir em uma maior ou menor alteração na dinâmica e no perfil da crosta terrestre.

Assim, a erosão, processo geodinâmico que ocorre nos solos, e objeto de estudo desta pesquisa, é mais ou menos intensa em uma área a partir da combinação de alguns fatores como relevo local, formação geológica, volume de água existente na região, tanto superficial (em função da precipitação) quanto em sua subsuperfície (em função do nível freático), conjugados na grande maioria das vezes com a ação do homem naquele local.

Atualmente, devido ao processo de expansão da população e conseqüente necessidade de incremento nas dimensões das áreas urbanas, que na maioria das vezes é feita de maneira não planejada, com a destruição da vegetação local, por exemplo, que protege os solos dos agentes erosivos, processos de dinâmica externa, principalmente os de erosão têm se intensificado.

Por outro lado, o desenvolvimento econômico diferenciado entre as regiões do país provoca a necessidade de deslocamentos entre estas regiões no sentido do transporte de insumos e produtos industrializados. Desta maneira, vias têm de ser construídas para a acessibilidade tanto desses produtos, como de pessoas. Dentro dessa ótica vale ressaltar que as ligações entre cidades, através das rodovias, são implantadas sem o devido cuidado com o meio ambiente ao seu redor, influenciando ainda mais nos fatores responsáveis pelas erosões.

Assim, na medida em que o homem ocupa cada vez mais novas áreas verdes sem o devido planejamento, para realizar suas atividades sociais e econômicas, tem-se verificado que o impacto sobre o meio ambiente tem sido forte e em alguns casos irreversíveis. A ocupação inadequada do uso do solo gera uma série de problemas de toda ordem, dentre eles têm-se os problemas geotécnicos. A erosão é um desses problemas, que sempre traz consigo prejuízos à sociedade, sejam esses econômicos, sociais ou ambientais. Por exemplo, uma situação bastante preocupante para os especialistas da área de geotecnia é a erosão às margens dos leitos estradais, onde, principalmente no período chuvoso compromete os corredores rodoviários de transportes.

Com o intuito de solucionar esses problemas alguns especialistas, entre eles engenheiros civis, agrônomos e geotécnicos desenvolveram estudos para caracterizar os processos erosivos, de forma que pudessem ser implementadas ações nas áreas de pesquisas antes da evolução dessas erosões. Entretanto, a abordagem desses trabalhos sempre está relacionada a dois pontos básicos: a previsão dos processos erosivos ocorre de forma pontual, ou de maneira regional, não apresentando um paralelo entre as duas situações. Da mesma forma as modelagens conhecidas partem sempre de parâmetros e características dos solos estabelecidas de forma pontual e direta, como, por exemplo: coesão, ângulo de atrito, umidades natural e higroscópica, índice de absorção de água, permeabilidade, ou, por outro lado, partem somente de dados espacializados como as cartas de solos, geologia, geomorfologia, ocupação do solo, relevo, topografia, etc.

Procurando contribuir com o problema de previsão de processos erosivos nesta pesquisa foram desenvolvidos dois modelos de previsão propondo, para isso, uma metodologia diferenciada onde os parâmetros utilizados são obtidos de duas formas. No primeiro caso, os parâmetros ligados diretamente aos processos erosivos relacionados à permeabilidade e a desagregação dos solos, ou seja, a umidade higroscópica e a massa específica aparente seca dos solos foram obtidas em laboratório a partir da coleta pontual de amostras deformadas. Depois de haver sido realizado um estudo prévio de levantamento de campo, em um segundo momento, informações relacionadas indiretamente aos processos erosivos, como a geologia, geomorfologia, declividade, uso e ocupação dos solos e tipo de solos foram estabelecidas para a área de estudo.

Entretanto, a grande contribuição desta pesquisa está na busca de alcançar melhor qualidade nas informações das cartas temáticas que inicialmente foram obtidas em escala de 1:1.000.000 (Projeto Radam Brasil) sendo utilizada, para isso, a técnica da fotointerpretação, ou fotoleitura, de imagens de satélite de alta resolução como balizador para a compartimentação dessas informações.

A partir dos dados pontuais de umidade higroscópica e massa específica aparente seca e ainda com a definição de pesos em função da representatividade de cada uma das classes temáticas de cada uma das cartas de geologia, geomorfologia, declividade, ocupação e tipo de solos sobre o surgimento, ou não, de processos erosivos nos solos, um modelo determinístico é estabelecido para a determinação da probabilidade de surgimento de processos erosivos em qualquer ponto da região de estudo.

Por outro lado com a espacialização dos dados pontuais de umidade higroscópica e massa específica aparente seca dos solos, utilizando-se de ferramentas de geoprocessamento validadas por processo geoestatístico, uma modelagem regional, com definição de classes de propensão de surgimento de processos erosivos, também é determinada. Para tanto é importante ressaltar que os dados das cartas temáticas de geologia, geomorfologia, declividade, uso e ocupação e tipo de solos são pré-determinados a partir da compartimentação de suas informações com o auxílio da fotointerpretação das imagens de satélite de alta resolução.

1.1 - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Define-se erosão como sendo o processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou de fragmentos e partículas de rochas, pela ação combinada da gravidade com a da água, do vento, do gelo ou de organismos vivos (plantas e animais) (Salomão e Iwasa, 1995).

Em geral, de acordo com Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998), distinguem-se duas formas de abordagem para os processos erosivos: erosão natural ou geológica, que se desenvolve em condições de equilíbrio com a formação do solo e erosão acelerada ou antrópica, cuja intensidade é superior à da formação do solo, não permitindo a sua recuperação natural.

Como verificou Bellinazzi Jr. et al. (1991), no Brasil praticamente a única forma significativa de erosão é a hídrica, já que os demais agentes atmosféricos (vento, gelo e organismos vivos), com potencial erosivo, pouca importância apresentam.

Esse processo de erosão no solo é deflagrado pelas chuvas e compreende os seguintes mecanismos (Infanti Jr. e Fornasari Filho, 1998): “impacto das chuvas, que provoca a desagregação das partículas; remoção e transporte pelo escoamento superficial, e deposição dos sedimentos produzidos, formando depósitos de assoreamento”. Esse processo pode ser chamado de inumação.

Dependendo da forma destes escoamentos superficiais podem surgir erosões laminares ou lineares. As laminares, ou em lençol, são causadas pelo escoamento difuso das águas das chuvas, resultando na remoção progressiva e uniforme dos horizontes superficiais do solo. Já as erosões lineares são causadas pela concentração das linhas de fluxo das águas e escoamento superficial, resultando em pequenas incisões na superfície do terreno, em forma de sulcos, que pode evoluir, por aprofundamento, para ravinas.

Quando uma erosão é causada não só por águas superficiais, mas também por influência dos fluxos d'água subsuperficiais, ou seja, quando a erosão atinge o nível freático, surge o processo mais conhecido por voçoroca (Figura 1.1), com a possibilidade de desenvolvimento da erosão interna ou entubamento (piping). A voçoroca é palco de diversos fenômenos: erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamentos, que se conjugam e conferem a esse tipo erosão características de rápida evolução e elevado poder destrutivo (Salomão e Iwasa, 1995).

Para D'Agostini (1999), o problema científico de erosão certamente não receberia a ampla atenção que desperta, seja ao agricultor, ao técnico ou ao governante, se dissociado das implicações de sua ocorrência, especialmente das econômicas muito mais que as ambientais. Isso se deve ao fato que as erosões culminam em processos de destruição das áreas onde se localiza, prejudicando a região tanto economicamente como ambientalmente. Desta maneira grandes áreas podem ser atingidas.



Figura 1.1 - Voçoroca localizada na BR-070, próximo a cidade de Brazlândia - DF

Neste trabalho, as atenções são voltadas para os processos erosivos junto às rodovias, já que muitas erosões são encontradas próximas a elas. Este fato ocorre principalmente devido à falta de conservação e manutenção rodoviárias adequadas.

As rodovias federais brasileiras, após sua construção nas décadas de 60 e 70, não foram conservadas de maneira preventiva e, em sua grande maioria, nunca passaram por processo de restauração. O que ocorre, às vezes, são incursões corretivas, executadas somente após o surgimento de problemas estruturais, como as erosões, por exemplo. As obras de recuperação desses problemas estruturais às vezes têm suas execuções dificultadas, devido aos altos custos de recuperação e ao processo burocrático do Governo Federal para a liberação de recursos financeiros para a execução desses serviços. Desta forma, torna-se bastante comum a percepção de processos erosivos nas margens das rodovias brasileiras (Figura 1.2 e 1.3).



Figura 1.2 - Erosão localizada na BR-080, próximo à cidade de Brazlândia – DF



Figura 1.3 - Erosão localizada às margens da BR-080, próximo à DF-220

1.2 - JUSTIFICATIVA

Várias regiões brasileiras, especialmente aquelas que se desenvolveram em áreas de planaltos, como grande parte do centro-oeste brasileiro, apresentam-se em regiões com relevos caracterizados por grandes diferenças altimétricas. Em consequência disso os acessos entre estas localidades, na maioria dos casos, também são construídos ao longo desses terrenos. Estas estradas, assim instaladas, muitas vezes em terrenos de baixa resistência à erosão, quando não protegidas, por vegetação ou pavimentação, têm o processo erosivo rapidamente iniciado. Estas ravinas, não raro, se transformam em voçorocas, principalmente quando interceptam o nível freático.

Com o conseqüentemente alargamento e evolução remontante dessas erosões, quase sempre, o resultado é a destruição dessas rodovias. Na maioria dos casos mesmo quando as águas são conduzidas por sistemas apropriados, o problema surge no ponto de lançamento onde muitas vezes encontram-se estruturas inadequadas para o lançamento das águas captadas pelo sistema de drenagem. Com o incremento das chuvas e o aumento da vazão e do nível freático, os processos erosivos a jusante são extremamente acelerados, provocando avanços nas erosões como um todo. Estes processos colocam em risco a segurança e a economia de pessoas assim como das próprias obras públicas.

Outra questão verificada na grande maioria das rodovias brasileiras é a situação dos taludes de cortes e aterros, que são executados segundo as normas do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagens - DNER, hoje Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes - DNIT, sem nenhum cuidado adicional com suas inclinações em função do comportamento geotécnico do maciço. Assim, as diferenciações de resistência do solo à erosão em função da sua formação geológica, por exemplo, quase sempre, não são levadas em consideração no dimensionamento das inclinações de taludes de cortes e aterros. Desta forma, os fluxos, muitas vezes concentrados, de água nesses taludes com alta declividade e grandes extensões de rampas, associados a solos de baixa resistência, culminam com surgimento de processos erosivos nesses locais. (Figura 1.4).

Essas erosões acabam prejudicando o funcionamento da rodovia já que detritos são lançados sobre a mesma e sobre os dispositivos de drenagem (Figura 1.5). Em consequência percebem-se ainda os prejuízos ambientes de tais fenômenos.



Figura 1.4 - Erosão localizada na BR-060, próximo ao Rio Areias – GO



Figura 1.5 - Erosão localizada às margens da BR-080, próximo à cidade de Santo Antônio do Descoberto - DF

1.3 - HIPÓTESE

As erosões, com certeza, trazem prejuízos à sociedade, podendo ser financeiros, quando recursos são necessários para a recomposição de obras destruídas pelas erosões; ambientais, quando sedimentos provenientes dos processos erosivos provocam o assoreamento em rios, lagos, lagoas e igarapés e, finalmente, de tempo, quando os processos erosivos provocam a interrupção parcial ou total de rodovias, obrigando seus usuários a utilizar desvios que, por sua vez, provocam incrementos nas distâncias a serem percorridas para se atingir determinado destino o que, conseqüentemente, aumenta os custos operacionais, além de outras externalidades (acidentes, alta de preços nos produtos no mercado consumidor, engarrafamentos, etc.) de difícil quantificação.

Dessa forma, a hipótese a ser discutida neste trabalho é a de que, a partir de um levantamento dos processos erosivos localizados em uma região de estudo, considerando suas características geológicas, geomorfológicas, de vegetação, uso e tipo de solos, e ainda com o fundamental auxílio de imagens de satélite de alta resolução para a aperfeiçoamento dessas informações através da fotointerpretação, pode-se determinar, com o emprego de ferramentas de geoprocessamento validadas por geoestatística, um modelo de previsão de evolução destes processos e com isso elaborar um plano estratégico de diretrizes de conservação de rodovias que possam ser implementadas antes da ruína total das mesmas provocada pelas erosões.

1.4 - OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo principal desenvolver uma modelagem de previsão capaz de identificar o provável surgimento ou evolução dos processos erosivos nas áreas de influência de estradas. A proposta da metodologia aqui apresentada poderá subsidiar os órgãos gestores das rodovias brasileiras na criação de planos de conservação das áreas de influência de estradas, no sentido de interceder em trechos críticos, antes da ocorrência dos desastres geotécnicos e ecológicos ligados à erosão. Essas ações trarão ganhos consideráveis a todos os setores da economia já que os recursos que seriam gastos na recuperação dessas áreas e na reconstrução das estradas poderão ser alocados em outros programas de Governo.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- a) Entender o comportamento dos solos, tanto na presença como na ausência de processos erosivos identificando os principais fatores que caracterizam a presença, ou não, da erosão nos solos;
- b) Desenvolver um modelo matemático determinístico de previsão de erosões;
- c) Expandir o modelo determinístico de previsão de erosão em escala regional ao longo dos eixos estradais das rodovias, em função dos parâmetros que afetam diretamente a mesma.

1.5 - ESCOPO DA TESE

Este trabalho está dividido em seis capítulos. Neste primeiro capítulo foram apresentados, além da introdução, a caracterização do problema, a hipótese a ser tratada e os objetivos do estudo. No segundo capítulo são destacadas as referências bibliográficas que serviram de subsídio para o desenvolvimento deste trabalho. No terceiro capítulo são apresentados os materiais e a metodologia aplicada na pesquisa. No quarto capítulo apresenta-se o desenvolvimento do trabalho no sentido de se alcançar as modelagens pontual e regionalizada dos processos erosivos. No quinto capítulo é apresentada uma análise dos resultados alcançados na modelagem proposta. No sexto capítulo detalham-se as conclusões alcançadas diante dos procedimentos adotados no desenvolvimento da pesquisa e as propostas para futuras pesquisas a partir do estudo ora desenvolvido.

2 - PRINCIPAIS TRABALHOS DESENVOLVIDOS NA MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS

Vários trabalhos já foram apresentados no sentido de modelar os processos erosivos. Outros tantos tentaram mostrar quais são os principais fatores que afetam, diretamente ou não, esses processos.

Dessa forma pode-se identificar a existência de vários modelos de previsão de processos erosivos. Cada qual parte de uma premissa diferente. Alguns modelos levam em consideração parâmetros dos solos. Outros consideram as características físicas da região como fatores que influenciam os processos erosivos. Alguns modelos analisam a erosão sob um prisma localizado, outros procuram caracterizá-la de forma mais regional. A proposta do presente trabalho é considerar, ao mesmo tempo, as características físicas das regiões analisadas (cartas de solos, geologia, geomorfologia, ocupação e declividade) assim como os parâmetros dos solos relacionados a sua umidade assim como a sua destacabilidade e transportabilidade, com o objetivo de caracterizar a erosão tanto pontualmente, como de forma regionalizada.

Para o desenvolvimento desse trabalho ora apresentado, que busca unir esses dois tipos de informações citadas sendo as características físicas da região objeto do estudo e os parâmetros dos solos dessas regiões, as ferramentas de geoprocessamento e geoestatística passam a ser fundamentais a fim de se atingir o êxito nas análises.

2.1 - CARACTERIZAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS

Silva (1991) caracterizou a evolução geomorfológica de canais do médio Vale do Paraíba do Sul analisando os solos da região com base em sua micromorfologia e de resultados de raios-X. Concluiu que os solos arenosos e areno-siltosos da região eram os responsáveis pelos eventos de erosão pois não apresentavam características de resistência devido a serem esses solos imaturos, comprovada pela identificação de seus teores de feldspato.

Já Ito (1998), estudando a erosão relacionada aos talhões para plantação de eucaliptos na microbacia hidrográfica do Rio Itupeva, estabeleceu um novo sistema de talhamento a fim de minimizar a degradação dos solos.

Ramalho (1999) desenvolveu uma análise a partir de pesquisa amostral de campo, com 115 amostras para uma área de aproximadamente 1000 km², com o objetivo de caracterizar a evolução dos processos erosivos em solos arenosos entre os municípios de Natal e Parnamirim, no Rio Grande do Norte. Constatou a natureza dos processos erosivos existentes na região, comparando-os com as características dos elementos do clima regional e com as propriedades físicas e químicas dos solos.

Uma proposta de mapeamento de risco para áreas sujeitas a processos erosivos, tendo como base um estudo de caso para a região de Cubatão - SP foi desenvolvida por Nalon (2000). No trabalho o autor estudou cerca de 100 pontos amostrais em uma área de 10.706,9 ha. A partir de mapas temáticos de solos, cobertura vegetal e índice pluviométrico gerou um modelo estatístico multivariado, através de uma função linear para definir um mapa de risco de acidentes geotécnicos em cinco níveis. Para a sua área de estudo constatou que 44,4% da área apresentou potencial a riscos geotécnicos muito baixo, 10,2% baixo, 9,3% médio, 12,9% alto e 12,7% muito alto.

Utilizando o ambiente do programa SPRING, Ribeiro (2002) estabeleceu um mapa de vulnerabilidade à erosão na região do Rio Pardo, na cidade de Pardinho (SP). Para tanto, utilizou mapas de solos, topografia, geologia, geomorfologia e dados de precipitação local. Determinou, com o auxílio de imagens do satélite Landsat 7, pesos para cada um dos mapas em cada uma das áreas analisadas em termos de vulnerabilidade à erosão. Concluiu que pouco mais de $\frac{3}{4}$ de sua área de estudo apresentou grau de vulnerabilidade moderadamente estável.

Seguindo outra metodologia, Ribeiro (2004), com o auxílio do programa Arc View, trabalhou na região da microbacia do Rio Granjeiro, no município de Crato (CE), com o objetivo de mapear as classes de susceptibilidade natural aos processos erosivos superficiais. Para o desenvolvimento do trabalho partiu de mapas temáticos desenvolvidos em função de parâmetros relacionados à concentração e rapidez de fluxos das águas, assim como das características dos materiais constituintes da superfície (unidades de vertente, forma da encosta, declividades e erodibilidade dos materiais superficiais). Identificou cinco classes de susceptibilidade. Argumentou sobre a influência das mudanças no uso-ocupação do solo sobre a dinâmica desses sistemas.

2.2 - PRINCIPAIS MODELAGENS REALIZADAS

Talvez, o trabalho que tenha apresentado a maior penetração mundial seja o estudo desenvolvido pela National Runoff and Soil Loss Data Center em cooperação com a Purdue University. Trata-se da “universal soil loss equation” (USLE) ou equação universal de perda de solo (EUPS). A USLE utiliza o princípio da sobreposição dos efeitos e fornece o peso de material seco erodido por unidade de superfície de solo. Entretanto, as tabelas de valores estabelecidas pelo modelo foram obtidas em condições particulares dos Estados Unidos: clima, culturas e tipos de solos. Esta é a maior limitação dessa equação, caso se queira aplicá-la em outros países como no caso do Brasil. Os dados, a partir dos quais se construiu a USLE, foram obtidos em trechos de terrenos com características padronizadas. Assim, verifica-se que quanto mais afastada dessas condições se encontrar a situação em estudo maiores serão os erros por extrapolação. Vários autores brasileiros procuraram mostrar essa situação, como Fernandez (1996), Gameiro (1997), Castro da Cruz (2003) e Cruz (2004). Importante destacar ainda que essa metodologia teve como base o estudo em erosões laminares.

Nesse sentido, o serviço de estudos para a agricultura (ARS) dos Estados Unidos, juntamente com o departamento federal de agricultura (USDA) desenvolveu uma nova modelagem para a previsão de processos erosivos para aplicação específica na área denominado water erosion prediction Project – WEPP, a fim de substituir a USLE como principal meio de cálculo de perda de solo.

Na elaboração do WEPP o USDA decidiu adotar o modelo sulco/laminar de previsão da erosão, separando assim esses componentes, ao contrário da USLE. Outras vantagens do WEPP sobre a USLE seriam a aplicação a uma maior variedade de climas e uma melhor consideração da topografia, mudanças sazonais no desenvolvimento das culturas, tipo de solo e cobertura vegetal.

Entretanto, Machado et al. (2004) compararam resultados teóricos do WEPP com experimentos desenvolvidos em algumas estradas vicinais da cidade de Agudos (SP). Concluíram que o modelo adotado no Brasil pelo WEPP não se encontra devidamente calibrado para as nossas condições, produzindo resultados de perdas de massa, em média, 167% acima dos valores observados nos experimentos.

Acredita-se que a disparidade encontrada entre a previsão do modelo americano WEPP e os valores encontrados em ensaios desenvolvidos por Machado et al. (2004) está relacionada à não considerações das características específicas, relacionadas aos solos lateríticos, encontrados nos solos tropicais brasileiros.

Dessa forma, vários autores nacionais tentaram formular um modelo, adaptado as condições brasileiras, de previsão de processos erosivos. Quase todos adotaram metodologia empírica na tentativa de caracterizar a erodibilidade em taludes. Entre esses trabalhos destacam-se os estudos de Meireles (1967), Santos & Castro (1966 e 1967), Philipponat (1973), Nascimento & Castro (1974), Nogami & Villibor (1979) e Villibor et al. (1986).

Araújo (1994) determinou um modelo para a determinação do que chamou de índice geral de erodibilidade de solos tropicais. Seu estudo procurava caracterizar as áreas potenciais de risco à erosão em obras rodoviárias.

Weill (1999) utilizou a metodologia da USLE para diagnosticar a erosão do solo e a avaliação do seu impacto sobre a degradação das terras na microbacia do Ceveiro em Piracicaba-SP. Estabeleceu o índice de tempo de vida dos solos com base nas taxas estimadas de perda de solo. Concluiu que, para a região analisada, mantido o sistema de manejo da cultura de cana-de-açúcar na bacia, a erosão acelerada deverá levar a exaustão da fertilidade do solo, em cerca de 80% da área da cana, em até 20 anos.

Bastos (1999) estabeleceu um modelo para previsão de processos erosivos a partir do teor de finos, da plasticidade, dos parâmetros do modelo USLE e da classificação expedita MCT. O modelo, estabelecido para a identificação de erosão hídrica por fluxo contínuo superficial concentrado, foi calibrado para solos da região metropolitana de Porto Alegre-RS.

Como destaca Pejon (1992), nenhum desses métodos conseguiu uma identificação total dos materiais erodíveis. Entretanto, observou-se que, para a maioria dos autores, os fatores de desagregabilidade e de absorção de água são muito importantes na análise de propensão a erodibilidade nos solos.

Dentre os modelos citados, Pejon (1992), destacou ainda que o critério proposto por Nogami e Villibor (1979) apresentava uma série de vantagens, tais como: utilização de amostras

indeformadas, consideração do efeito da secagem, possibilidade de inferir nas propriedades de desagregabilidade e infiltração, facilidade e rapidez de execução e a não necessidade de equipamentos sofisticados.

Entretanto, após trabalhar, em laboratório, com 56 amostras de solos, Pejon (1992) identificou alguns problemas no modelo de Nogami e Villibor (1979). Esses problemas estariam relacionados à incompatibilidade de resultados em análises de solos que apresentavam altos teores de matéria orgânica que formavam, em conseqüência, grumos estáveis, resultando em altas forças superficiais, principalmente em materiais finos, dificultando o processo erosivo. Verificou ainda que alguns materiais se apresentavam pouco evoluídos, apesar do comportamento de alta erodibilidade nos taludes analisados em campo.

Assim, Pejon (1992) propôs uma correção ao modelo apresentado por Nogami e Villibor (1979). Este modelo, estabelecido por Pejon, tem se mostrado bastante eficiente na identificação pontual de processos erosivos. A modelagem proposta por Pejon (1992) foi utilizada neste trabalho com o objetivo de confirmar se solos que estavam localizados em pontos com presença de erosão apresentavam esta mesma resposta a partir do modelo proposto pelo autor. A expectativa era de que outros fatores pudessem estar interferindo de forma direta na origem e propagação dos processos erosivos.

2.3 - MODELAGENS DE PROCESSOS EROSIVOS UTILIZANDO FERRAMENTAS GEOTECNOLÓGICAS E AFINS

Por geoprocessamento entende-se como o conjunto de procedimentos computacionais que permitem a interpretação de mapas temáticos que, face à facilidade que se tem na sua visualização e manipulação de dados que integram esses mapas, possibilita a utilização desses dados numa forma prática e precisa. (Barros, 1996). A função principal das ferramentas de geoprocessamento é a facilidade em armazenar, trabalhar, recuperar e analisar mapas num ambiente computacional.

Devido a estas características, essa tecnologia tem sido amplamente utilizada em trabalhos onde se quer estudar a variação espacial, ou geográfica de um fenômeno. Câmara & Medeiros (1998) relatam que o geoprocessamento tem influenciado de maneira crescente as áreas de

cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional.

Lamparelli et al. (2001) destacam que o acompanhamento e o gerenciamento de um grande volume de informações, que variam no espaço e no tempo, são fundamentais para se atingir o máximo de rendimento de acordo com as potencialidades do solo com o mínimo de degradação. Assim, a variabilidade espacial de características de uma região como geologia, geomorfologia, índice de precipitação, cobertura vegetal, forma de relevo, podem ser facilmente analisadas com os recursos do geoprocessamento. Esta tecnologia permite, ainda, comparar estes indicadores com a distribuição geográfica das erosões, por exemplo.

Campos (2001) enfatizou a utilização de geoprocessamento como ferramenta atual, com grande potencial para adquirir dados, gerenciar, analisar e apresentar resultados na análise de mapas temáticos. Demonstrou que é possível relacionar os vazios urbanos (lotes urbanos) com a infra-estrutura implantada (redes viária, de drenagem pluvial, de abastecimento de água, de esgoto sanitário, de energia elétrica e o sistema de coleta de lixo), o relevo e a proximidade de áreas de proteção ambiental, constituindo esses fatores como indicadores da prioridade à ocupação de lotes vazios. Conclui que o mapa temático da hierarquização de lotes prioritários à ocupação desenvolvido no trabalho, assim como a metodologia empregada no modelo proposto pode contribuir, de forma eficaz, com o planejamento urbano e ambiental.

Holanda (1996) trabalhou em, aproximadamente, 120 km², no município de Limoeiro do Norte, no estado do Ceará. Utilizou fotografias aéreas para a obtenção de dados referentes à vegetação, rede de drenagem e uso do solo. O inventário obtido a partir da análise desses dados serviu para a geração e composição das respectivas cartas temáticas. Para confirmar as informações estabelecidas nas cartas temáticas foram escolhidos e pesquisados dez pontos amostrais. No comparativo entre as informações realizadas no campo e na fotointerpretação foi possível, em alguns casos, a construção de uma base complementar de informações que permitiu um enriquecimento e ampliação no acervo das informações existente, demonstrando a importância do trabalho de campo na pesquisa. A fotointerpretação com os trabalhos de campo resultou em mapas temáticos de drenagem, unidades pedológicas e uso dos solos.

Nascimento (1997), investigou as técnicas de segmentação e classificação por regiões e avaliou suas utilizações para o mapeamento de unidades de paisagem na Amazônia. O

trabalho foi desenvolvido a partir das bandas originais de imagens do satélite LANDSAT. Trabalhando com combinações diferenciadas para as bandas de imagens disponíveis o autor levantou informações sobre componentes de vegetação e solos. Assim, com o auxílio do programa SPRING conseguiu estabelecer um mapeamento em unidades, em escala regional, da paisagem da Amazônia.

Soares (1998) a partir das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para obtenção de informações georreferenciadas de cartas de geologia, geomorfologia, climatologia, hidrologia, solos, vegetação e uso da terra estabeleceu as relações de interdependência entre esses diversos componentes geoambientais. Com isso sugeriu algumas opções de adequação de uso para cada unidade geosistêmica, com o propósito de determinar suas necessidades de manejo e conservação e a sua tolerância as intervenções antrópicas.

Já Valente (1999) demonstrou a importância das ferramentas de geoprocessamento como contribuição básica na distribuição espacial de parâmetros geotécnicos para estudos geotécnicos. Com a utilização de modelagem digital do terreno, definição em cartas temáticas de áreas inundáveis e manchas urbanas e ainda com dados descritivos sobre o meio físico e parâmetros geotécnicos obtidos em campo de forma georreferenciada e experimentados em laboratório produziu mapas de aptidão dos solos para diferentes usos, assim como definiu regiões consideradas de risco geotécnico.

Visando contribuir com os estudos de avaliação dos principais problemas relacionados a degradação ambiental Santos (1999) com base nos atributos dos solos (tipo de solo, ocupação) assim como observações de campo, identificou e caracterizou os principais problemas relacionados à degradação ambiental na área de estudo da região administrativa da cidade de Guaratiba no Rio de Janeiro. Assim, delimitou quatro classes de área para uso: área para preservação ambiental com 25,8 km², áreas agricultáveis com 5,6 km², áreas urbanizáveis com 11,0 e 5,0 km² para uso ou urbano ou agrícola.

Na região do município de Palmas, em área de, aproximadamente, 1863 km², no Estado do Tocantins, Santos (2000) desenvolveu uma série de informações, através de cartas temáticas, para o planejamento regional do uso e ocupação do solo e aproveitamento sustentável dos recursos naturais do município em estudo. Para tanto utilizou mapas temáticos de unidades litoestratigráficas, microbacias hidrográficas, declividades, cobertura e uso da terra, unidades

de materiais inconsolidados e carta de espessura de materiais inconsolidados. Utilizou, ainda, técnicas de interpretação de imagens de sensoriamento remoto e geoprocessamento para o cruzamento das informações estudadas.

Franzoni (2000) empregou técnicas de sensoriamento remoto na compartimentação de áreas com características fisiográficas homólogas. Com isso identificou os fatores geotécnicos que condicionam os estudos de traçado de rodovias, para fins de planejamento ambiental. O trabalho foi desenvolvido a partir de imagens do satélite LANDSAT 5-TM para a região da Ilha de Santa Catarina.

Em outra linha de trabalho, ligada a compartimentação dos solos, destaca-se o trabalho desenvolvido por Vasconcelos (2001). A autora estabeleceu mapas de suscetibilidades de solos colapsíveis e expansivos do estado de Pernambuco. Definiu 24 diferentes locais para confirmação, em campo, das informações obtidas dos mapas temáticos de geologia, pedologia e clima que foi relacionada com o processo de variação de volume devido a mudança do teor de umidade do solo. Estabeleceu, como conclusão do trabalho, que 61% dos solos superficiais do estado de Pernambuco tem suscetibilidade de média a alta de serem colapsíveis e 70% de serem expansivos.

Com a utilização de imagens do satélite LANDSAT-5/TM e visitas de campo para identificação de áreas degradadas na região da cidade de Sousa, na Paraíba, Araújo (2002), a partir do emprego de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, no ambiente do programa SPRING, identificou áreas com nível de degradação muito grave, que chamou de “núcleos de desertificação”, localizados em locais de exploração de recursos naturais no semi-árido. Estabeleceu ainda outras quatro categorias de degradação ambiental com suas respectivas percentagens da área do município: degradação grave, 39%; degradação moderada, 37%; degradação baixa, 18%; degradação muito baixa, 4%.

Marino (2004) utilizando o programa SPRING promoveu o georreferenciamento de mapas temáticos de geologia, geomorfologia, climatologia, hidrologia, solos, vegetação e uso da terra, a partir de técnicas de sensoriamento remoto o geoprocessamento, com base em imagens de satélite LANDSAT-TM, no município de Aquiraz, na região metropolitana de Fortaleza, no estado do Ceará. Como complemento de informações levantou dados bibliográficos e de campo visando o reconhecimento da realidade ambiental, texturais,

morfoscópicas e de teor de carbono e cálcio na área de estudo. Com as informações concluiu que na região existe o predomínio de áreas classificadas como de transição com tendência à estabilidade e vulnerabilidade moderada aos processos erosivos naturais (69,7%), seguidas por ambientes de transição com tendência a instabilidade e vulnerabilidade moderada (19,23%), ambientes estáveis com vulnerabilidade alta (8,5%), e, finalmente, ambientes fortemente instáveis com vulnerabilidade muito alta (0,2%).

Outro trabalho de mapeamento regional, agora voltado a identificação de trechos susceptíveis a escorregamento e quedas de blocos foi desenvolvido por Saito (2004) na região do maciço central de Florianópolis, no estado de Santa Catarina. A concepção do mapa de risco a cada um desses problemas geotécnicos foi estabelecida com base em mapas temáticos de declividade, geologia, geomorfologia, formação superficial, forma de vertentes e uso do solo, os quais foram elaborados mediante fotointerpretação. Para a classificação hierárquica das áreas suscetíveis aos escorregamentos – nula, baixa, moderada, alta, muito alta e crítica e para as quedas de blocos – crítica e muito alta, foram atribuídos pesos diferenciados para cada mapa temático. Com isso foram definidas as cartas temáticas para cada um dos acidentes geotécnicos estudados.

2.4 - MODELAGEM EM ESCALA REGIONAL

Entretanto, para trabalhos em escala regional, faz-se necessário o uso de ferramentas e/ ou modelos de previsão de processos erosivos em extensas áreas. Para essas determinações os modelos pontuais devem ser expandidos, a fim de se alcançar resultados satisfatórios.

Nesse sentido alguns autores apresentaram trabalhos tentando a caracterização, em escala regional, de áreas com propensão a processos erosivos. Dentre esses trabalhos pode-se destacar:

Ruhoff et. al. (2002) que avaliam os processos erosivos pela equação universal de perda de solos com uso de algoritmos do SPRING. Para tanto, eles trabalharam na região da bacia hidrográfica do Arroio Marcondes, localizada na região central do Estado do Rio Grande do Sul. Os autores se preocuparam apenas com a modelagem, relacionada aos processos erosivos, no ambiente computacional. Não apresentam discussões relativas a equação

universal de perda dos solos adaptada aos solos brasileiros como discutido por outros autores anteriormente.

Santos & Kobiyama (2002) trabalharam na delimitação de processos erosivos em vertentes localizadas na bacia do Rio Pequeno, na região metropolitana de Santa Catarina, com cerca de 104 km². Utilizaram, na modelagem, as variáveis precipitação de projeto, ângulo interno de fricção dos solos, transmissividade do solo, uma constante ligada a geometria da superfície e a tensão de cisalhamento crítica.

Ranieri (1996) determinou um método qualitativo para planejamento de uso e ocupação dos solos. Apresentou suas críticas ao USLE, provando que o modelo qualitativo se mostrou mais eficiente na determinação de processos erosivos em escala regional. Em seu trabalho desenvolveu, como estudo de caso, mapas de risco de erosão para a bacia hidrográfica do Rio Marins em Piracicaba-SP.

Pejon & Zuquette (1993) trabalharam na carta de potencial de risco à erosão acelerada por escoamento concentrado na folha de Piracicaba. Foram definidas dez classes diferenciadas de potencial de risco à erosão. Essas classes foram definidas em função de atribuição de pesos aos atributos: declividade, litologia, densidade de drenagem e textura, gênese, espessura e índice de erodibilidade dos materiais inconsolidados.

2.5 - A GEOESTATÍSTICA E A MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, além da utilização de ferramentas de geoprocessamento no auxílio a fotointerpretação dos mapas temáticos de geologia, geomorfologia, vegetação, declividade e tipo e uso e ocupação dos solos fez-se necessária a utilização dos conceitos de geoestatística a fim de espacializar variáveis pontuais umidade higroscópica e massa específica aparente seca dos solos amostrados em 30 pontos da região de estudo.

O termo geoestatística é empregado para caracterizar o estudo estatístico de um fenômeno natural. Este, por sua vez, é caracterizado pela distribuição no espaço de uma ou mais variáveis, denominadas de “variáveis regionalizadas” (Journel & Huijbrets, 1978).

A diferença básica entre a estatística clássica e a geoestatística é que a primeira é efetuada com base em valores de amostras independentes espacialmente, enquanto que a segunda requer valores de amostras correlacionadas (dependentes) no espaço. Devido a estas características, a geoestatística pode ser uma ferramenta poderosa para efetuar estimativas e/ou simulações de variáveis em locais não avaliados a partir de pontos próximos já caracterizados.

Segundo Huijbregts (1975) a metodologia da geoestatística proporciona extrair de uma aparente aleatoriedade dos dados coletados, as maiores características estruturais do fenômeno natural assim como uma medida de correlação entre valores, situados numa determinada vizinhança no espaço. Assim, com poucos pontos amostrais referentes a uma variável pode-se, com o auxílio da geoestatística, inferir, com uso de um modelo, características a toda uma região.

Surgem então as variáveis regionalizadas, que são as variáveis que apresentam uma distribuição no espaço, juntamente com um determinado grau de correlação espacial. Várias variáveis utilizadas em geotecnia podem ser consideradas como regionalizadas, como por exemplo: espessura de camadas de solos, profundidade do nível freático, topo de uma formação geológica e até mesmo os parâmetros do solo: coesão (c) e ângulo de atrito (Φ). As variáveis umidade higroscópica e massa específica aparente seca dos solos, utilizadas neste trabalho, não fogem a essa regra.

A teoria das variáveis regionalizadas está fundamentada nos modelos probabilísticos, onde as variáveis são consideradas como a realização única de uma função aleatória (Matheron, 1962). Os principais objetivos desta teoria consistem em avaliar as características estruturais das variáveis regionalizadas e em efetuar estimativas que atenderão aos projetos de engenharia (Struraro, 1993).

Assim, para avaliar a dispersão dos valores de uma variável regionalizada, emprega-se, em geoestatística, a função variograma, que por sua vez calcula os valores da variável $V(x)$ em diversos intervalos de distância e direção de um vetor h . Desta forma, com o auxílio de ferramentas de geoestatística, pode-se caracterizar a dispersão dos valores de cada uma das

varáveis pontuais (dados dos solos) que irão compor o modelo final regionalizado de evolução de processos erosivos às margens de rodovias federais.

A geoestatística é uma ciência nova que foi iniciada com Krige (1951), que trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que somente a informação dada pela variância seria insuficiente para explicar o fenômeno em estudo. Assim, considerou que seria necessário levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surgiu o conceito da geoestatística, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial dos dados analisados. Importante observar duas questões com relação a geoestatística: primeiro, a análise ser desenvolvida para informações que, aparentemente, não têm relação espacial de dependência e, segundo, que a metodologia preconizada por Krige (1951) utiliza pequenas quantidades de dados amostrais para a caracterização de grandes áreas de cobertura.

Matheron (1963, 1971), baseado nas observações de Krige, desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas, a partir dos fundamentos da geoestatística. Segundo Blais e Carlier em 1968, citados por Olea (1975), uma variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples.

A teoria das variáveis regionalizadas pressupõe que a variação de uma variável pode ser expressa pela soma de três componentes (Burrough, 1987): a) uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; e c) um ruído aleatório ou erro residual.

A Figura 2.1 ilustra as três componentes principais da variação espacial. A parte (a) apresenta uma componente determinística que varia abruptamente, enquanto a componente determinística na parte (b) apresenta uma tendência constante. A krigagem, por sua vez, como já citado, é considerada como uma função mais apropriada para a fundamentação da teoria das variáveis regionalizadas.

Inicialmente, o método de krigagem foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, mas seu uso expandiu-se com sucesso no mapeamento de solos (Burgess e Webster, 1980 a, b), mapeamento hidrológico (Kitanidis e Vomvoris, 1983), mapeamento atmosférico (Lajaunie, 1984) e outros campos correlatos.

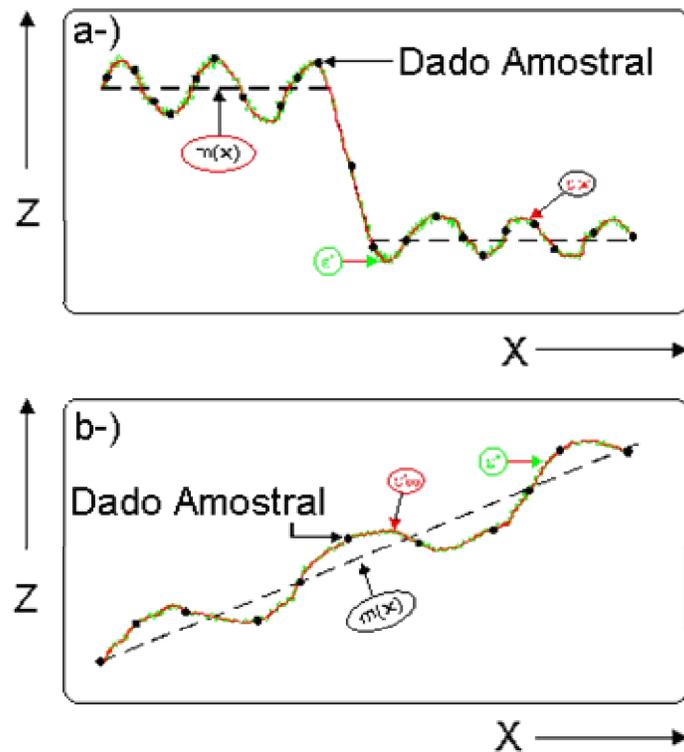


Figura 2.1- Principais componentes da variação espacial (modificado Burrough, 1987)

A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a $1/N$ (N = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que aqui os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima.

Considerando que as cartas das características físicas dos solos já estarão pré-definidas, todas as variáveis propostas para a utilização na modelagem das erosões nesse trabalho estarão espacializadas, pois os parâmetros dos solos, umidade higroscópica e massa específica aparente seca serão espacializadas utilizando os conceitos de geoestatística, com uso da krigagem. Vale ressaltar que as características físicas dos solos de geologia, geomorfologia,

declividade e ocupação e tipo de solos já se encontrarão espacializadas a partir dos mapas temáticos básicos do projeto Radam Brasil aperfeiçoados por informações de campo e pela fotointerpretação decorrente da utilização de imagens de alta resolução do satélite Quick bird.

Assim, dentro do conceito de utilização das ferramentas de geoestatística para a espacialização de informações pontualmente localizadas, dentro de áreas regionalizadas de estudos, podem ser tomados como referência bibliográfica os estudos descritos abaixo:

Assumpção (2004), tentando caracterizar a melhor forma de krigeagem na interpolação para a espacialização de dados pontuais de campo, comprovou que a krigeagem ordinária, que foi utilizada nesta pesquisa, se mostrou como o interpolador mais eficiente para a espacialização de dados de campo.

Analisando a espacialização de atributos químicos do solo Vettorato (2003), utilizando-se de métodos geoestatísticos para a interpolação dos dados de fertilidade, aplicação de fertilizantes com taxas variáveis e produtividade, definiu o planejamento do uso e manejo agrícola para a região de estudo, com 146.568 ha, no município de Botucatu, Estado de São Paulo.

Já Camargo (1997) testou o módulo de geoestatística do programa SPRING, também utilizado neste estudo, num estudo de caso, onde a partir de amostras de solos relacionadas a teor de argila, levantados na região da fazenda Canchim em São Carlos – SP executou interpolações por krigeagem ordinária com a finalidade de obter imagens contínuas da variação do atributo estudado. Obteve resultados expressivos aprovando as técnicas de krigeagem empregadas pelo programa SPRING.

Entretanto Fragomeni (2002) ressaltou que o correto posicionamento dos pontos de amostragens e o uso de técnicas adequadas para a análise espacial são essenciais para a obtenção de resultados adequados à análise da dinâmica e a distribuição geográfica dos atributos do solo. Demonstrou, através de um estudo de caso em uma área de 24 ha, no município de Ernestina, Estado do Rio Grande do Sul a aplicação da tese levantada. O tratamento geoestatístico dos dados de teor de matéria orgânica, argila, CTC, Ca+Mg, AL^{3+} , K, P e pH, permitiu definir a ocorrência de processos de redução de material orgânico e CTC, erosão superficial e alcalinização, ao longo do perfil de solo.

Uma análise em área de grandes dimensões com a utilização de ferramentas de geoestatística foi apresentada por Orsi (2004). No trabalho, o pesquisador mapeou os principais parâmetros pedológicos e ambientais da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés no município de Botucatu, no Estado de São Paulo. Através da utilização da krigeagem ordinária promoveu a espacialização dos parâmetros estudados. Desenvolveu, no estudo, metodologia para fundamentar decisões no planejamento das áreas circunvizinhas do Ribeirão Lavapés com a minimização dos impactos na ocupação de sua bacia.

Ainda dentro de análises geoestatísticas para espacialização de informações de pontos amostrais torna-se importante ressaltar os trabalhos desenvolvidos e validados para grandes áreas geográficas, a partir de quantidade limitada de pontos amostrais. Todos os trabalhos apresentaram resultados satisfatórios.

Assim, Maraschin (2003) trabalhando com 114 amostras de solos georreferenciadas em um talhão comercial de 54 ha da fazenda Pajuçara, no município de Sorriso, no Estado de Mato Grosso, relativas a dados químicos de pH, Ca, Mg, Al, P, K, MO, Zn, Fe, Mn, Cu e a dados físicos de textura do solo e densidade aparente do solo, produziu cartas de necessidade de calagem e conteúdo de matéria orgânica, validando e utilizando em sua análise, apenas os dados espacializados de pH e densidade aparente do solo, respectivamente.

Sturaro (1993) trabalhou com 720 sondagens, em 174 pontos amostrais, na área delimitada pela cidade de Bauru, com cerca de 674 km². No trabalho promoveu a espacialização de informações de SPT alcançadas junto a empresas de sondagem na cidade. A única crítica dos resultados se deu em função dos diferentes padrões de execução do ensaio SPT de cada uma das empresas pesquisadas e não da espacialização obtida com a krigeagem dos pontos amostrais.

Já Silva (2001) trabalhou com 71 amostras extraídas com espaçamento irregular, em área de 200 hectares, correspondentes à extensão Maria Teresa, no perímetro irrigado Senador Nilo Coelho, em Petrolina, no estado de Pernambuco. Os dados levantados nos pontos amostrais foram de pH, matéria orgânica e quantidade de fósforo. Através de análises geoestatísticas, por meio de krigeagem ordinária, foram promovidas as espacializações dos dados analisados na pesquisa.

Pinto (1999), por sua vez, trabalhou com apenas treze pontos de amostragens para a análise de índices pluviométricos para todas as áreas dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Com a coleta de informações amostrais de treze estações pluviométricas localizadas nos dois estados, promoveu uma espacialização dessas informações estabelecendo faixas de intensidade pluviométrica na área de estudo.

Jakob (2002) em sua análise de dados demográficos da malha municipal brasileira de 1997, por meio de krigeagem ordinária para algumas variáveis explicativas do desenvolvimento populacional no Brasil, concluiu que a krigagem, se provou extremamente eficaz na espacialização de dados. Informa ainda que o número mínimo de observações a fim de se alcançar resultados consideráveis é de trinta pontos amostrais. Este estudo utilizou exatamente trinta pontos amostrais.

Finalmente, Quaini (2001) avaliou diversos esquemas de amostragens de atributos físicos para uma região em latossolo vermelho distrófico na fazenda Maggi-3 localizada no município de Itiquira, ao sul de Cuiabá – MT. Para a área de cerca de 300 ha coletou 102 pontos amostrais. O objetivo do trabalho foi determinar a quantidade mínima de pontos amostrais necessários para a espacialização eficiente dos dados dos solos coletados. Conclui que, se a amostragem for definida buscando caracterizar todas as variações possíveis nos atributos presentes em cada carta temática, o número de elementos amostrais pode ser reduzido, mantendo a eficiência da análise. No trabalho, dos 102 pontos amostrados, o autor comprovou que, para a determinação das cartas de resistência do solos a penetração e de macroporosidade, que foram os parâmetros que mais pontos amostrais necessitaram, foram necessários apenas 64 e 44 pontos, respectivamente. Já para a carta de umidade natural do solo a modelagem se mostrou eficiente com apenas três amostras para ser representada a variação espacial de toda a área de estudo.

3 - METODOLOGIA PARA A MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS

A metodologia de trabalho para a elaboração da modelagem dos processos erosivos compreendeu oito etapas:

- a) levantamento geral de informações e definição da área de estudo;
- b) seleção dos pontos amostrais a serem trabalhados;
- c) coleta de amostras e caracterização geotécnica dos solos amostrados;
- d) descrição dos solos coletados nas amostras;
- e) validação das amostras;
- f) modelagem pontual determinística;
- g) modelagem espacializada dos processos erosivos;
- h) validação dos modelos.

As cinco primeiras etapas são apresentadas neste capítulo. A etapa f, que trata da modelagem pontual determinística dos processos erosivos é apresentada no capítulo 4. A etapa g, que demonstra a espacialização da modelagem para previsão dos processos erosivos é apresentada no capítulo 5 e, finalmente, a etapa de validação dos modelos é apresentada no capítulo 6.

3.1 - LEVANTAMENTO GERAL DE INFORMAÇÕES E DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Inicialmente foi definida uma área piloto dentro do Distrito Federal e do estado de Goiás, para promover um inventário geral da possível área de estudo. Desta forma, toda a área foi percorrida e levantamentos de pontos com erosões foram realizados (Figura 3.1). A partir deste inventário, passou-se a realizar o levantamento de material de pesquisa dentro desta macro-área inicialmente definida. Nesta etapa foram levantadas as informações sobre as imagens de satélites citadas no item 3.2, bem como as cartas com as diferentes informações, topográficas, geológicas, geomorfológicas, de hidrologia, relevo, vegetação e solos. Essas informações foram levantadas a partir do Projeto Radam Brasil, do Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. As informações, que se apresentam em pequena escala de detalhe, foram aperfeiçoadas por fotointerpretação das imagens de alta resolução assim como de visitas em campo para conferência de informações. Assim, inicialmente foi definida uma grande área de pesquisa.

Na Figura 3.1 pode-se verificar toda a área inventariada. Desta forma, todos os dados foram cruzados e, finalmente, a área escolhida para ser trabalhada foi definida (trecho em verde na Figura 3.1).

A área delimitada para o estudo foi dividida em duas subáreas sendo a primeira em um trecho de rodovia federal, na BR-060, situado entre o Rio Areias/GO e o entroncamento da DF-290 e a segunda compreendida em um trecho estadual (distrital) partindo do entroncamento com a BR-060 até a entrada da cidade do Gama/DF. Essa subárea delimitada apresenta cerca de 130 km², sendo 43 km de rodovias com uma faixa de domínio de análise de 3,0 km, sendo 1,5 km para cada lado do eixo da rodovia. (Figura 3.2)

A segunda subárea escolhida compreendeu também dois trechos rodoviários. Um primeiro ao longo da rodovia federal BR-080 entre a cidade de Brazlândia/DF e o entroncamento para a DF/GO-205. O segundo trecho, escolhido estrategicamente, no sentido de trabalhar com um trecho rodoviário somente implantado em revestimento primário, situa-se na DF/GO-220 entre o entroncamento com a BR-080 e o entroncamento com a DF-001. A extensão total dos dois trechos rodoviários nessa área de estudo é de 34 km o que resulta em uma área de aproximadamente 100 km², onde a faixa de domínio de pesquisa adotada também foi de 1,5 Km para cada lado do eixo da rodovia. (Figura 3.3).

Os trechos em questão foram escolhidos devido a suas importâncias econômicas dentro do contexto do Centro-Oeste, pois a região apresenta uma elevada demanda por transportes intra-regional, tanto de carga, como de pessoas. Outros parâmetros também foram importantes na escolha tais como: rodovias em várias concepções de construção, trechos rodoviários federais e estaduais (distritais); simples, duplicados e em duplicação; em pavimentação asfáltica e com revestimento primário. Importante ressaltar também que a faixa de interesse ao estudo ficou definida como sendo de 1.500 m para cada lado, a partir do eixo central das rodovias, em conformidade com a Instrução de Serviços Ambientais ISA-01, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagens – DNER, que trata dos impactos da fase de planejamento de rodovias.

DETALHE DA PRIMEIRA SUB-ÁREA DE ESTUDO

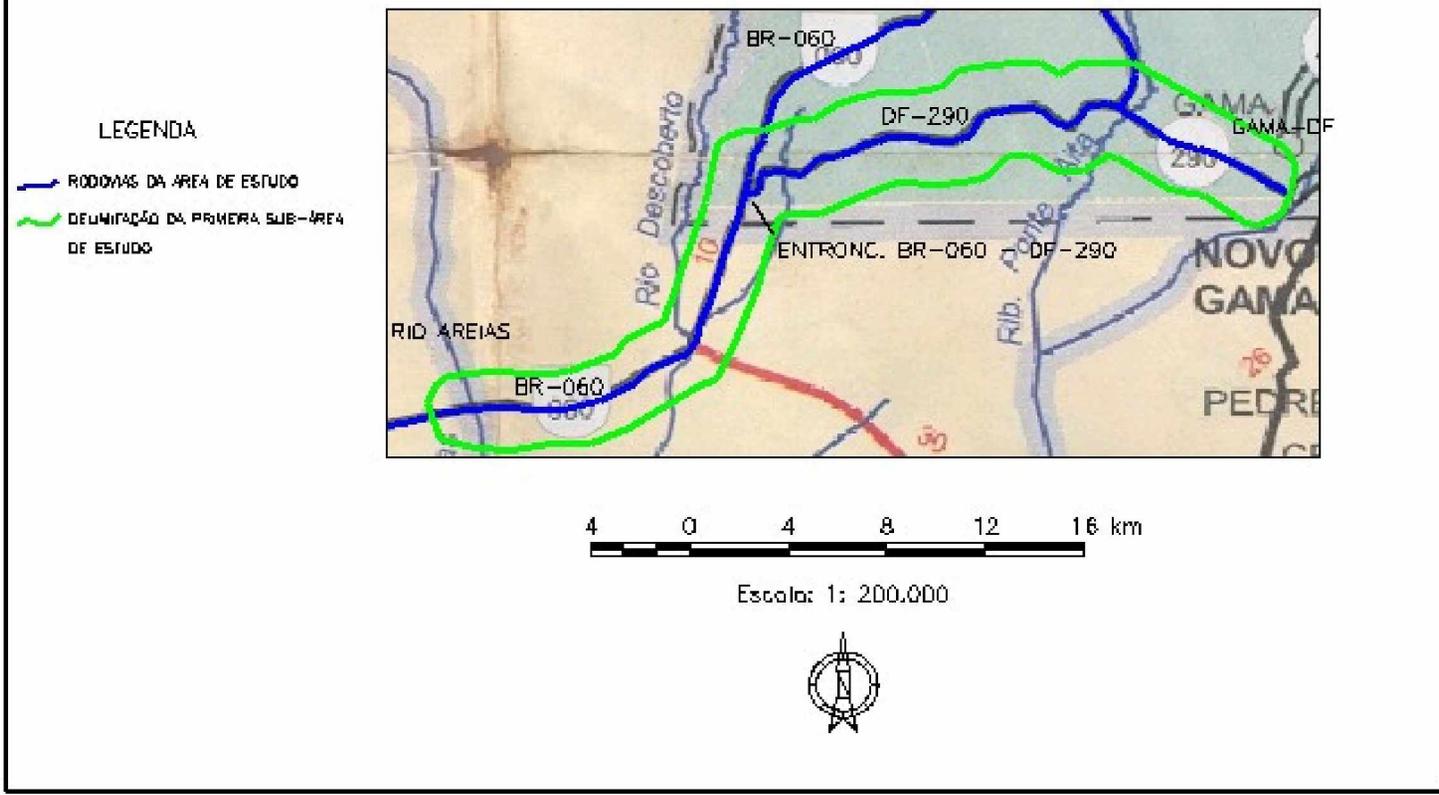


Figura 3.2 - Detalhe da Primeira Subárea de estudos

DETALHE DA SEGUNDA SUB-ÁREA DE ESTUDO

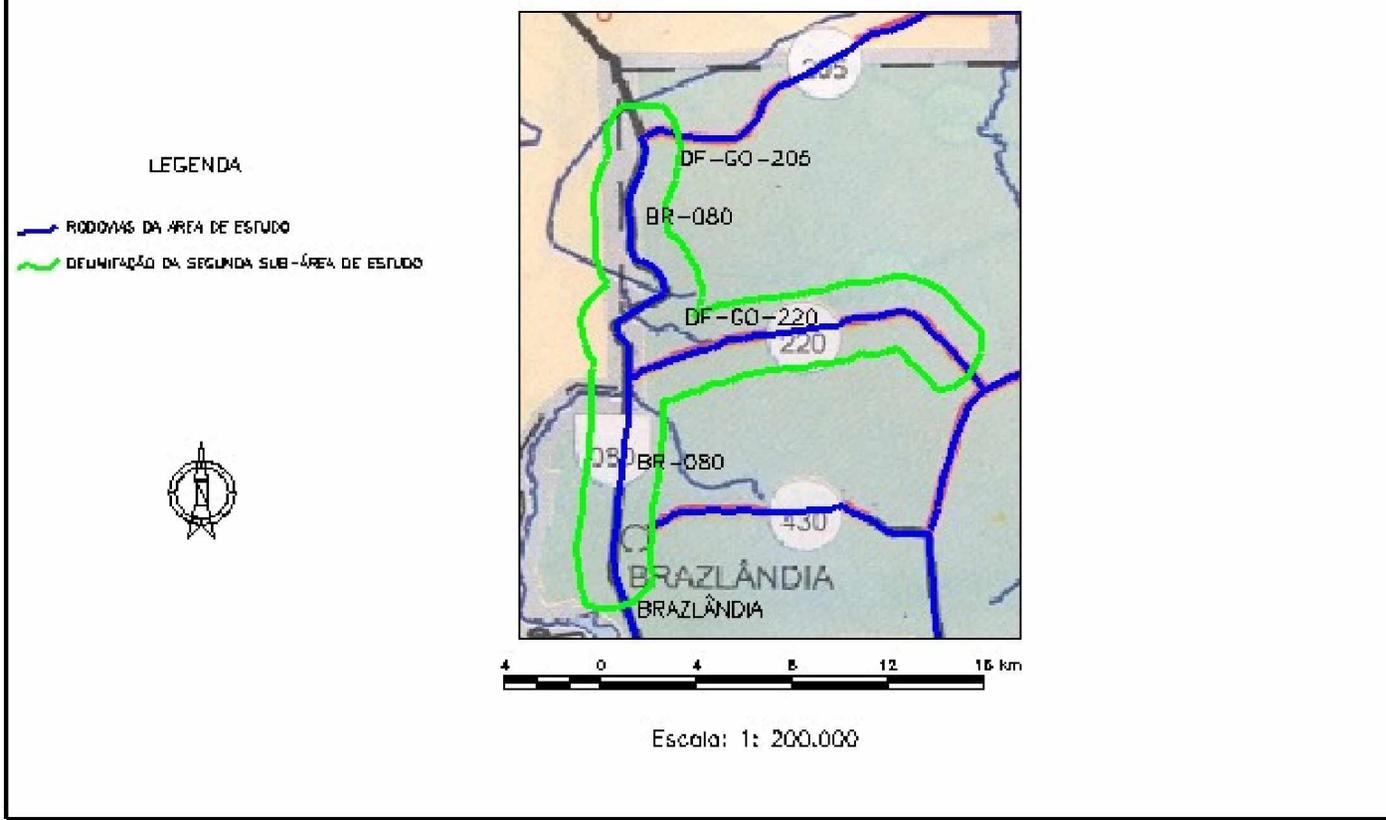


Figura 3.3 - Detalhe da Segunda Subárea de estudos

3.2 - SELEÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS

Para o processo de seleção das amostras foram obtidas várias imagens de satélite como as imagens do satélite sino-brasileiro CBERS 2 com resolução de 20 m (Figura 3.4) e do satélite Landsat 7 com resolução de 15 m (Figura 3.5). Foram adquiridas também imagens de alta resolução do satélite Quickbird com resolução de 0,60 m. Nas Figuras 3.6 a 3.13 são apresentados alguns exemplos da excelente visualização de informações que essas imagens de alta resolução podem proporcionar.

As imagens do satélite sino-brasileiro CBERS 2 foram conseguidas gratuitamente, via internet, mediante cadastro no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (www.inpe.br). As imagens do satélite Landsat 7 foram cedidas pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Já as imagens Quickbird foram adquiridas junto à sua representante brasileira.

A resolução de uma imagem descreve o nível de detalhe que ela comporta. Resoluções mais altas significam maiores detalhes na imagem, pois a resolução é determinada pelo número de pixels impressos ou exibidos por unidade de medida, sendo a polegada utilizada com mais frequência. O pixel, por sua vez, é a menor unidade de uma imagem, e quanto maior for o número de pixels, melhor a resolução que a imagem terá. Desta forma, uma imagem com resolução de 0,60 m indica que a mesma possui uma quantidade de pixels por polegada muito maior que uma imagem com resolução 15 m, por exemplo. Com isso, a imagem com maior quantidade de pixels por polegada suportará um zoom muito maior sem apresentar distorção.

Mapas topográfico e de solo, com maiores escalas de detalhe, também foram utilizados a fim de se obter tais características da área de estudo. O primeiro mapa citado foi obtido, em escala 1:250.000 junto ao Shuttle Radar Topography Mission - SRTM e o segundo foi disponibilizado pelo Departamento Nacional de Proteção Mineral – DNPM em escala 1:100.000.

Trinta pontos amostrais foram levantados e georreferenciados, com o auxílio de um aparelho GPS, marca Garmin, modelo GPS II plus, localizados de forma a cobrir toda a área de estudo e ainda de acordo com a pré-definição da concentração de características semelhantes entre as áreas, com a identificação em mapas temáticos e imagens de satélites. Esses pontos estão localizados (representados) nas Figuras 3.4 e 3.5.

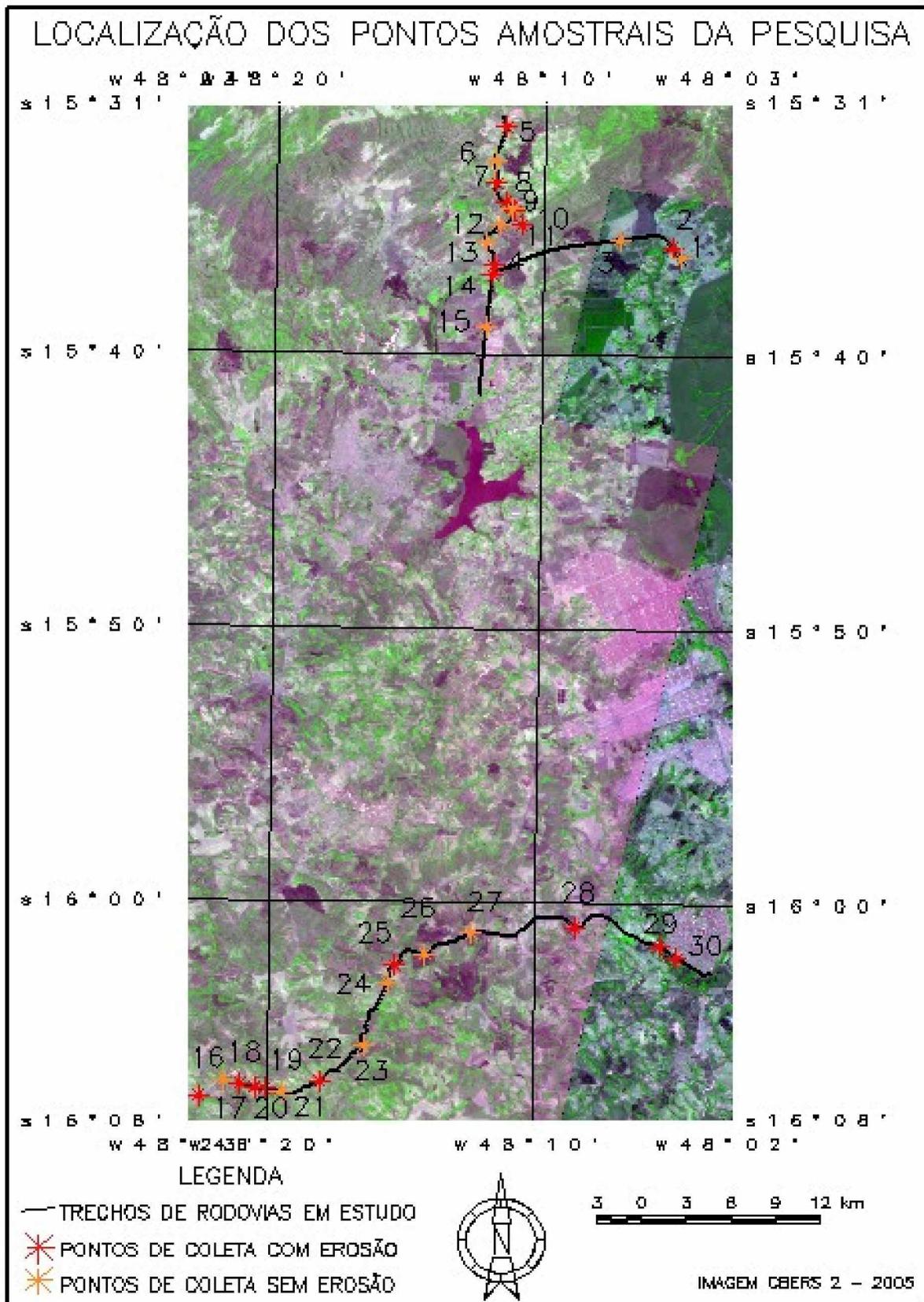


Figura 3.4 - Região de estudo pelo satélite sino-brasileiro CBERS 2

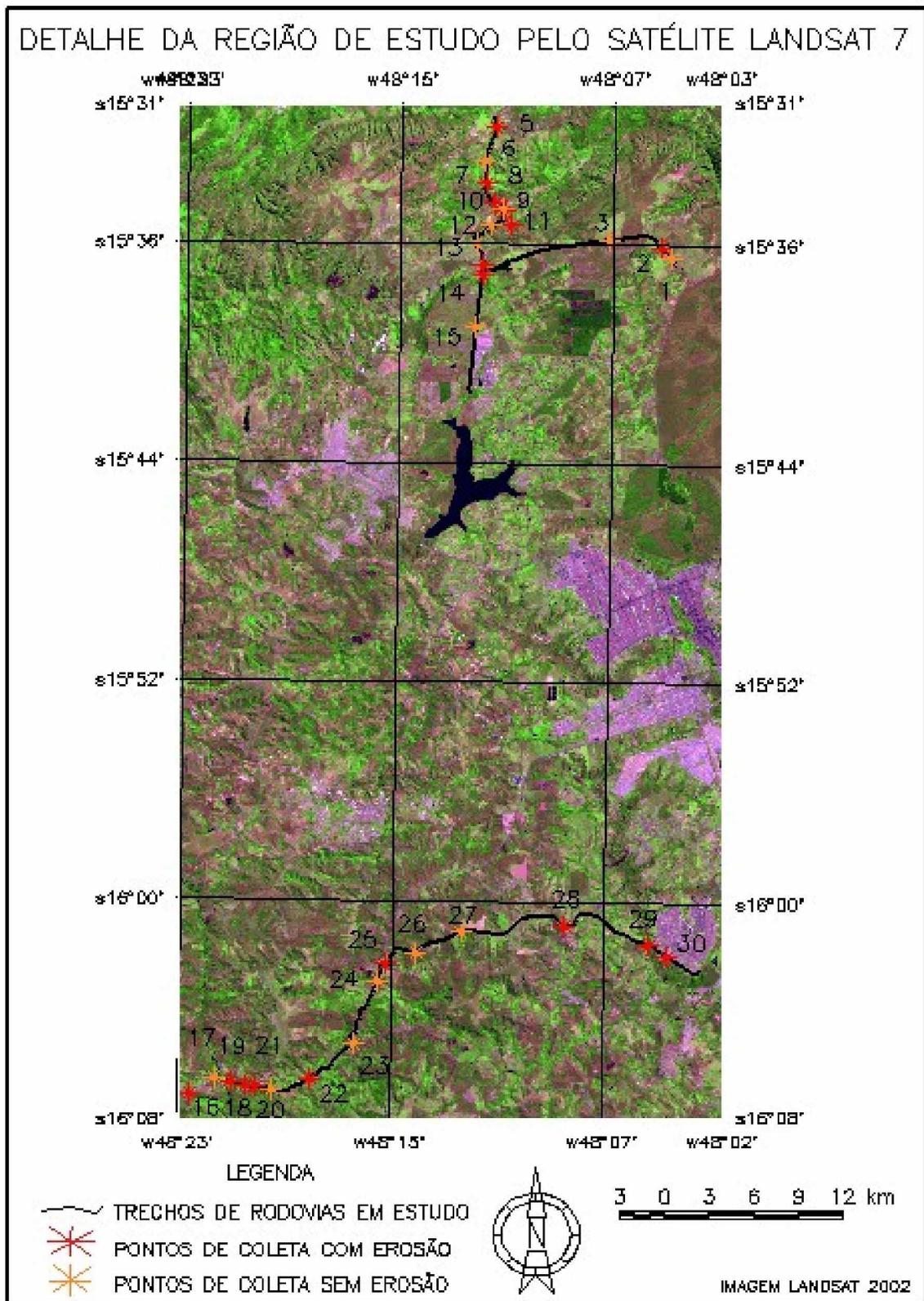


Figura 3.5 - Detalhe da região de estudo pelo satélite americano Landsat 7

DETALHE DE PONTO DE COLETA EM EROSÃO – DF-290 – GAMA/DF

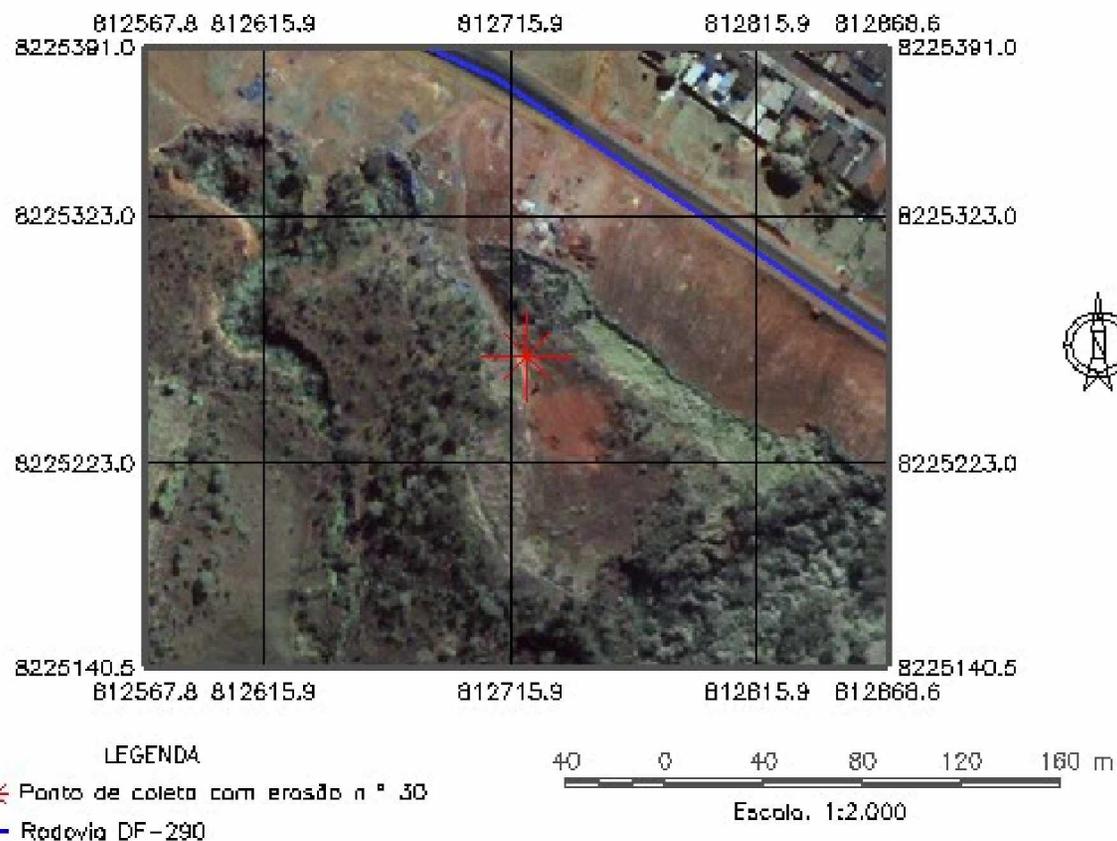


Figura 3.6 - Detalhe de ponto de coleta em erosão em imagem quickbird em alta resolução

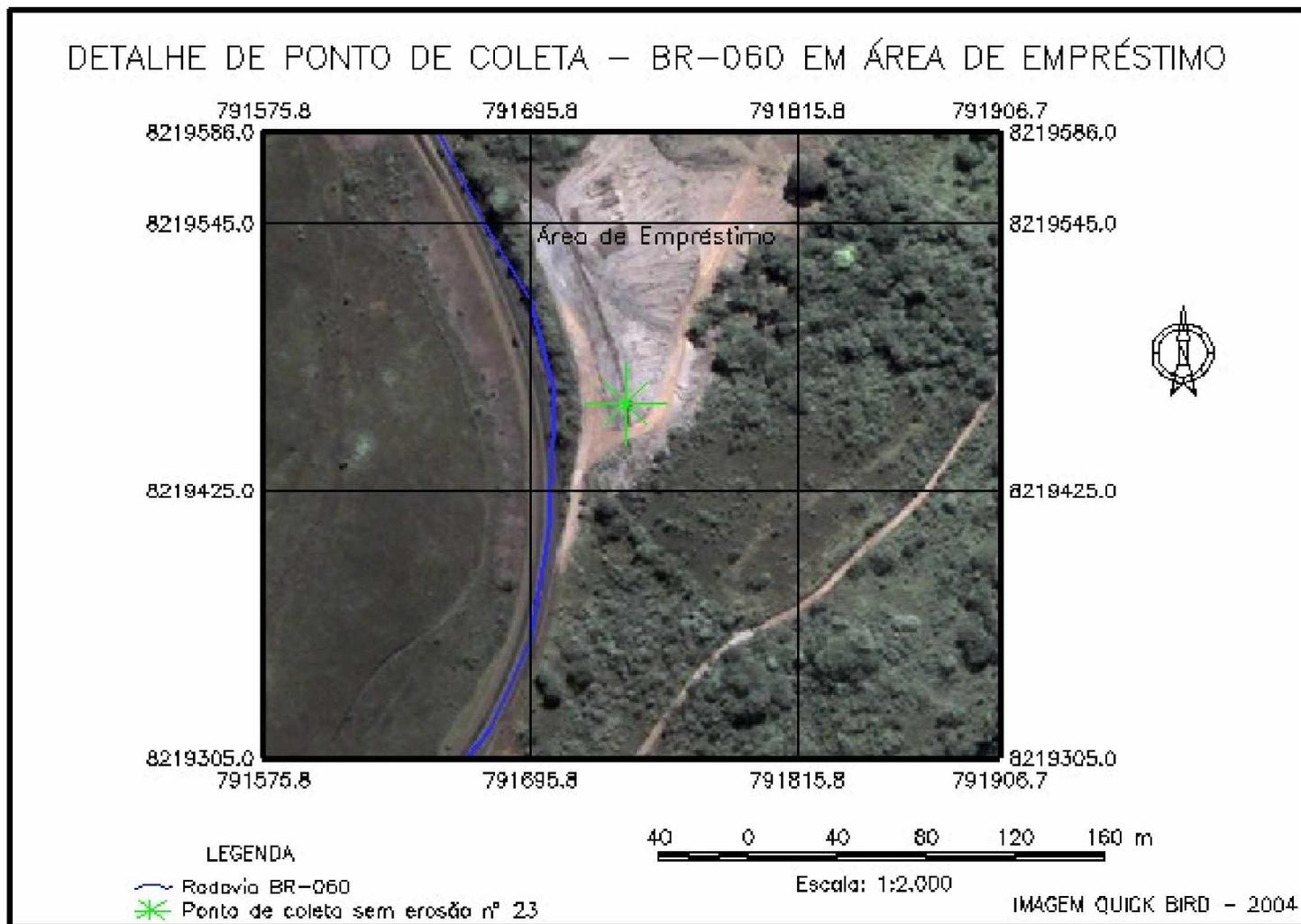


Figura 3.7 - Detalhes de ponto de coleta sem erosão em área de empréstimo em imagem quickbird em alta resolução

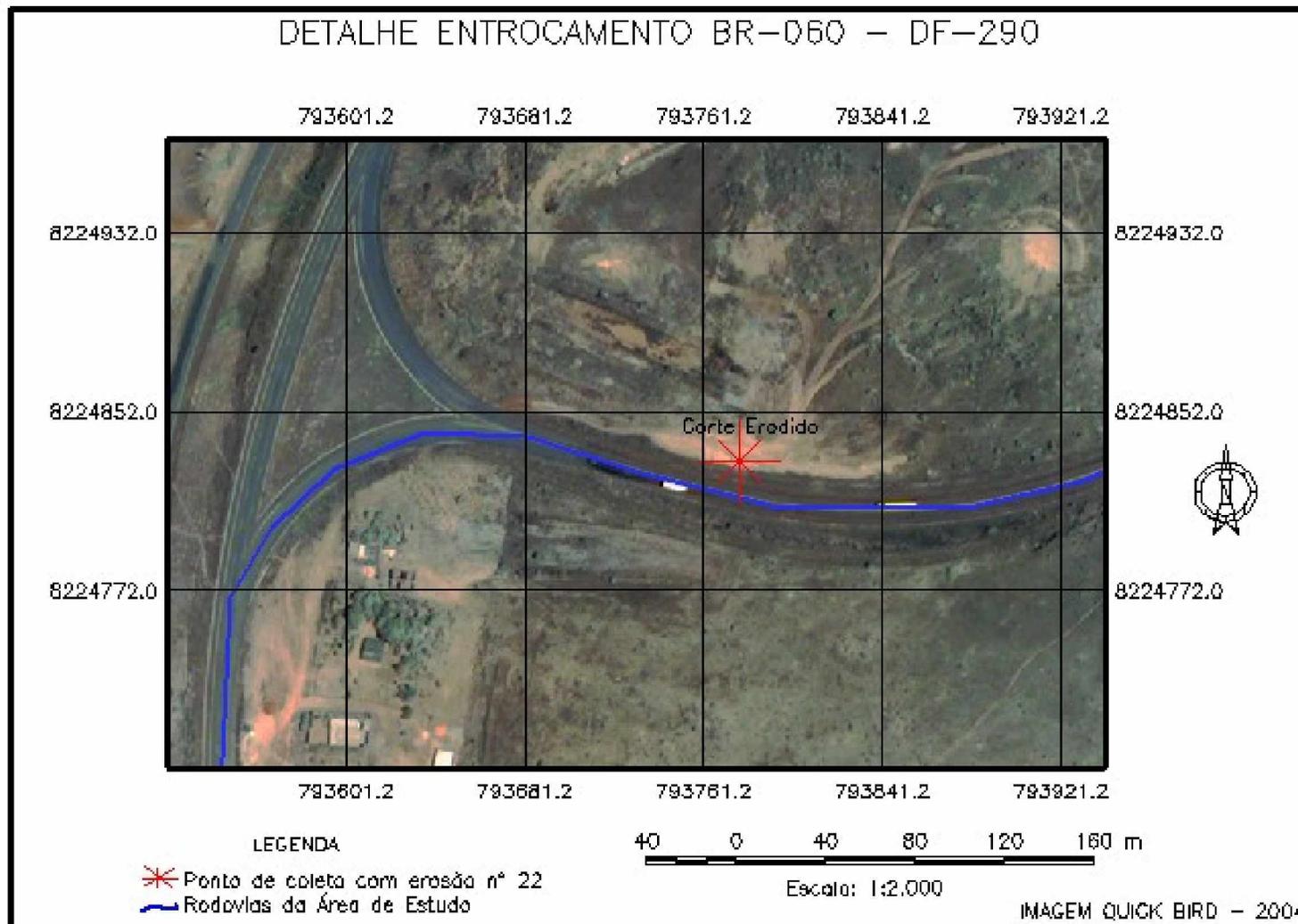


Figura 3.8 - Detalhes de ponto de coleta em erosão e Entroncamento BR-080 com DF-290 em imagem quickbird em alta resolução



Figura 3.9 - Detalhes de ponto de coleta em erosão e estradas vicinais na DF-290 em imagem quickbird em alta resolução

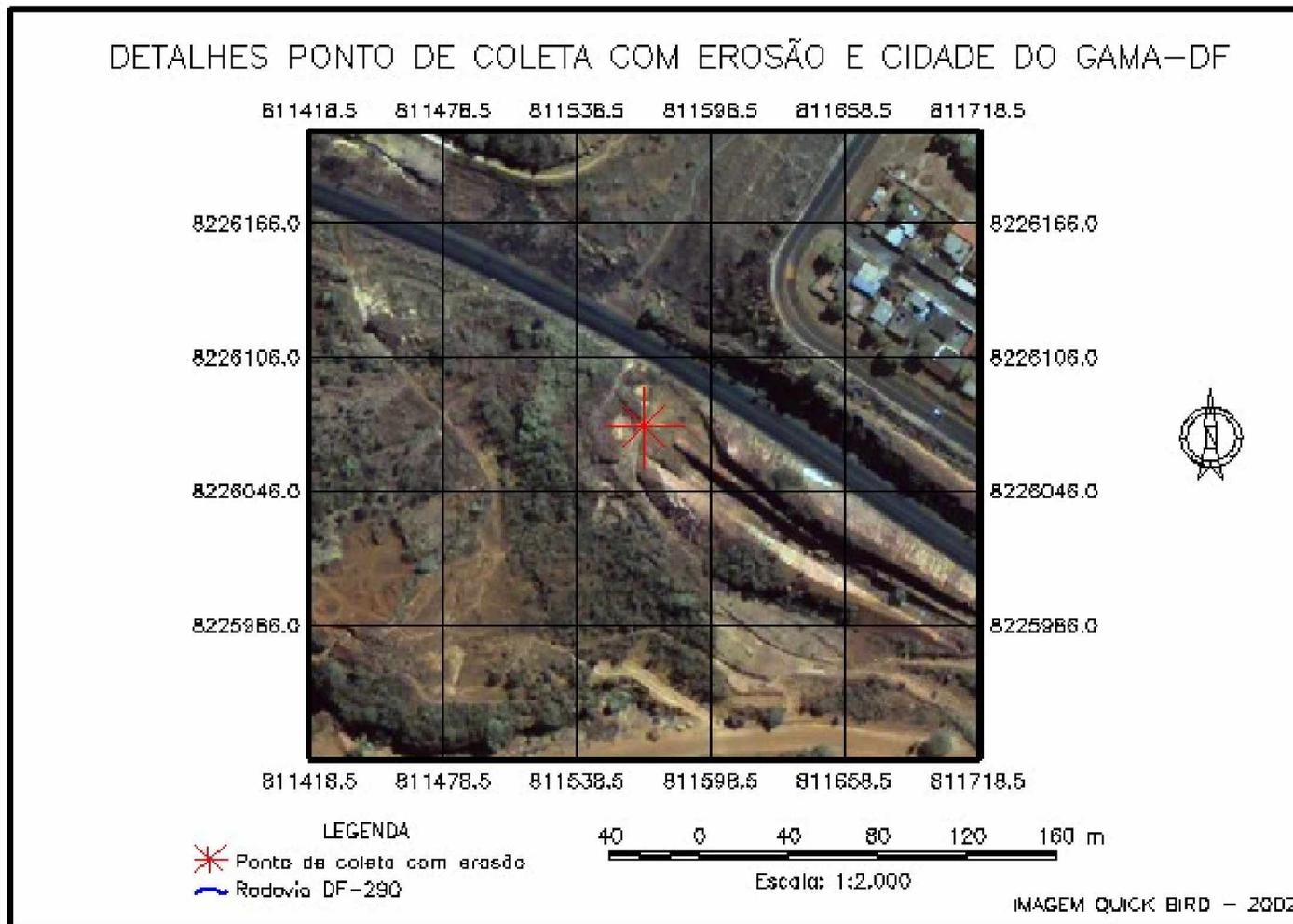


Figura 3.10 - Detalhes de ponto de coleta em erosão e geomorfologia na entrada da cidade do Gama/DF na DF-290 em imagem Quickbird em alta resolução

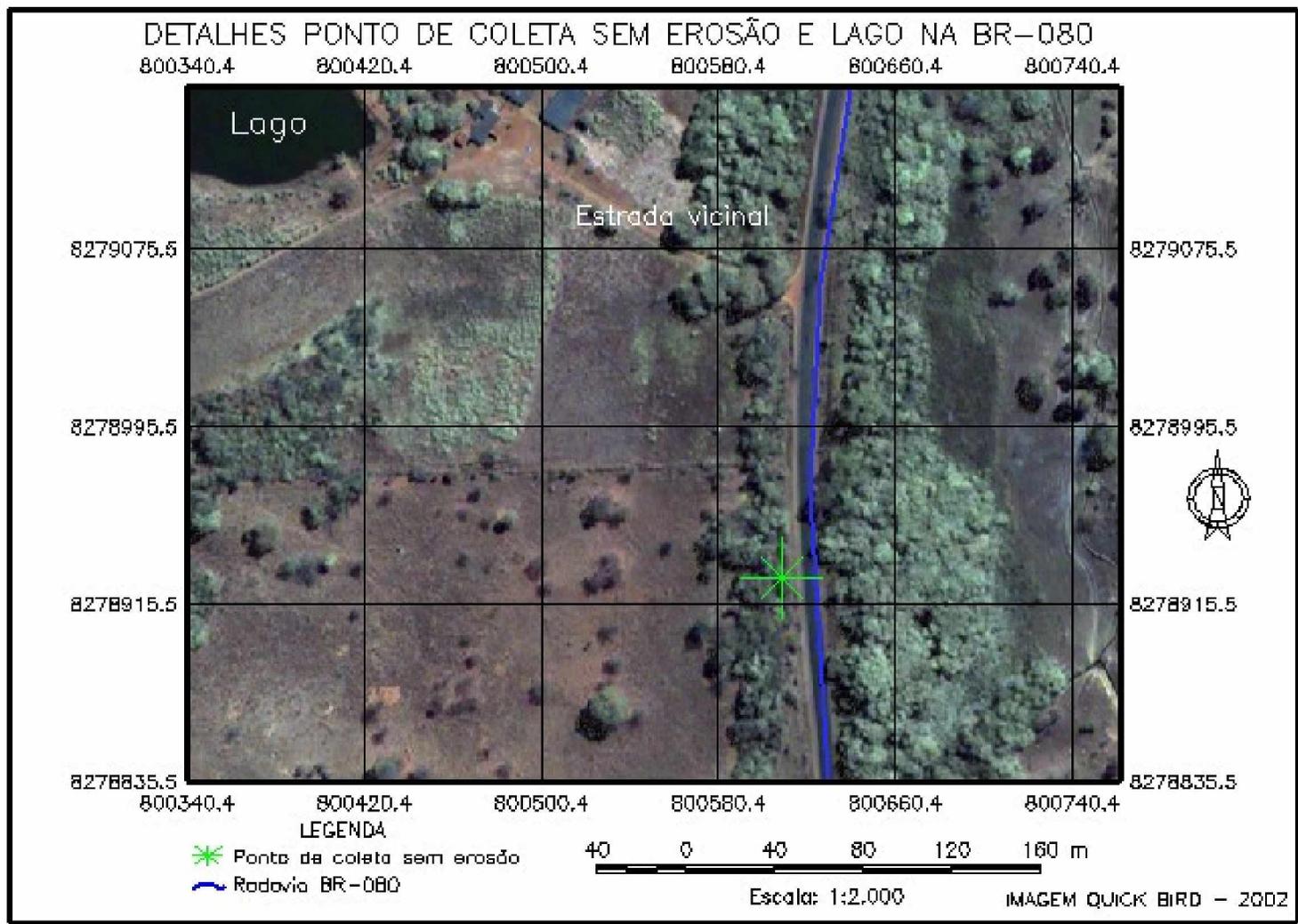


Figura 3.11 - Detalhes de ponto de coleta sem erosão e lago na BR-080 em imagem quickbird em alta resolução

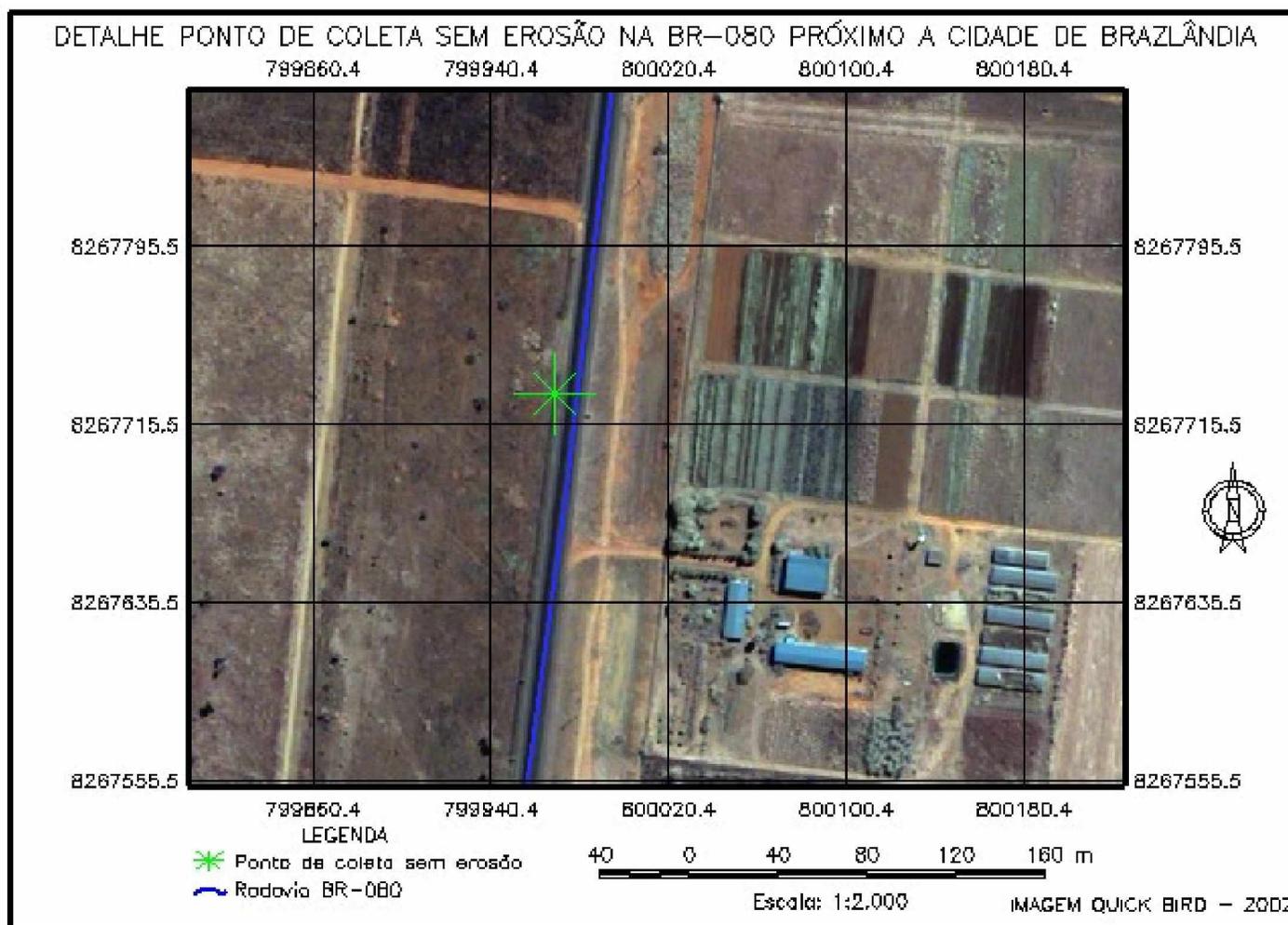


Figura 3.12 - Detalhes de ponto de coleta sem erosão próximo a cidade de Brazlândia às margens da BR-080 em imagem quickbird em alta resolução

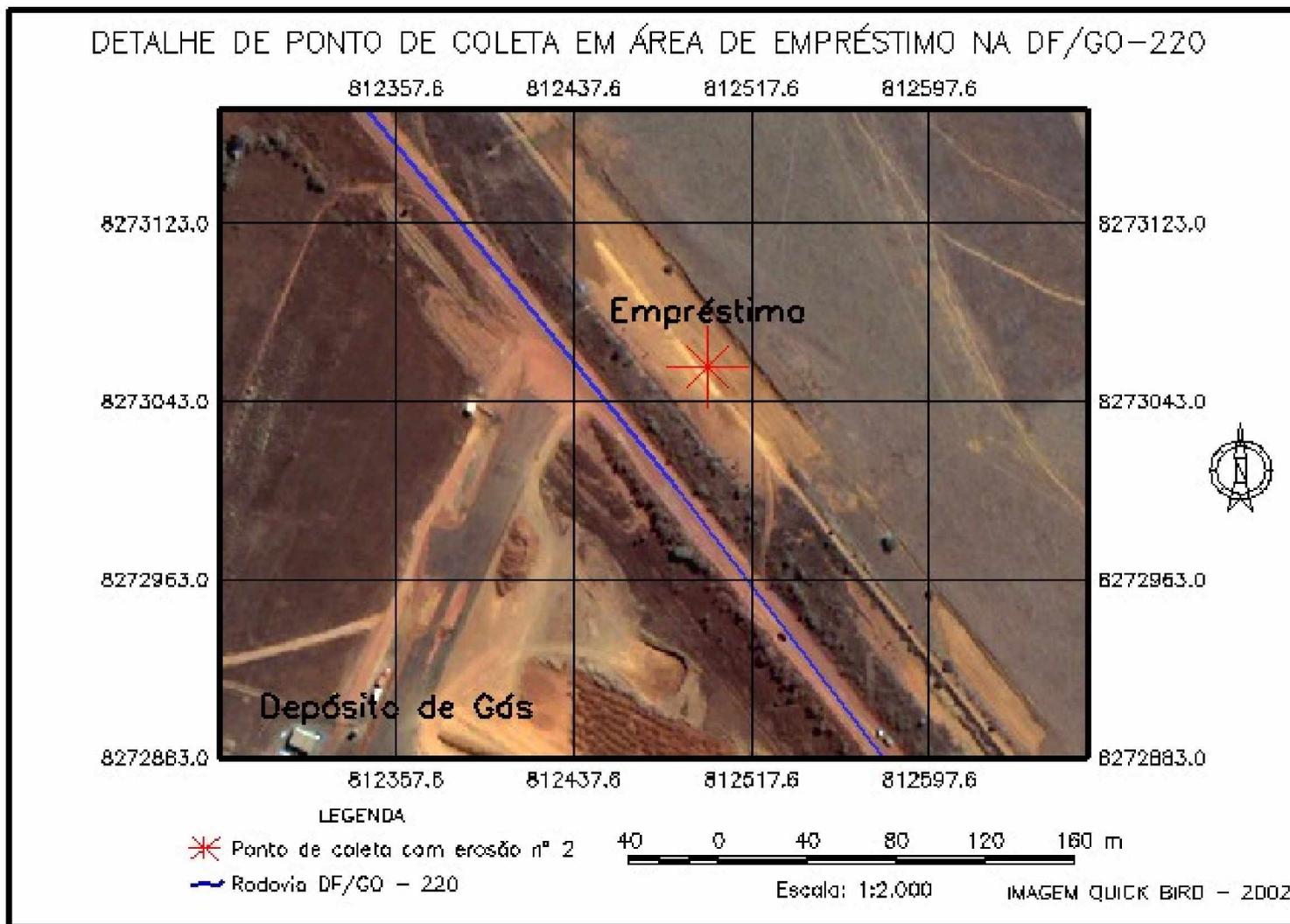


Figura 3.13 - Detalhe de ponto de coleta em erosão em área de empréstimo às margens da DF-220 em imagem quickbird em alta resolução

Em cada um dos 30 pontos amostrais foram identificados trechos com e sem processos erosivos, para se ter às características nas duas situações a fim de fornecer subsídios para a tomada de decisão no momento da geração dos modelos de previsão de processos erosivos. Importante que todos os pontos escolhidos estavam em posições que ofereciam todas as condições ambientais favoráveis ao surgimento das erosões (cortes, aterros e áreas de empréstimos).

3.3 - COLETA DE AMOSTRAS E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS AMOSTRADOS

Amostras deformadas e indeformadas de solos com e sem a presença de processos erosivos foram coletadas nos pontos amostrais pré-definidos a fim de promover a caracterização e classificação geotécnica dos mesmos, em conformidade com as normas da ABNT, assim como a classificação expedita MCT – Miniatura, Compactado, Tropical. As amostras deformadas foram utilizadas nos ensaios de erodibilidade propostos por Nogami e modificados por Pejon. Posteriormente as amostras de solos foram classificadas e caracterizadas em laboratório, a Tabela 3.1 apresenta essas características geotécnicas.

Dados regionalizados de características geológicas, geomorfológicas, de vegetação, de solos e declividade (Figuras 3.14 a 3.23) foram também levantados, para todos os trechos rodoviários. Estes dados, juntamente com as características do solo e com seus parâmetros, formaram a primeira base de dados dos pontos amostrais da área de estudo. (Tabela 3.1).

3.3.1 - Análise do Mapa Temático de Geologia

A partir do mapa temático de geologia foram identificados na região a formação Ibiá, o subgrupo Paraopeba, o grupo Paranoá e coberturas sedimentares terciárias-quadernárias.

A formação Ibiá constitui-se essencialmente de rochas xistosas de coloração cinza-chumbo a cinza-esverdeado-escuro, bem foliada, dobrada, crenulada e fraturada, mostrando por vezes estruturas *flaser* e superfícies intrafoliais. A granulação varia de fina a grossa e compõe-se essencialmente por quartzo, muscovita e clorita, com presença constante de carbonato e menos freqüente de biotita.

Tabela 3.1 - Características gerais dos pontos amostrados

Parâmetro \ Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8
Erosão	não	sim	não	sim	sim	não	sim	sim
Localização	DF-220	DF-220	DF-220	DF-220	BR-080	BR-080	BR-080	BR-080
Cor do Solo	vermelho	vermelho	amarelo	amarelo	amarelo	vermelho	amarelo	amarelo
Caracteírticas Locais	empréstimo l.d.	empréstimo l.d.	empréstimo l.d.	corte l.d.	corte l.d.	corte l.d.	corte l.d.e.	corte l.e.
Vegetação Local	campo	pastagem	campo	campo	campo	campo	campo	campo
Ocupação Entorno	rural	rural	rural	rural	rural	rural	rural	rural
Presença de Mica	não	não	não	não	não	não	não	não
Latitude (sul)	15 36 27,1	15 36 03,7	15 35 48,2	15 36 44,3	15 31 44,1	15 32 58,7	15 33 47,4	15 34 27,7
Longitude (oeste)	48 04 49,0	48 05 09,4	48 07 07,7	48 11 05,5	48 11 25,3	48 11 49,0	48 11 45,0	48 11 26,8
Altitude (m)	1279	1262	1340	1181	886	816	997	1017
Umidade Natural (%)	21,09	28,59	5,01	21,98	1,81	8,39	15,36	11,86
Umid. Higroscópica (%)	2,49	1,12	2,26	2,52	0,53	1,37	0,84	0,26
Limite de liquidez (%)	46	38	44	53	34	32	45	34
Lim. de Plasticidade (%)	34	37	34	35	27	22	30	26
Índice de Plastic. (%)	12	1	10	18	7	10	15	8
Massa Específica	2,69	2,81	2,74	2,63	2,77	2,68	2,73	2,68
pH em Água	5,28	5,97	5,11	5,29	4,93	6,61	4,28	4,68
pH em KCl	5,11	5,37	5,52	4,8	3,41	5,58	3,89	4,01
Delta pH	0,17	0,6	-0,41	0,49	1,52	1,03	0,39	0,67
MCT - Plasticidade	a.p.	b.p.	b.p.	a.p.	a.p.	a.p.	a.p.	a.p.
MCT - c'	1,34	1,21	0,74	1,58	1,17	1,63	1,79	1,21
MCT - Resist. Esmag.	m.a.	m.a.	m.a.	m.a.	bx.	m.a.	at.	bx.
Geologia	Cob. Terc. Quater.	Cob. Terc. Quater.	Cob. Terc. Quater.	Cob. Terc. Quater.	Paraopeba	Paranoá	Paraopeba	Paraopeba
Geomorfologia	Formas tabulares	Formas tabulares	Formas tabulares	Formas tabulares	Formas tabulares	Formas aguçadas	Formas aguçadas	Formas aguçadas
Recursos Naturais (%)	Dec 0 a 15	Dec 0 a 15	Dec 0 a 15	Dec 25 a 40	Dec 0 a 15	Dec 25 a 40	Dec 25 a 40	Dec 25 a 40
Solos	Latos. verm. Álico	Latos. verm. Álico	Latos. verm. Álico	Latos. verm. Álico	Cambis. Distróf.	Cambis. Distróf.	Cambis. Distróf.	Cambis. Distróf.
Vegetação	Cerrado	Cerrado	Floresta de galeria	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado

Tabela 3.1 - Características gerais dos pontos amostrados (continuação)

Parâmetro \ Ponto	9	10	11	12	13	14	15	16
Erosão	não	sim	sim	não	não	sim	não	sim
Localização	BR-080	BR-080	BR-080	BR-080	BR-080	BR-080	BR-080	BR-060
Cor do Solo	amarelo	amarelo	amarelo	vermelho	cinza	marron	vermelho	amarelo
Características Locais	corde l.d.e.	corde l.e.	corde l.e.	corde l.e.	corde l.d.e.	corde l.e.	empréstimo l.e.	corde l.d.
Vegetação Local	campo	campo	campo	campo	campo	campo	campo	campo
Ocupação Entorno	rural	rural	rural	rural	rural	rural	rural	rural
Presença de Mica	não	não	não	não	não	não	não	não
Latitude (sul)	15 34 43,6	15 34 47,3	15 35 13,2	15 35 19,6	15 35 56,4	15 37 07,8	15 39 02,6	16 07 08,0
Longitude (oeste)	48 11 07,5	48 11 06,4	48 10 49,0	48 11 37,2	48 12 07,1	48 11 55,2	48 12 07,5	48 22 34,0
Altitude (m)	1038	1036	1047	1029	1077	1124	1154	972
Umidade Natural (%)	6,86	14,77	24,79	16,08	1,90	10,33	20,62	7,09
Umid. Higroscópica (%)	0,27	0,56	0,72	1,33	0,83	1,39	1,55	0,18
Limite de liquidez (%)	34	45	43	52	30	47	48	42
Lim. de Plasticidade (%)	25	36	24	36	24	36	33	36
Índice de Plastic. (%)	9	9	19	16	6	11	15	6
Massa Específica	2,68	2,65	2,75	2,84	2,7	2,71	2,74	2,76
pH em Água	5,55	4,89	5,54	5,81	5,75	5,23	5,18	5,17
pH em KCl	5,06	4,18	4,14	5,93	4,56	5,88	6,09	4,55
Delta pH	0,49	0,71	1,4	-0,12	1,19	-0,65	-0,91	0,62
MCT - Plasticidade	m.p.	a.p.	a.p.	a.p.	a.p.	m.p.	a.p.	b.p.
MCT - c'	0,62	1,63	1,51	1,53	1,53	1,24	1,21	0,14
MCT - Resist. Esmag.	bx.	bx.	bx.	m.a.	m.a.	m.a.	m.a.	bx.
Geologia	Paraopeba	Paraopeba	Paranoá	Paranoá	Paranoá	Paraopeba	Cob. Terc. Quater.	Ibiá
Geomorfologia	Formas aguçadas	Formas aguçadas	Formas aguçadas	Formas aguçadas	Formas aguçadas	Formas tabulares	Formas tabulares	Formas aguçadas
Recursos Naturais (%)	Dec 25 a 40	Dec 25 a 40	Dec 25 a 40	Dec 25 a 40	Dec 25 a 40	Dec 0 a 15	Dec 0 a 15	Dec 25 a 40
Solos	Cambis. Distróf.	Cambis. Distróf.	Solo Litól. Álico	Solo Litól. Álico	Solo Litól. Álico	Latos. Verm. Amar.	Latos. Verm. Amar.	Cambis. Distróf.
Vegetação	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Floresta de galeria	Cerrado	Cerrado

Tabela 3.1 - Características gerais dos pontos amostrados (continuação)

Parâmetro \ Ponto	25	26	27	28	29	30
Erosão	sim	não	não	sim	sim	sim
Localização	Gama	BR-060	BR-060	BR-060	BR-060	BR-060
Cor do Solo	amarelo	marron	marron	marron	amarelo	vermelho
Características Locais	corte l.d.	corte l.d.e.	corte l.d.e.	corte l.d.e.	corte l.d.e.	empréstimo l.d.
Vegetação Local	campo	campo	campo	campo	campo	campo
Ocupação Entorno	urbana	rural	rural	rural	rural	rural
Presença de Mica	não	sim	não	não	não	não
Latitude (sul)	16 02 21,2	16 01 54,0	16 01 07,7	16 00 53,0	16 01 29,7	16 01 52,6
Longitude (oeste)	48 15 15,0	48 14 06,8	48 12 24,7	48 08 28,3	48 05 19,6	48 04 42,8
Altitude (m)	1005	963	1063	1060	1044	1089
Umidade Natural (%)	5,87	1,61	8,00	8,00	33,85	23,77
Umid. Higroscópica (%)	0,41	0,35	2,09	0,5	1,62	1,2
Limite de liquidez (%)	44	42	42	35	43	53
Lim. de Plasticidade (%)	0	26	26	27	36	36
Índice de Plastic. (%)	44	16	16	8	7	17
Massa Específica	2,8	2,82	2,69	2,96	2,79	2,72
pH em Água	5,44	5,32	4,93	4,51	5,51	6,31
pH em KCl	4,54	4,8	5,35	4,82	5,49	6,6
Delta pH	0,9	0,52	-0,42	-0,31	0,02	-0,29
MCT - Plasticidade	b.p.	b.p.	m.p.	m.p.	a.p.	a.p.
MCT - c'	0,33	0,33	0,83	0,96	0,96	1,31
MCT - Resist. Esmag.	bx.	bx.	m.a.	bx.	bx.	m.a.
Geologia	Paraopeba	Paraopeba	cob. Terc. Quater.	Ibiá	Paraopeba	Cob. Terc. Quater.
Geomorfologia	Formas aguçadas	Formas aguçadas	Sup. Erosiva tabular	Formas aguçadas	Formas tabulares	Formas tabulares
Recursos Naturais (%)	Dec 25 a 40	Dec 25 a 40	Dec 0 a 15	Dec 0 a 15	Dec 0 a 15	Dec 0 a 15
Solos	Cambis. Distróf.	Cambis. Distróf.	Latos. verm. Álico	Cambis. Distróf.	Cambis. Distróf.	Latos. verm. Álico
Vegetação	Pastagem	Pastagem	Floresta de galeria	Floresta de galeria	Cerrado	Cerrado

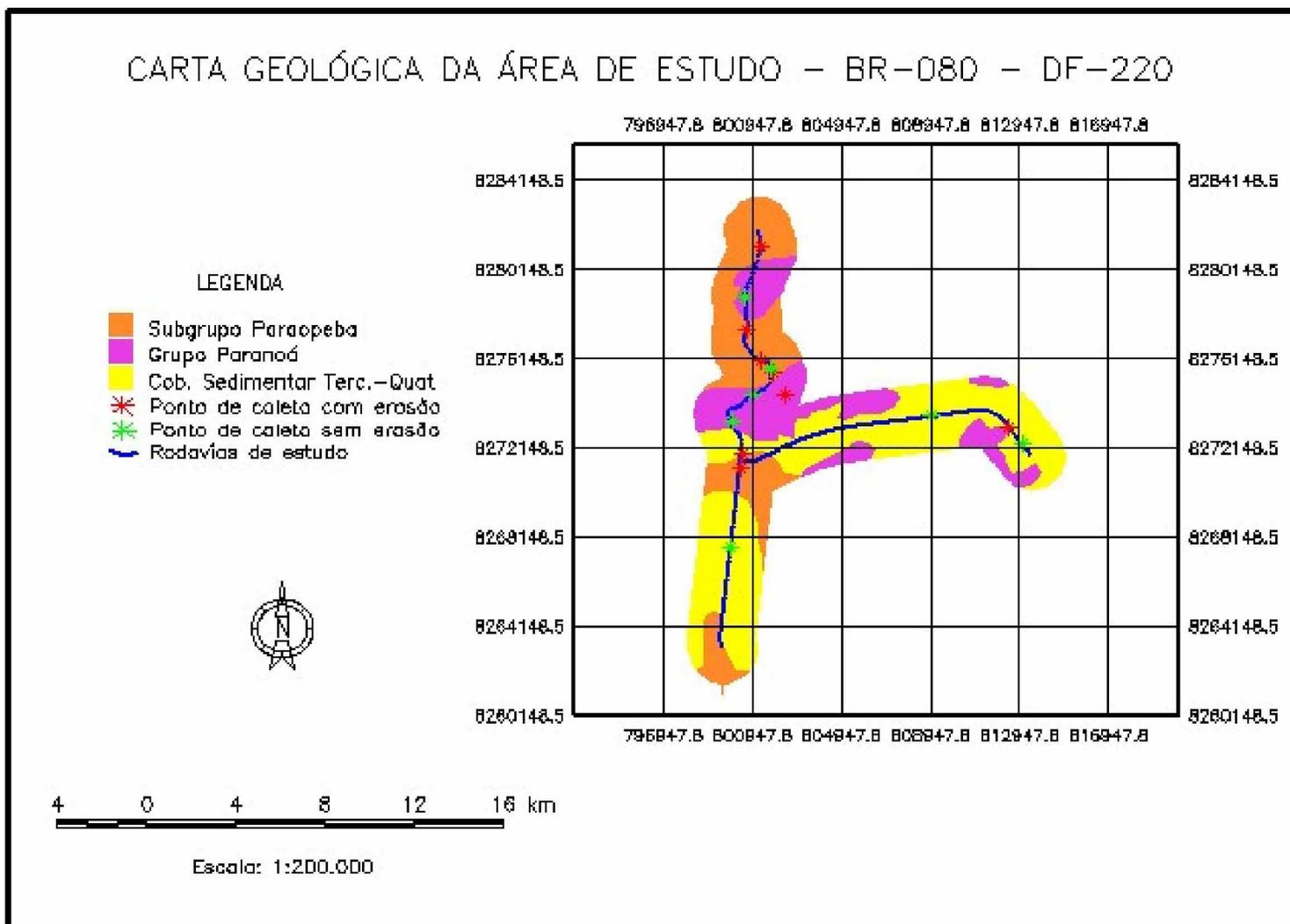


Figura 3.14 - Carta geológica da área de estudo nas rodovias BR-080 e DF-220 com base no Projeto Radam Brasil

CARTA GEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO – BR-060 – DF-290

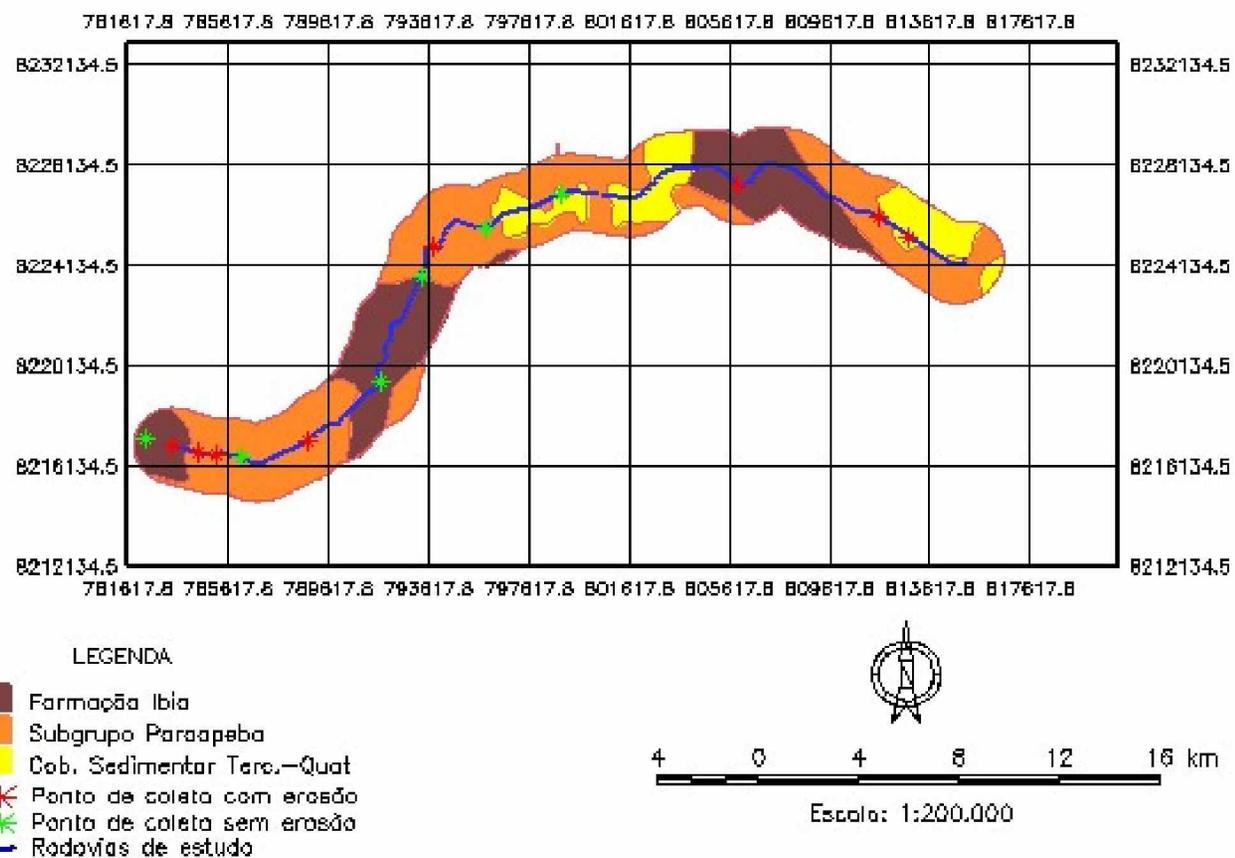


Figura 3.15 - Carta geológica da área de estudo nas rodovias BR-060 e DF-290 com base no Projeto Radam Brasil

CARTA GEOMORFOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO – BR-080 – DF-220

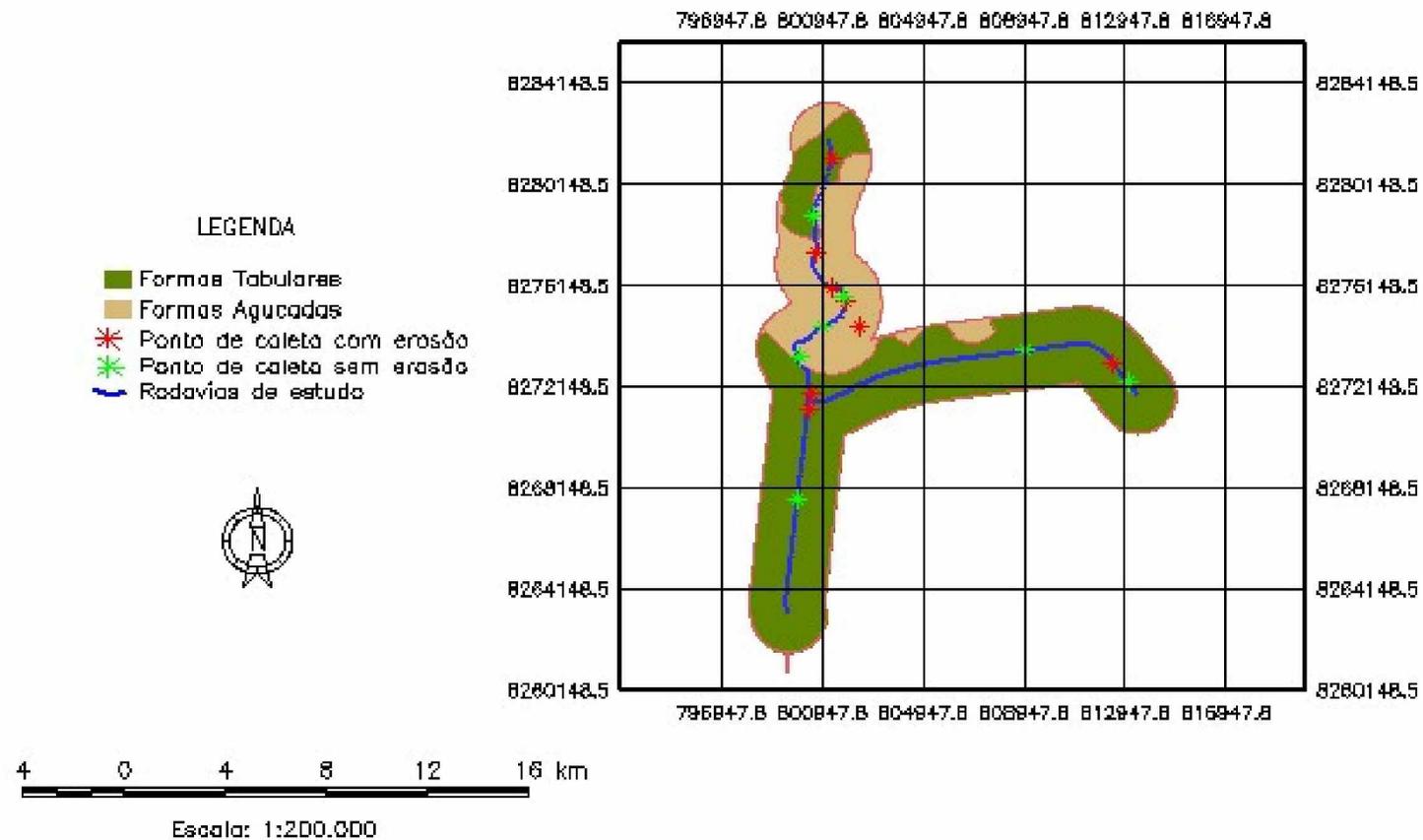
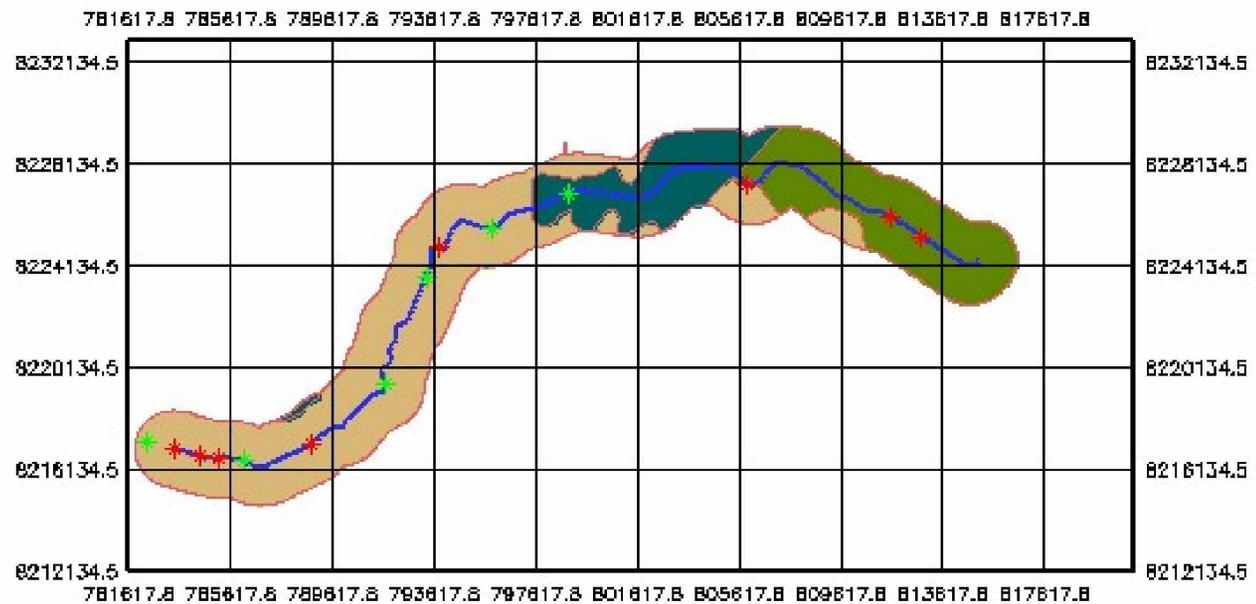


Figura 3.16 - Carta geomorfológica da área de estudo nas rodovias BR-080 e DF-220 com base no Projeto Radam Brasil

CARTA GEOMORFOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO – BR-060 – DF-290



LEGENDA

- Formas Aguçadas
- Formas Tabulares
- Superfície Erosiva Tabular
- ✱ Ponto de coleta com erosão
- ✱ Ponto de coleta sem erosão
- Rodovias de estudo



4 0 4 8 12 16 km

Escala: 1:200.000

Figura 3.17 - Carta geomorfológica da área de estudo nas rodovias BR-060 e DF-290 com base no Projeto Radam Brasil

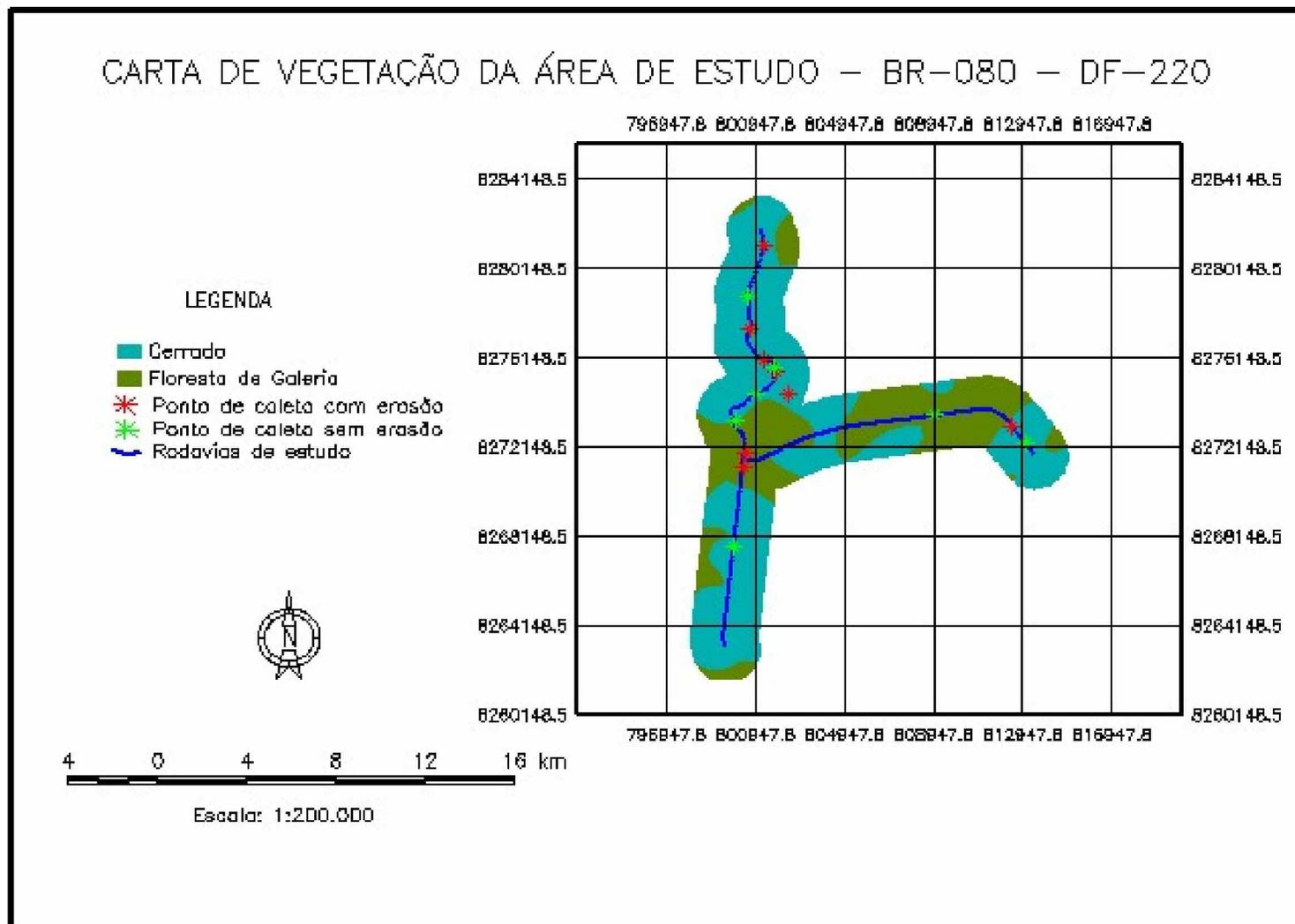


Figura 3.18 - Carta de vegetação da área de estudo nas rodovias BR-080 e DF-220 com base no Projeto Radam Brasil

CARTA DE VEGETAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – BR-060 – DF-290

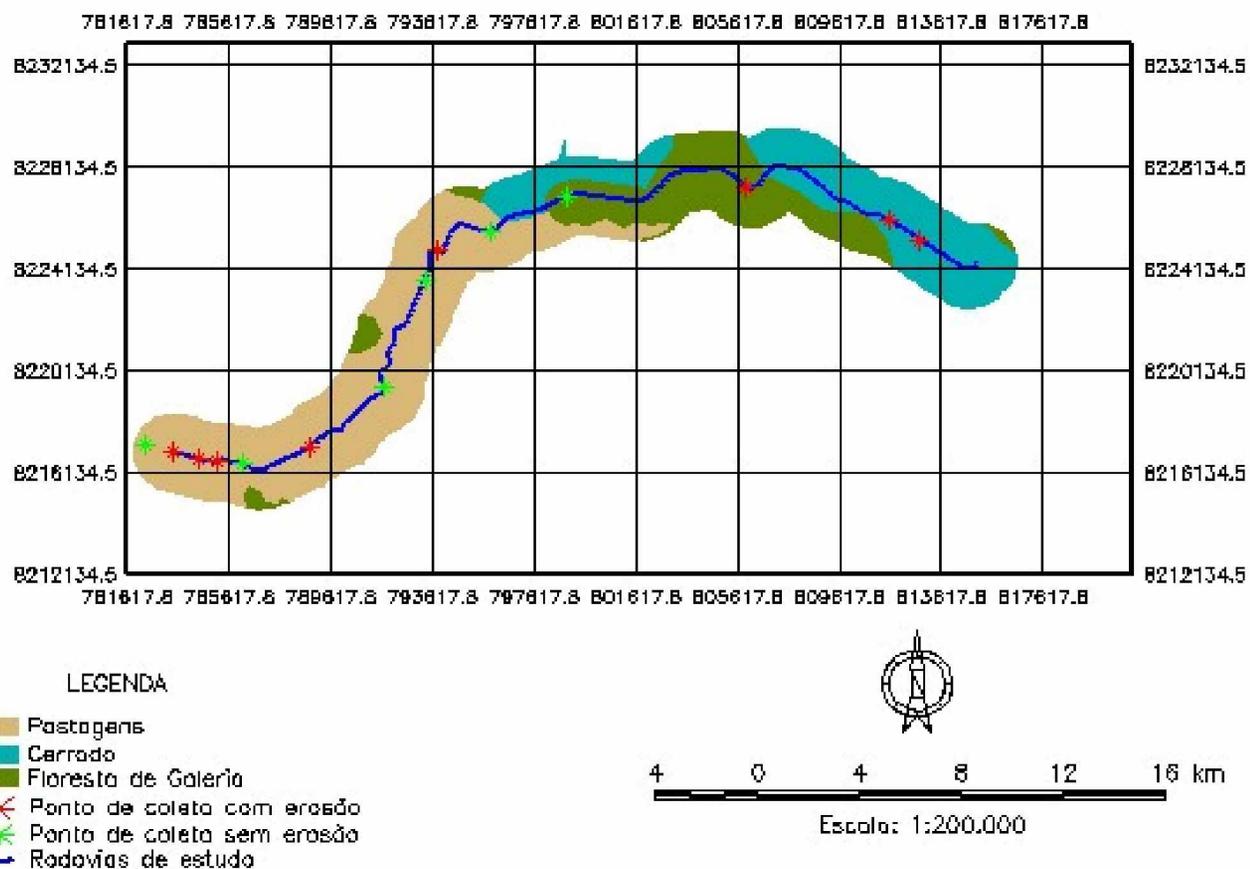


Figura 3.19 - Carta de vegetação da área de estudo nas rodovias BR-060 e DF-290 com base no Projeto Radam Brasil

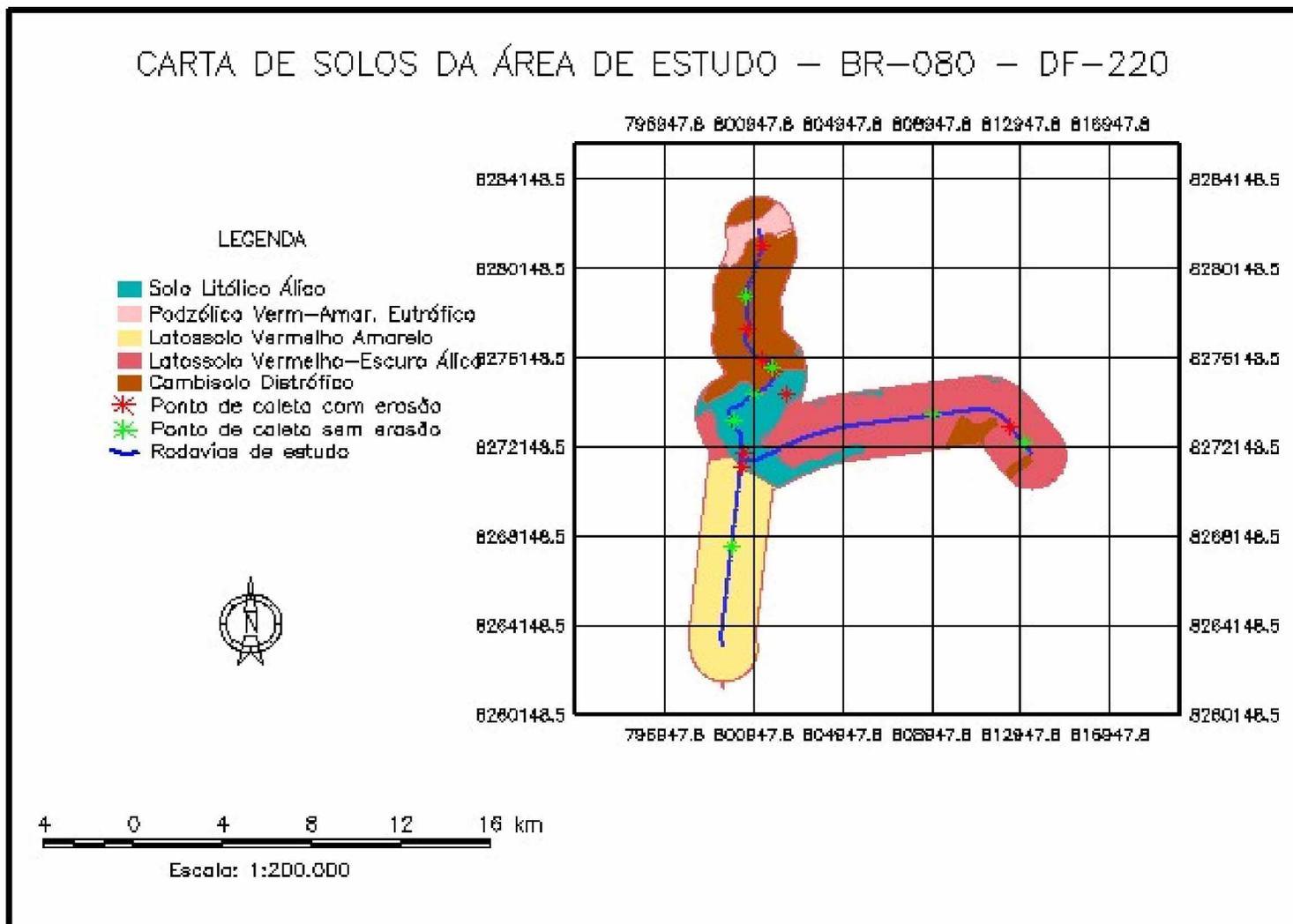


Figura 3.20 - Carta de solos da área de estudo nas rodovias BR-080 e DF-220 com base no Projeto Radam Brasil

CARTA DE SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO – BR-060 – DF-290

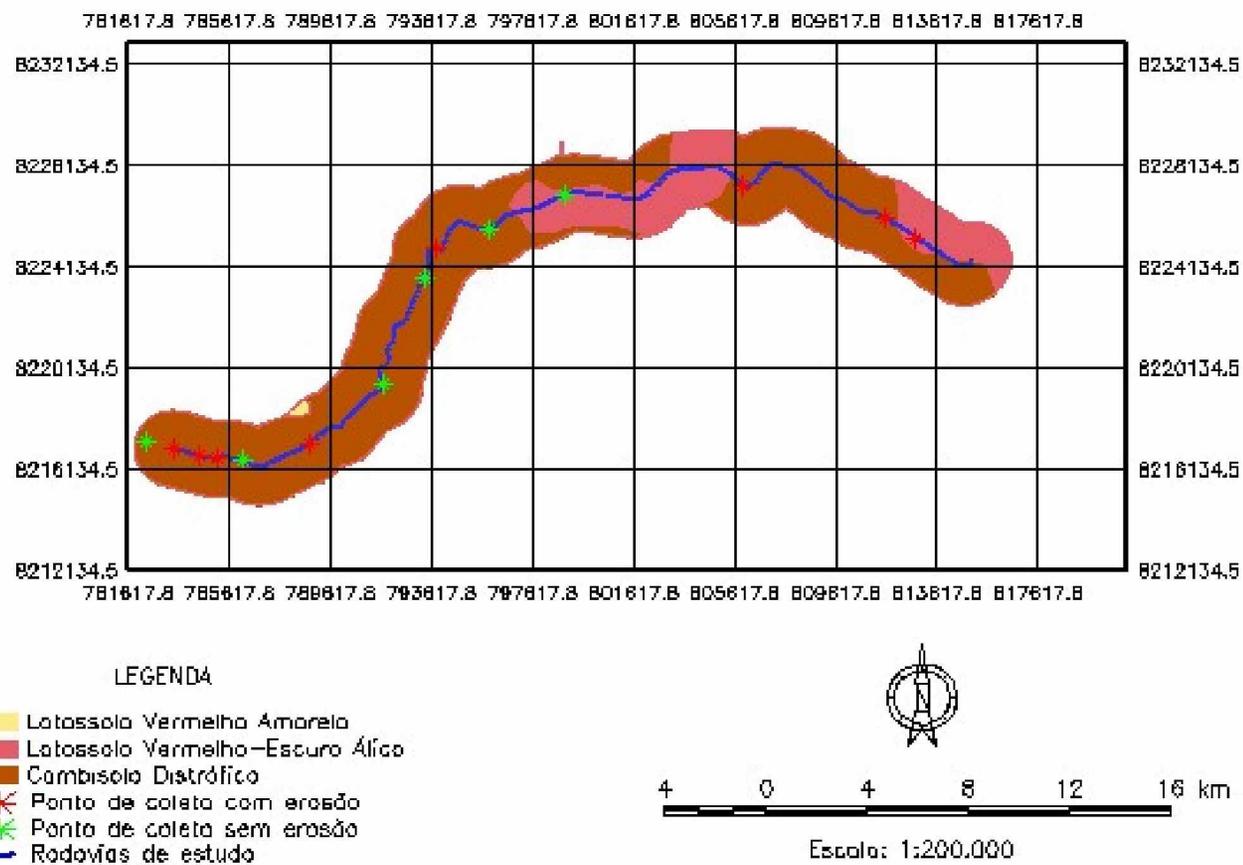


Figura 3.21 - Carta de solos da área de estudo nas rodovias BR-060 e DF-290 com base no Projeto Radam Brasil

CARTA DE PRECIPITAÇÃO E DECLIVIDADE DA ÁREA DE ESTUDO – BR-080 – DF-220

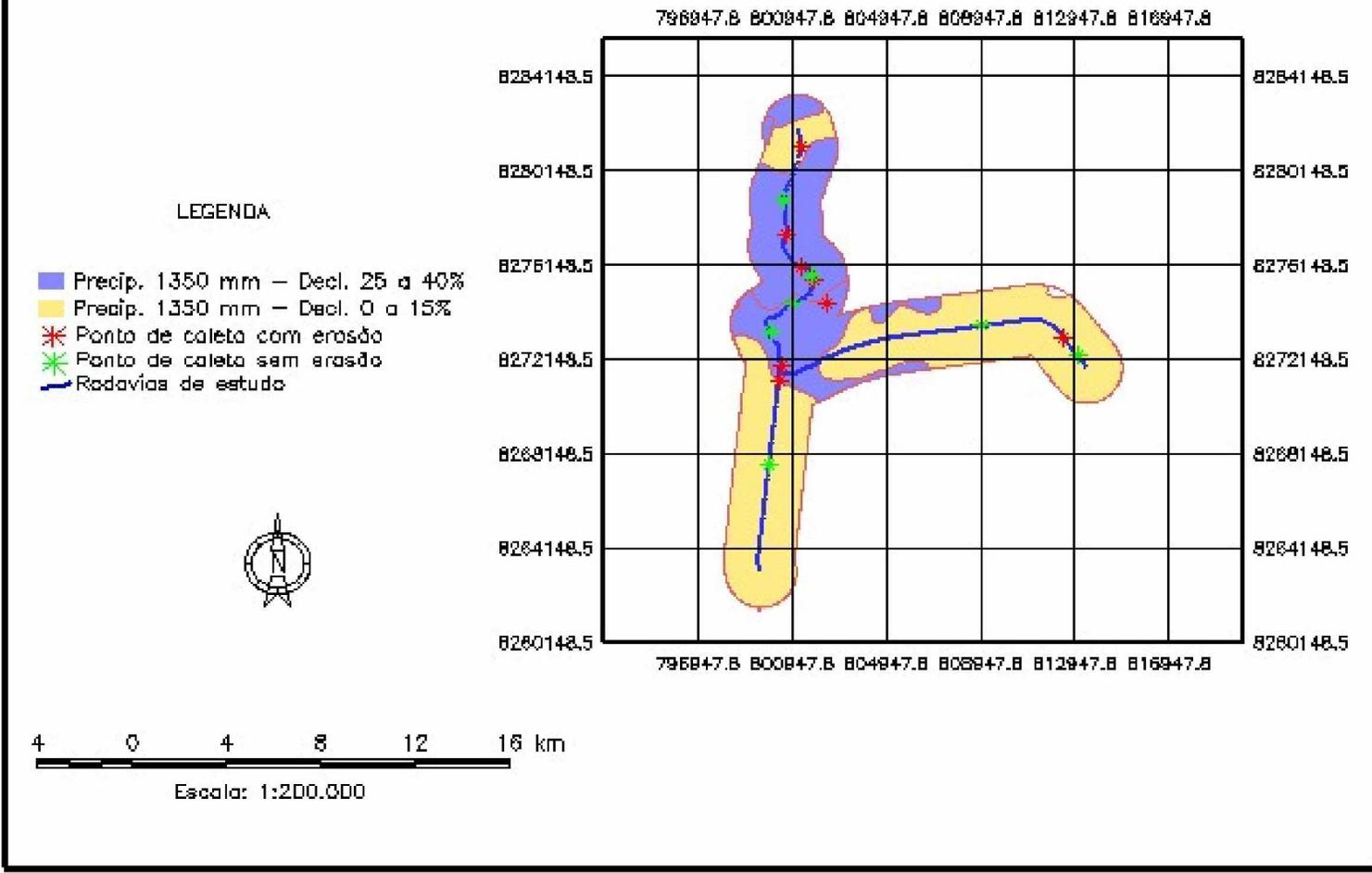
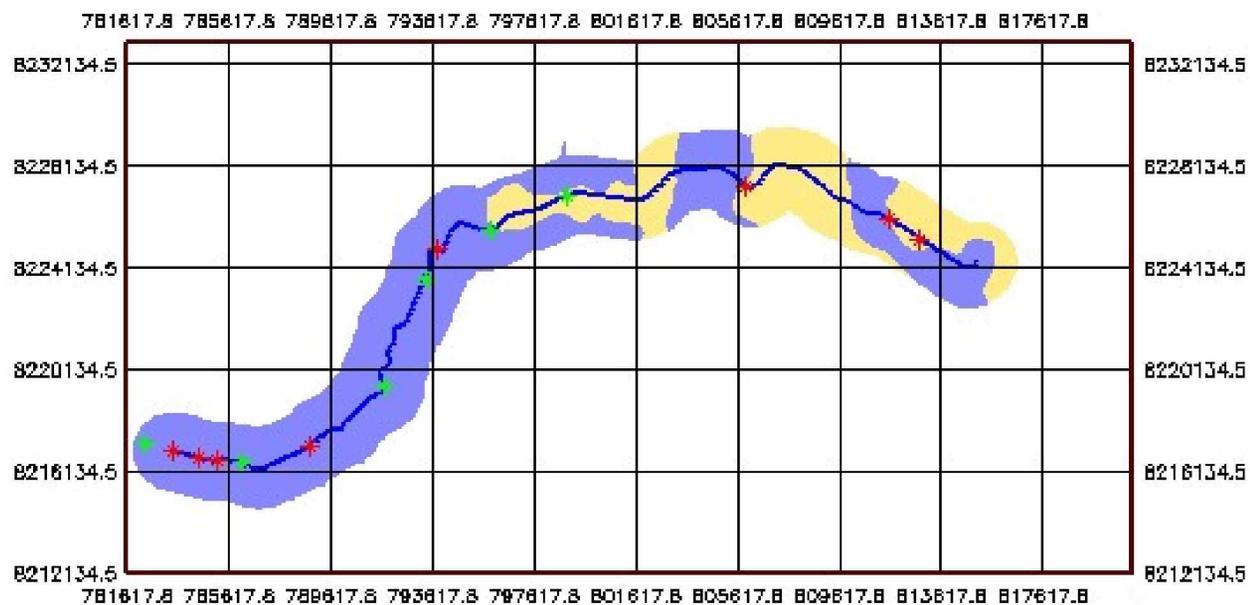


Figura 3.22 - Carta de precipitação e declividade da área de estudo nas rodovias BR-080 e DF-220 com base no Projeto Radam Brasil

CARTA DE PRECIPITAÇÃO E DECLIVIDADE DA ÁREA DE ESTUDO – BR-060 – DF-290



LEGENDA

- Precíp. 1350 mm - Decl. 0 a 15%
- Precíp. 1350 mm - Decl. 25 a 40%
- * Ponto de coleta com erosão
- * Ponto de coleta sem erosão
- Rodovias de estudo



4 0 4 8 12 16 km

Escala: 1:200.000

Figura 3.23 - Carta de precipitação e declividade da área de estudo nas rodovias BR-060 e DF-290 com base no Projeto Radam Brasil

O subgrupo Paraopeba é caracterizado por seqüência de rochas com algum ou nenhum metamorfismo, constituída por quartzitos, siltitos, arenitos finos e folhelos. Assim, o subgrupo Paraopeba é formado numa seqüência de metassiltitos, metargilitos, metarenitos, quartzitos, calcário dolomítico e lentes de metaconglomerados.

O grupo Paranoá tem suas camadas inferiores compostas por diamictitos, folhelhos fossilíferos e arenitos finos; a porção média constitui-se de arenitos médios / grosseiros e conglomerados e a parte superior é representada por deposições argilo-arenosas.

As coberturas detrítico-lateríticas terciárias e quaternárias geralmente se apresentam em porções isoladas com perfil pedológico constituído por três horizontes com variações locais de espessura. O horizonte C ou inferior mostra as primeiras evidências de latinização. Diretamente interligada ao horizonte B (intermediário), por intermédio de línguas de penetração ou zonas de resistato, esta porção é atacada por diversos veios de lixiviação irregulares e entrecruzados, mostrando grande movimentação química, ascendente e/ou descendente. O horizonte B ou intermediário apresenta a maioria das reações químicas e é onde se concentra a fração argilosa com concentração de limonita. Pacotes de canga laterítica observados neste horizonte são responsáveis pela sustentação do relevo. O horizonte A ou superior constitui a camada mais espessa e característica do pavimento detrítico-laterítico. Representam, na maioria das vezes, as superfícies planas dos chapadões. O horizonte em questão raramente mostra evidências de fragmentos rochosos, provenientes dos horizontes localizados imediatamente abaixo, mostrando solos maduros e bastante uniformes. A maior percentagem argilosa e o grande teor ferruginoso denotam a culminação dos processos latossólicos.

3.3.2 - Análise do Mapa Temático de Geomorfologia

No mapa temático de geomorfologia foram identificadas formas tabulares, formas aguçadas e superfícies erosivas tabulares. As formas tabulares apresentam relevos de topo aplanado, com diferentes quantidades e aprofundamento de drenagem, eventualmente separados por vales de fundo plano. As formas aguçadas apresentam relevo de topo contínuo e aguçado, com diferentes ordens de grandeza e de aprofundamento de drenagem, separados geralmente por vales em “V”. As superfícies erosivas tabulares apresentam relevo residual, de topo aplanado provavelmente testemunho de superfície aplanada, geralmente limitada por escarpas erosivas.

3.3.3 - Análise do Mapa Temático de Vegetação

Este mapa temático, por sua vez, apresenta áreas de pastagens, áreas de cerrado e florestas de galeria. As pastagens são geralmente constituídas de capins *Panicum maximum* (colonião) ou *Hyparrhenia rufa* (Jaraguá) ou ainda de braquiária (*Brachiaria spp.*). O cerrado é formado por pequenas árvores tortuosas, espaçadas, sobre um denso revestimento de gramíneas e subarbustos. Como exemplos de espécies presentes na região podem ser citados: pau-terra-folha-larga (*Qualea grandiflora*), pau-terra-folha-miúda (*Qualea parviflora*), Capitão-do-mato (*Terminalia argentea*), Ipê-caraíba (*Tabebuia caraíba*), Jacarandás (*Machaerium spp.* e *Dalbergia spp.*), Jatobás (*Hymenaea stigonocarpa*), Peroba-branca (*Aspidosperma dasycarpon*), Pequi (*Caryocar brasiliense*) e Aroeira (*Astronium urundeuve*). As florestas de galeria são tipicamente ribeirinhas ou se situam nos canais naturais de drenagem. As alturas das árvores variam de 20 a 30 m, apresentando caules finos e, na maioria das vezes, pouca tortuosidade. Entre as árvores remanescentes ainda figuram angico-vermelho (*Piptadenia rígida*), breu-vermelho (*Protium sp.*), Envira (*Xylopia sp.*), pau-tombo (*Tapirira sp.*), Ingá (*Ingá sp.*), goiabinha (*Myrcia sp.*), garapa (*Apuleia leiocarpa*) e ucuba (*Virola sp.*).

3.3.4 - Análise do Mapa Temático de Solos

O mapa temático de solos mostra o solo litólico álico, o podzólico vermelho-amarelo eutrófico, o latossolo vermelho-amarelo, o latossolo vermelho-escuro álico e o cambissolo distrófico. O solo litólico álico é um solo não cascalhamento ou cascalhamento com textura arenosa, associado a solos podzólicos vermelho-amarelo arenosos ou concrecionados. O solo podzólico vermelho-amarelo eutrófico é proeminente e moderado com textura média e argilosa com cascalhamento médio. O latossolo vermelho-amarelo apresenta textura argilosa a muito argilosa. Em algumas regiões podem se apresentar de forma concrecionada ou ainda com veios de quartzo. O latossolo vermelho-escuro álico apresenta textura média a argilosa. Em algumas situações se apresenta muito argiloso. Em outros pontos localizados de menor proporção apresenta-se de forma hidromórfica. O cambissolo distrófico apresenta-se de forma epiconcrecionado e com textura argilosa, com cascalhamento médio.

3.3.5 - Análise do Mapa Temático de Declividade

O mapa temático de declividade apresenta as classes de declividades para cada área da região de estudo. Os valores apontados nesse primeiro momento, ainda sem a aplicação das informações do SRTM, da fotointerpretação das imagens de satélite de alta resolução e dos trabalhos de campo, foram mostradas em duas classes sendo a primeira entre 0 e 15% de declividade e a segunda entre 15 e 40% de declividade.

3.4 - DESCRIÇÃO DOS SOLOS COLETADOS

Os solos (amostras deformadas) foram coletados nos dias 31 de agosto e 01 de setembro de 2004. No primeiro dia as coletas foram desenvolvidas ao longo das rodovias DF-220 e BR-080. Nesta data a temperatura média durante as coletas manteve-se em torno de 30° C. Durante todo o dia o tempo esteve sem chuvas com baixa umidade do ar. No segundo dia foram realizadas coletas nas rodovias DF 290 e BR-060. A temperatura manteve-se, ao longo do dia, em torno de 29° C. O tempo também esteve sem chuvas durante todo o período dos trabalhos, também com umidades baixas.

Na Tabela 3.2 é apresentado o resumo das informações de campo para cada local amostrado e nos itens seguintes faz-se uma descrição dos pontos de coletas. As definições do tipo de solo de cada ponto amostrado foi estabelecida com base nas informações do projeto Radam Brasil (1983).

Descrição dos pontos de coletas:

- Amostra 01: foi retirada no horizonte C de uma área de empréstimo na lateral direita da estrada DF-220, indo para o sentido da BR-080. A estrutura das paredes da área estava bem preservada sem nenhuma presença de processos erosivos. O solo apresentou cor vermelha. Geologia: Cobertura Terciária-Quaternária. Geomorfologia: Formas Tabulares. Declividade de 0 a 15%. Solo: Latossolo Vermelho Álico. Vegetação: Cerrado.(Figura 3.24).

Tabela 3.2 - Resumo das informações de campo para cada ponto amostrado.

Ponto amostral	Rodovia	Local	Horizonte	Cor	Geologia	Geomorfologia	Declividade	Solo	Vegetacao
01	DF-220	Empréstimo lateral direita	C	Vermelha	Cobertura terciária-quaternária	Formas tabulares	0 a 15%	Latossolo vermelho álico	Cerrado
02	DF-220	Empréstimo lateral direita	A	Vermelha	Cobertura terciária-quaternária	Formas tabulares	0 a 15%	Latossolo vermelho álico	Cerrado
03	DF-220	Empréstimo lateral direita	A	Amarela	Cobertura terciária-quaternária	Formas tabulares	0 a 15%	Latossolo vermelho álico	Floresta de galeria
04	DF-220	Talude de corte	E	Amarela	Cobertura terciária-quaternária	Formas tabulares	25 a 40%	Latossolo vermelho álico	Cerrado
05	BR-080	Corte lateral direita	C	Amarelo Claro	Grupo Paraopeba	Formas tabulares	0 a 15%	Cambissolo distrófico	Cerrado
06	BR-080	Corte lateral direita	C	Vermelha	Grupo Paranoa	Formas aguçadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Cerrado
07	BR-080	Corte lat. direita/esquerda	B	Amarela	Grupo Paraopeba	Formas aguçadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Cerrado
08	BR-080	Corte lateral esquerda	B	Amarela	Grupo Paraopeba	Formas aguçadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Cerrado
09	BR-080	Corte lat. direita/esquerda	C	Amarela	Grupo Paraopeba	Formas aguçadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Cerrado
10	BR-080	Corte lateral esquerda	B	Amarela	Grupo Paraopeba	Formas aguçadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Cerrado
11	BR-080	Corte lateral esquerda	B	Amarela	Grupo Paranoá	Formas aguçadas	25 a 40%	Litólico álico	Cerrado
12	BR-080	Corte lateral esquerda	A	Vermelha	Grupo Paranoá	Formas aguçadas	25 a 40%	Litólico álico	Cerrado
13	BR-080	Corte lat. direita/esquerda	C	Vermelha	Grupo Paranoá	Formas aguçadas	25 a 40%	Litólico álico	Cerrado
14	BR-080	Corte lateral esquerda	A	Marron	Grupo Paraopeba	Formas tabulares	0 a 15%	Latossolo verm. amarelo	Floresta de galeria
15	BR-080	Empréstimo lat. esquerda	A	Vermelha	Cobertura terciária-quaternária	Formas tabulares	0 a 15%	Latossolo verm. amarelo	Cerrado

Tabela 3.2 - Resumo das informações de campo para cada ponto amostrado. (continuação)

Ponto amostral	Rodovia	Local	Horizonte	Cor	Geologia	Geomorfologia	Declividade	Solo	Vegetacao
16	BR-060	Corte lateral direita	B	Amarela	Formacao Ibiá	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Cerrado
17	BR-060	Corte lateral direita	C	Marron	Formacao Ibiá	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Pastagem
18	BR-060	Empréstimo lat. esquerda	E	Marron	Formacao Ibiá	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Pastagem
19	BR-060	Corte lateral direita	E	Branca	Grupo Paraopeba	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Pastagem
20	BR-060	Plano dir. / esq.	B	Marron	Grupo Paraopeba	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Pastagem
21	BR-060	Corte lat. direita/esquerda	C	Branca	Grupo Paraopeba	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Pastagem
22	BR-060	Corte lateral direita	B	Marron	Grupo Paraopeba	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Pastagem
23	BR-060	Corte lat. direita/esquerda	C	Cinza	Formacao Ibiá	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Pastagem
24	BR-060	Corte lateral direita	C	Amarela	Grupo Paraopeba	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Pastagem
25	BR-060	Corte lateral direita	E	Amarela	Grupo Paraopeba	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Pastagem
26	DF-290	Corte lat. direita/esquerda	C	Marron	Grupo Paraopeba	Formas agucadas	25 a 40%	Cambissolo distrófico	Pastagem
27	DF-290	Corte lat. direita/esquerda	B	Marron	Cobertura terciária- quaternária	Superficie erosiva tabular	0 a 15%	Latossolo vermelho álico	Floresta de galeria
28	DF-290	Corte lat. direita/esquerda	E	Marron	Formacao Ibia	Formas agucadas	0 a 15%	Cambissolo distrófico	Floresta de galeria
29	DF-290	Corte lat. direita/esquerda	E	Amarela	Grupo Paraopeba	Formas tabulares	0 a 15%	Latossolo vermelho álico	Cerrado
30	DF-290	Empréstimo lat. direita	B	Vermelha	Cobertura terciária- quaternária	Formas tabulares	0 a 15%	Latossolo vermelho álico	Cerrado



Figura 3.24 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 01 – DF-220

- Amostra 02: retirada no horizonte A de um empréstimo na lateral direita da DF-220, no sentido para a BR-080. Foram evidenciados trechos com processos erosivos nas paredes do mesmo. Solo de cor avermelhada. Geologia: Cobertura Terciária-Quaternária. Geomorfologia: Formas Tabulares. Declividade de 0 a 15%. Solo: Latossolo Vermelho Álico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.25).



Figura 3.25 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 02 – DF-220

- Amostra 03: também retirada no horizonte A de uma caixa de empréstimo na lateral direita da DF-220, sentido para a BR-080. Nenhum processo erosivo foi identificado nas paredes da área de empréstimo. Solo de cor amarela. Geologia: Cobertura Terciária-Quaternária. Geomorfologia: Formas Tabulares. Declividade de 0 a 15%. Solo: Latossolo Vermelho Álico. Vegetação: Floresta de Galeria. (Figura 3.26)



Figura 3.26 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 03 – DF-220

- Amostra 04: retirada no horizonte E de um talude de corte, na margem direita da rodovia DF-290 no mesmo sentido para a BR-080. Foi evidenciada claramente a presença de processos erosivos ao longo do talude. Solo de cor amarela. Geologia: Cobertura Terciária-Quaternária. Geomorfologia: Formas Tabulares. Declividade de 25 a 40%. Solo: Latossolo Vermelho Álico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.27).



Figura 3.27 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 04 – BR-080

- Amostra 05: retirada no horizonte C de um corte na lateral direita da rodovia BR-080 no sentido para Brasília. Processos erosivos foram identificados ao longo do corte. Solo de cor amarelo claro. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Tabulares. Declividade de 0 a 15%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.28)



Figura 3.28 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 05 – BR-080

- Amostra 06: também retirada no horizonte C de um corte na lateral direita da rodovia BR-080 no mesmo sentido para Brasília. Não foram evidenciados processos erosivos no mesmo. Solo de cor vermelha. Geologia: Grupo Paranoá. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: cambissolo Distrófico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.29)



Figura 3.29 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 06 – BR-080

- Amostra 07: localizada no horizonte B em cortes nas laterais esquerda e direita da rodovia BR-080 no sentido para Brasília. Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor amarela. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.30).



Figura 3.30 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 07 – BR-080

- Amostra 08: coletada no horizonte B de um corte na lateral esquerda da rodovia BR-080 no sentido para Brasília. Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor amarela. Geologia: Grupo paraopeba: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.31).



Figura 3.31 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 08 – BR-080

- Amostra 09: coletada no horizonte C em cortes localizados nas laterais esquerda e direita da rodovia BR-080 no sentido para Brasília. Não foram evidenciados processos erosivos na área. As paredes dos cortes estão preservadas. Solo de cor amarela. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.32).



Figura 3.32 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 09 – BR-080

- Amostra 10: coletada no horizonte B de corte localizado na lateral esquerda da rodovia BR-080 no sentido para Brasília. Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor amarela. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.33).



Figura 3.33 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 10 – BR-080

- Amostra 11: coletada no horizonte B de corte localizado na lateral esquerda da rodovia BR-080 no sentido para Brasília. Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor amarela. Geologia: Grupo Paranoá. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Litólico Álico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.34).



Figura 3.34 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 11 – BR-080

- Amostra 12: coletada no horizonte A de corte localizado na lateral esquerda da rodovia BR-080 no sentido para Brasília. Não foram evidenciados processos erosivos na área, apesar do corte estar quase na vertical. Solo de cor vermelha. Geologia: Grupo Paranoá. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Litólico Álico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.35).



Figura 3.35 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 12 – BR-080

- Amostra 13: coletada no horizonte C de corte localizado nas laterais esquerda e direita da rodovia BR-080 no sentido para Brasília. Não foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor vermelha. Geologia: Grupo Paranoá. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Litólico Álico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.36).



Figura 3.36 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 13 – BR-080

- Amostra 14: coletada no horizonte A de corte localizado na lateral esquerda da rodovia BR-080 no sentido para Brasília. Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor marrom. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Tabulares. Declividade de 0 a 15%. Solo: Latossolo Vermelho Amarelo. Vegetação: Floresta de Galeria. (Figura 3.37).



Figura 3.37 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 14 – BR-080

- Amostra 15: também coletada no horizonte A de empréstimo localizado na lateral esquerda da rodovia BR-080 no sentido para Brasília. Não foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor vermelha. Geologia: Cobertura Terciária-Quaternária. Geomorfologia: Formas Tabulares. Declividade de 0 a 15%. Solo: Latossolo Vermelho Amarelo. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.38).



Figura 3.38 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 15 – BR-080

- Amostra 16: coletada no horizonte B de corte localizado na lateral direita da rodovia BR-060 no sentido de Goiânia para Brasília. Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor amarela. Geologia: Formação Ibiá. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.39).



Figura 3.39 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 16 – BR-060

- Amostra 17: coletada no horizonte C de corte localizado na lateral direita da rodovia BR-060 no sentido de Goiânia para Brasília. Não foram evidenciados processos erosivos na área, apesar da altura do corte. Solo de cor marrom. Geologia: Formação Ibiá. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Pastagem. (Figura 3.40).



Figura 3.40 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 17 – BR-060

- Amostra 18: coletada no horizonte E de empréstimo na lateral esquerda da rodovia BR-060 nas proximidades do Rio Areia, no sentido de Goiânia para Brasília. Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor marrom. Geologia: Formação Ibiá. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Pastagem. (Figura 3.41).



Figura 3.41 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 18 – BR-060

- Amostra 19: coletada no horizonte E de corte na lateral direita da rodovia BR-060 no sentido de Goiânia para Brasília. Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor branca. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Pastagem. (Figura 3.42).



Figura 3.42 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 19 – BR-060

- Amostra 20: coletada no horizonte B de região plana às margens da rodovia BR-060 no sentido de Goiânia para Brasília. Rodovia foi construída sobre o terreno natural em “bota dentro”. Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor marrom. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Pastagem. (Figura 3.43).



Figura 3.43 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 20 – BR-060

- Amostra 21: coletada no horizonte C de corte da rodovia BR-060 sentido Goiânia - Brasília. Não foram evidenciados processos erosivos na área. Solo cor branca. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Pastagem. (Figura 3.44).



Figura 3.44 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 21 – BR-060

- Amostra 22: coletada no horizonte B de corte localizado na lateral direita da rodovia BR-060 no sentido de Goiânia para Brasília. Foram evidenciados processos erosivos localizados na área. Solo de cor marron. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Pastagem. (Figura 3.45).



Figura 3.45 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 22 – BR-060

- Amostra 23: coletada no horizonte C em cortes localizados nas laterais direita e esquerda da rodovia BR-060 no sentido de Goiânia para Brasília. Não foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor cinza. Geologia: Formação Ibiá. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Pastagem. (Figura 3.46).



Figura 3.46 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 23 – BR-060

- Amostra 24: coletada em horizonte C de corte localizado na lateral direita da rodovia BR-060 no sentido de Goiânia para Brasília. Não foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor amarela. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Pastagem. (Figura 3.47).



Figura 3.47 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 24 – BR-060

- Amostra 25: coletada em horizonte E de corte localizado na lateral direita da rodovia BR-060, na entrada para a DF- 290, no acesso ao Gama (DF). Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor amarela. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Pastagem. (Figura 3.48).



Figura 3.48 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 25 – BR-060

- Amostra 26: coletada no horizonte C de cortes nas laterais esquerda e direita da rodovia DF- 290, no sentido para o Gama (DF). Não foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor marrom. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 25 a 40%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Pastagem. (Figura 3.49).



Figura 3.49 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 26 – DF-290

- Amostra 27: coletada em horizonte B em cortes localizados nas laterais esquerda e direita da rodovia DF- 290, no sentido para o Gama (DF). Não foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor marrom. Geologia: Cobertura Terciária-Quaternária. Geomorfologia: Superfície Erosiva Tabular. Declividade de 0 a 15%. Solo: Latossolo Vermelho Álico. Vegetação: Floresta de Galeria. (Figura 3.50).



Figura 3.50 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 27 – DF-290

- Amostra 28: coletada no horizonte E em cortes nas laterais esquerda e direita da rodovia DF- 290, sentido para o Gama (DF). Foram evidenciados processos erosivos. Solo de cor marrom. Geologia: Formação Ibiá. Geomorfologia: Formas Aguçadas. Declividade de 0 a 15%. Solo: Cambissolo Distrófico. Vegetação: Floresta de Galeria. (Figura 3.51).



Figura 3.51 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 28 – DF-290

- Amostra 29: coletada em horizonte E em cortes localizados nas laterais esquerda e direita da rodovia DF- 290, no sentido para o Gama (DF). Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor amarela. Geologia: Grupo Paraopeba. Geomorfologia: Formas Tabulares. Declividade de 0 a 15%. Solo: Latossolo Vermelho Álico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.52).



Figura 3.52 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 29 – DF-290

- Amostra 30: coletada no horizonte B de empréstimo localizado na lateral direita da rodovia DF- 290, no sentido para o Gama (DF). Foram evidenciados processos erosivos na área. Solo de cor vermelha sem presença de Mica. Geologia: Cobertura Terciária-Quaternária. Geomorfologia: Formas Tabulares. Declividade: 0 a 5%. Solos: Latossolo Vermelho Álico. Vegetação: Cerrado. (Figura 3.53).



Figura 3.53 – Detalhe do ponto de coleta da amostra 30 – DF-290

3.5 - PROCESSO DE VALIDAÇÃO DAS AMOSTRAS SELECIONADAS

Para validar o pressuposto de que os processos erosivos estão em função de suas características físicas e de ocupação humana, tornou-se necessário garantir que os pontos amostrais escolhidos para a análise não tivessem nenhuma influência de eventos externos diretos relacionados a situações que pudessem provocar processos erosivos em qualquer tipo de terreno, como, por exemplo, dispositivos de drenagem sem manutenção, provocando fluxo direto de água nos solos. Portanto, todas as amostras levantadas nos pontos de estudo deveriam ter as mesmas condições naturais em campo.

Desta forma, foi feito um estudo para a confirmação da probabilidade, ou não, da propensão a processos erosivos em alguns pontos amostrais pré-selecionados (pontos 2, 3, 6, 8, 9, 22, 24, 25) a partir de amostras indeformadas. Esses pontos foram escolhidos estrategicamente em função de se cobrir todas as variações possíveis das condições físicas dos solos. Essas amostras indeformadas (3 amostras por ponto estudado) foram submetidas ao ensaio de erodibilidade conforme preconizado por Nogami e Villibor (1979) e modificado por Pejon (1992). Os resultados confirmaram a tendência à erosão nos solos localizados em pontos com presença das mesmas e tendência à estabilidade nos solos extraídos nos pontos estáveis das rodovias.

O princípio do ensaio preconizado por Nogami & Villibor (1979) e modificado por Pejon (1992) está relacionado a dois fatores presentes nos solos: a destacabilidade e a transportabilidade de suas partículas. Vilar (1987) explica que a destacabilidade dos solos está associada às características de seus materiais finos, assim como às forças de natureza superficial. Já a transportabilidade estaria associada às características físicas dos solos, como o tamanho e formas de suas partículas. Destaca, em conclusão que, quanto maior as partículas dos solos menor a sua transportabilidade e maior a sua destacabilidade. Em contrapartida, quanto mais finos os solos, devido às suas forças de coesão, menor será a destacabilidade. Entretanto, uma vez destacadas essas partículas, maior a facilidade em seu transporte.

Pejon (1992) ressalta que as propriedades dos solos, tais como umidade e condições de infiltração de água, também exercem influência nos solos com relação ao surgimento de processos erosivos. Afirma que, quanto mais água infiltrar e com maior rapidez, menor a possibilidade de escoamento superficial e, em consequência, de ocorrer erosão. Salienta ainda

que o teor de umidade também interfere, uma vez que, quanto mais elevada a umidade natural quando do início da precipitação, mais rapidamente a capacidade de infiltração é atingida e, em consequência, mais rapidamente o escoamento superficial irá ocorrer.

Desta forma o método proposto por Nogami & Villibor (1979) e modificado por Pejon (1992) está baseado em dois ensaios: absorção de água e perda de peso por imersão, a partir de amostras indeformadas. Essas amostras foram extraídas em campo, a partir de cilindros de PVC com ponta biselada, com dimensões de 40 mm de diâmetro por 20 mm de altura (Figura 3.54). Os locais pré-determinados, num total de oito amostras, sendo quatro em locais com processos erosivos e quatro em locais preservados, foram definidos na tentativa de cobrir geograficamente toda a área de estudo. Quando amostras vizinhas apresentavam algumas características semelhantes entre si, apenas uma delas era extraída para o ensaio de erodibilidade. Os cilindros coletados, sendo três para cada ponto amostrado, ficaram secando ao ar e na sombra por um período de uma semana. Após esse período passou-se a execução dos ensaios de absorção de água e perda de massa por imersão. A seguir são apresentados os detalhes desses ensaios.



Figura 3.54 - Detalhe de extração de amostra indeformada no campo.

3.5.1 - O Ensaio de Absorção de Água

O equipamento utilizado no ensaio foi montado no próprio laboratório, adaptado a partir dos modelos propostos por Nogami & Villibor (1679) e Pejon (1992). Consiste em um recipiente cilíndrico, com a dimensão de 50 mm, ligado a um tubo de PVC transparente com diâmetro de 10 mm na horizontal. Uma régua foi afixada ao longo desse tubo a fim de estabelecer uma graduação na mesma. (Figura 3.55). Para cada ensaio o conjunto foi preenchido com água e na porção superior do recipiente adaptou-se uma pedra porosa, que foi sempre mantida saturada. As amostras, ainda nos seus respectivos cilindros de amostragem em campo, foram pesadas e em seguida colocadas sobre o conjunto de ensaio como mostrado na Figura 3.55, iniciando-se nesse momento a contagem de tempo. Leituras do volume de água absorvida em função do tempo foram realizadas, até que a água atingisse o topo das amostras. (Figura 3.56).



Figura 3.55 - Detalhe do equipamento utilizado no ensaio de absorção.



Figura 3.56 - Detalhe da água atingindo o topo da amostra.

Para a obtenção dos índices de absorção (S) dos solos ensaiados montou-se gráficos, como demonstrado nas Figuras 3.57 a 3.64, do volume de água absorvida por unidade de área da base do equipamento (q) em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}). O índice de absorção (S) de cada solo é determinado a partir do coeficiente angular das retas, ou seja, $S = q / \sqrt{t}$.

3.5.2 - O Ensaio de Perda de Peso por Imersão

O segundo ensaio foi o de perda de peso por imersão – Finalizados os ensaios de absorção, os cilindros com as amostras úmidas foram pesados e colocados em um recipiente na vertical com a sua face superior a cerca de 2,0 mm do nível da água. As amostras foram mantidas submersas por 24 h. Os materiais desprendidos pelos conjuntos foram captados por uma cápsula metálica colocada abaixo das faces livres dos mesmos. Com esse material foi determinada a perda de peso em porcentagem do peso inicial seca da amostra (P), calculando o peso seco do material desprendido da amostra durante a imersão em água em relação ao peso seco total de solo utilizado no início do ensaio.

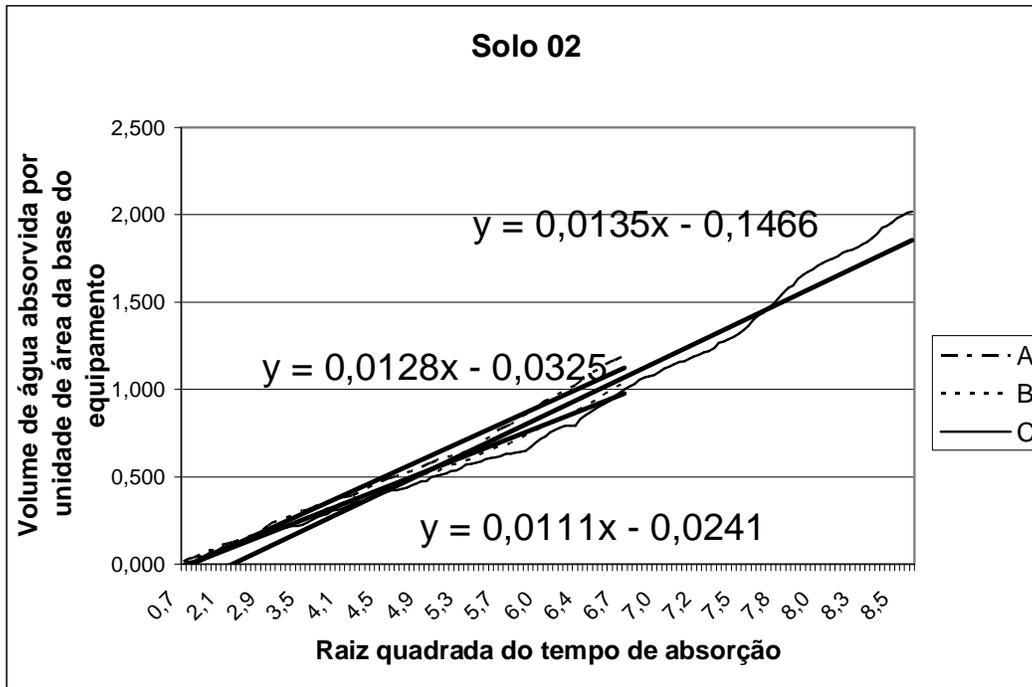


Figura 3.57 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}) para solo 02.

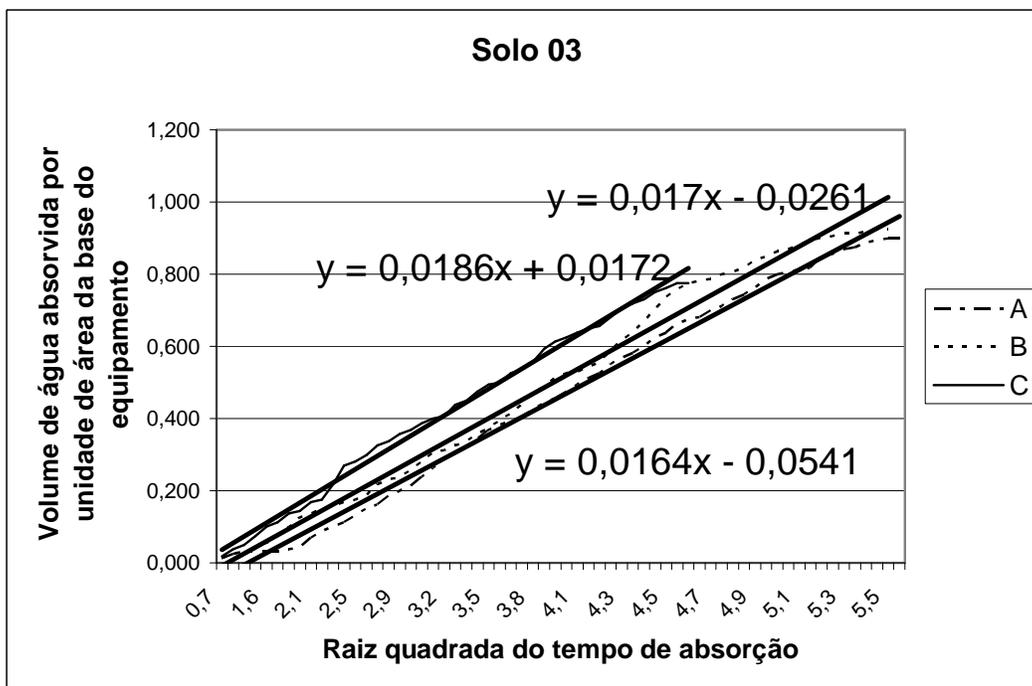


Figura 3.58 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}) para solo 03.

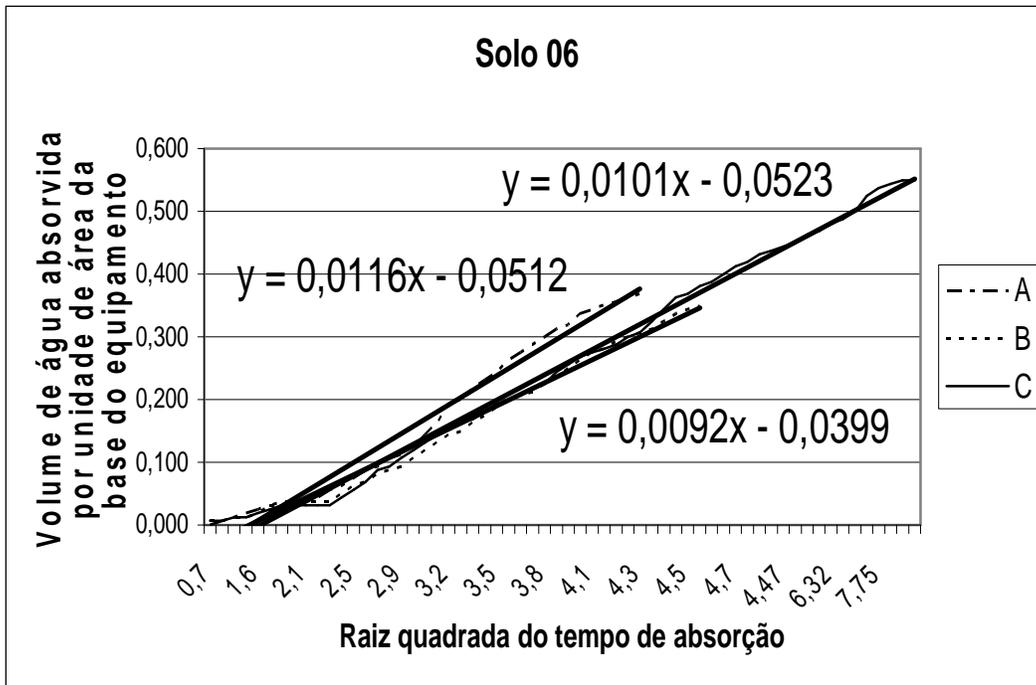


Figura 3.59 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}) para solo 06.

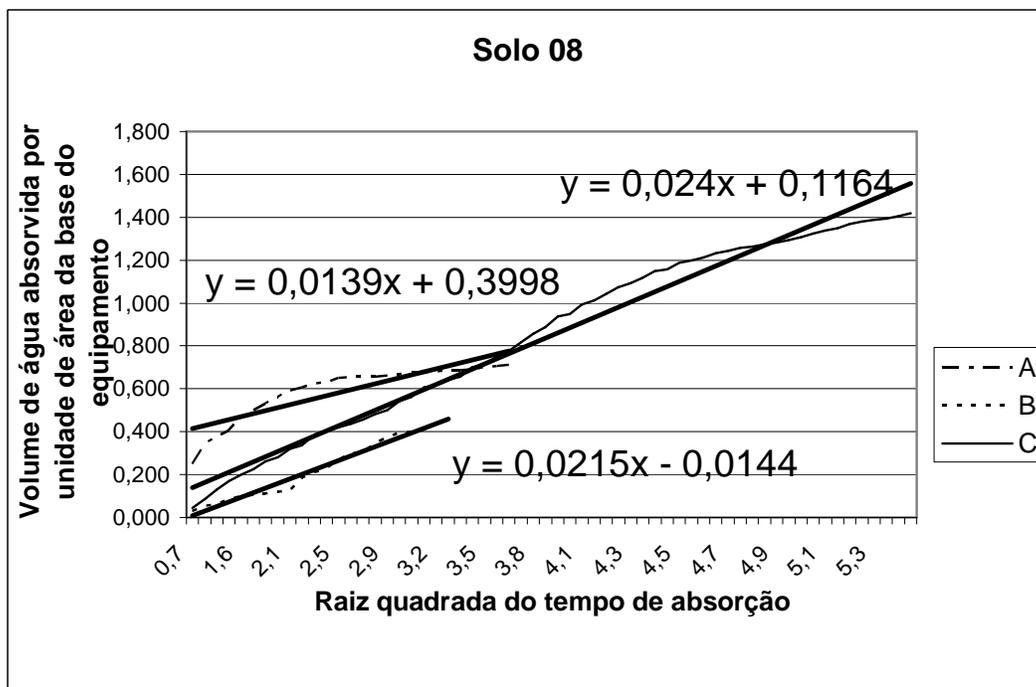


Figura 3.60 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}) para solo 08

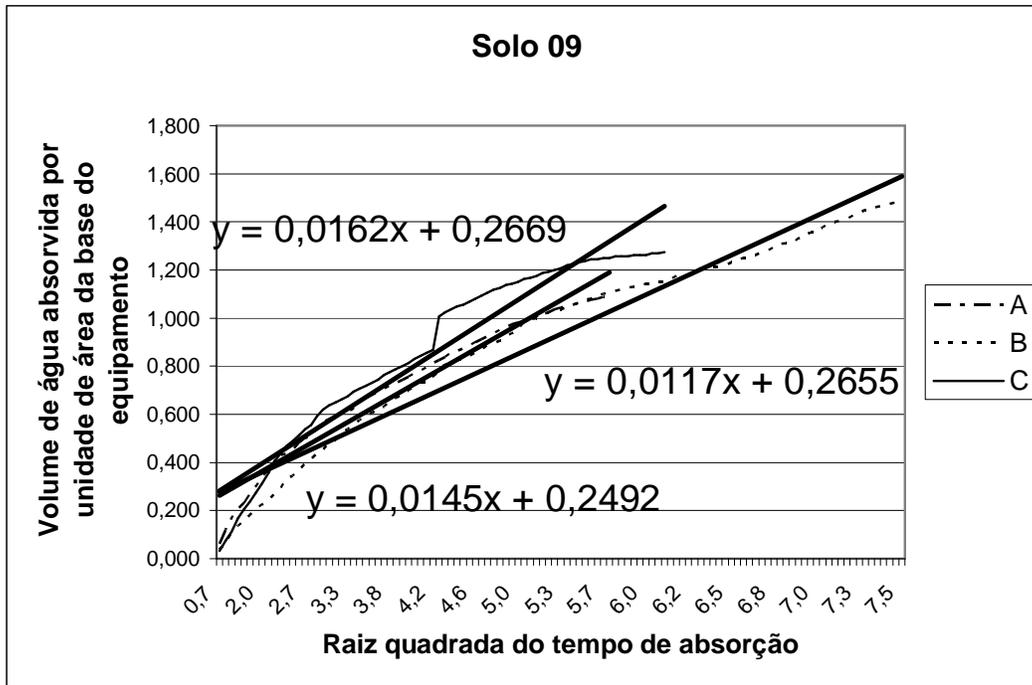


Figura 3.61 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}) para solo 09.

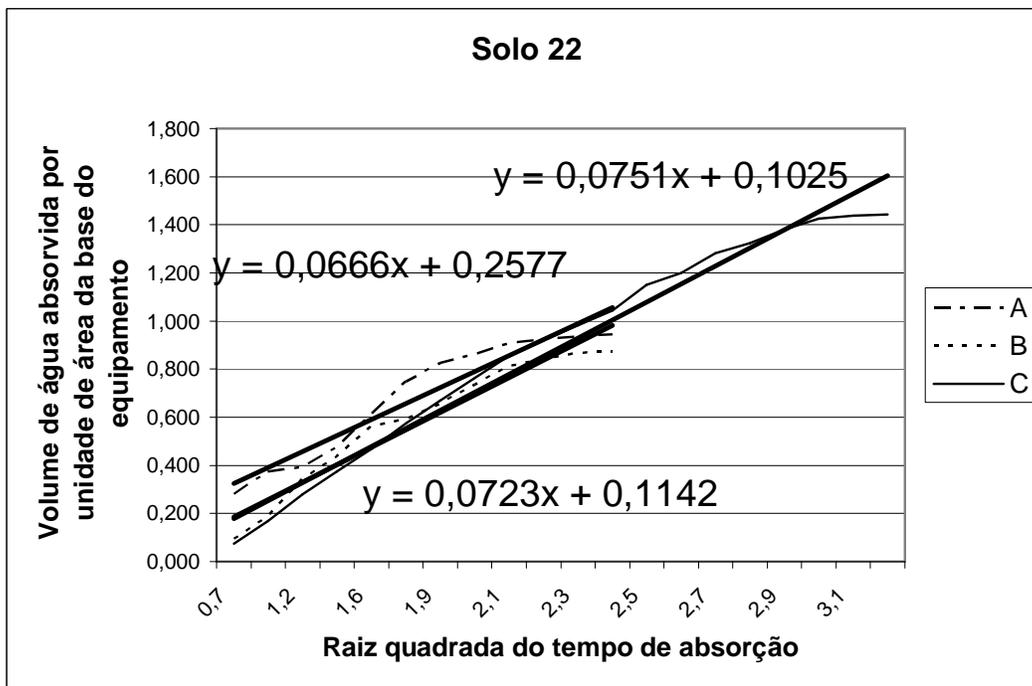


Figura 3.62 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}) para solo 22

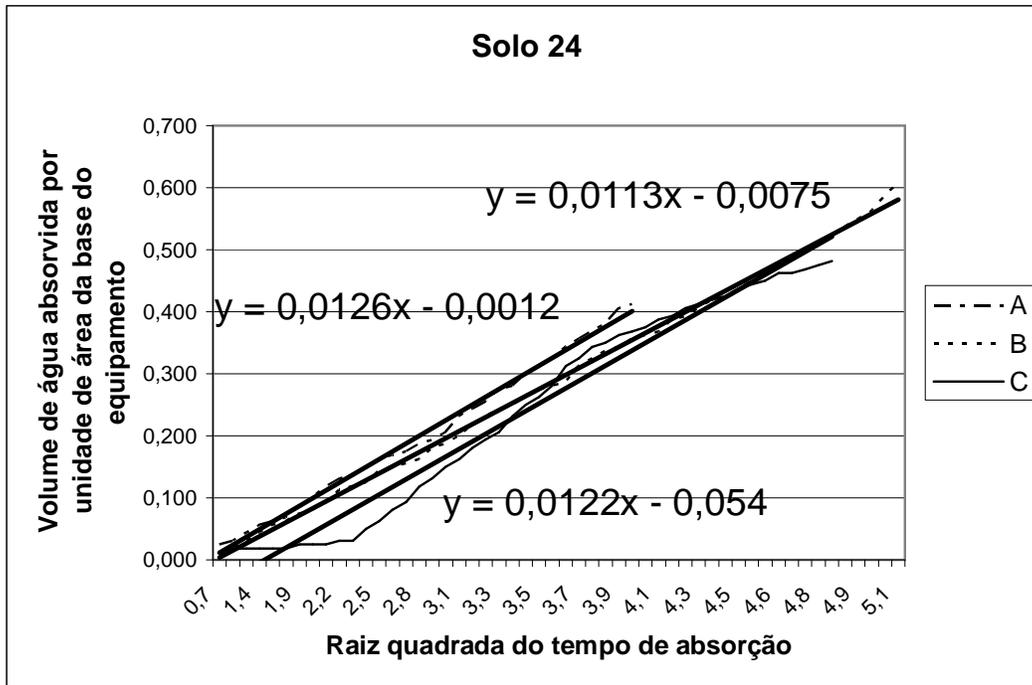


Figura 3.63 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}) para solo 24

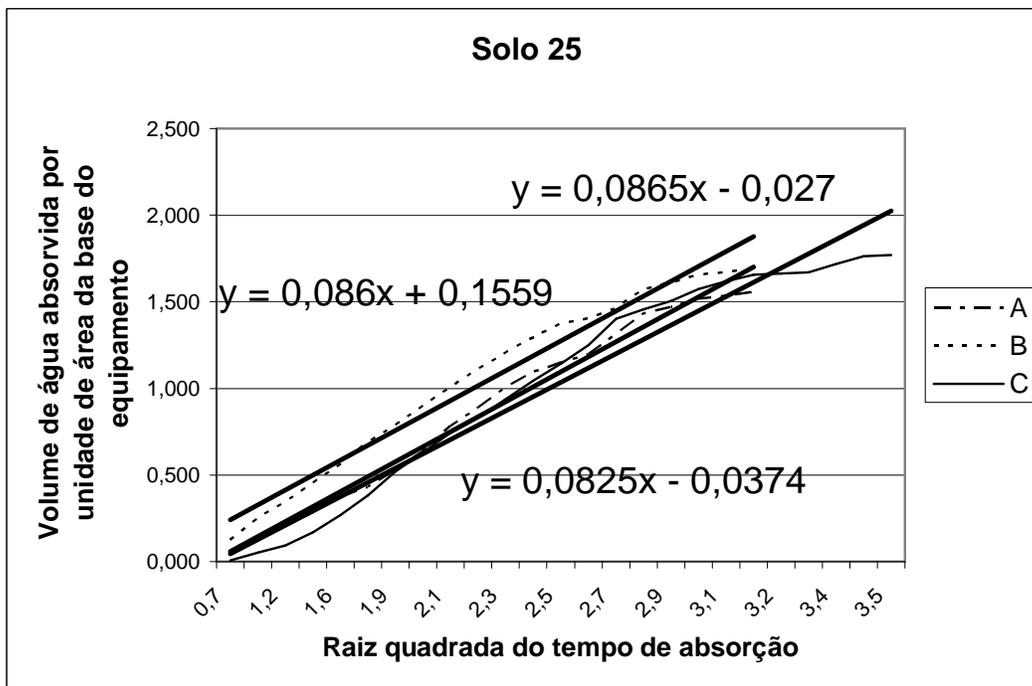


Figura 3.64 - Gráfico de volume de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}) para solo 25.

3.5.3 - Análise dos Resultados Obtidos nos Ensaios

Com os resultados dos ensaios de perda de peso por imersão e índice de absorção de água foi montado o gráfico $P f(S)$, como demonstrado na Figura 3.65. Os solos 2, 8, 22 e 25 foram coletados em pontos com erosão e os solos 3, 6, 9 e 24 foram coletados em locais sem a presença de erosão.

Pelo gráfico da Figura 3.65 pode-se perceber que apenas o solo 25 não foi corretamente classificado, pois o gráfico mostra que o mesmo pertence ao tramo onde deveriam se localizar os solos não erodíveis. Entretanto, Pejon (1992) comprovou em sua análise, a partir de resultados de 56 amostras que esta equação deveria ser corrigida para $P = 40 S$. Tal correção deveria acontecer em função de dois fatores: presença de grande quantidade de matéria orgânica nos solos e presença de materiais residuais que apesar de alta erodibilidade evidenciada em campo, produzem valores compatíveis com solos não erodíveis, em função de se apresentarem pouco evoluídos e, em consequência, conservarem uma parte da coesão como em sua rocha original. Na extração do solo 25 em campo pode-se evidenciar a presença de material residual no solo.

Com a adaptação proposta por Pejon (1992) alterando a relação $P = 52 S$ para $P = 40 S$, em função dos solos que apresentavam altos teores de matéria orgânica e/ou residuais e que por consequência formavam grumos estáveis, resultando em altas forças superficiais, principalmente em materiais finos, dificultando o processo erosivo, foi montado um novo gráfico, exemplificado na Figura 3.66. Nesta nova proposta todos os solos analisados foram localizados conforme suas características encontradas em campo e assim adotadas neste trabalho.

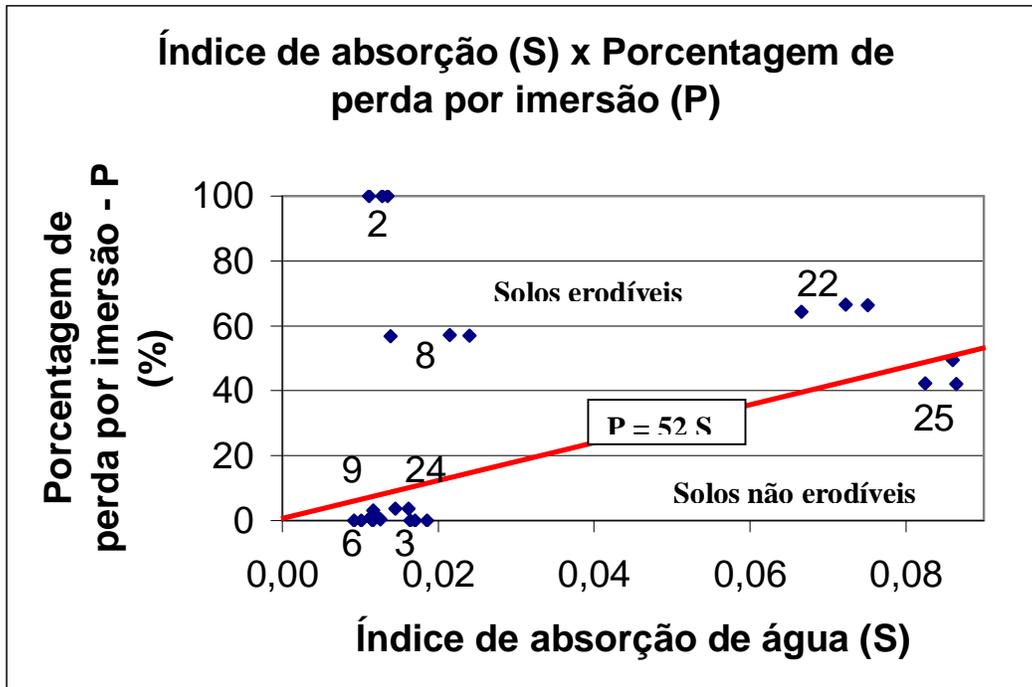


Figura 3.65 - Gráfico proposto por Nogami e Villibor (1979) - Índice de Absorção de Água x Porcentagem de Perda por Imersão

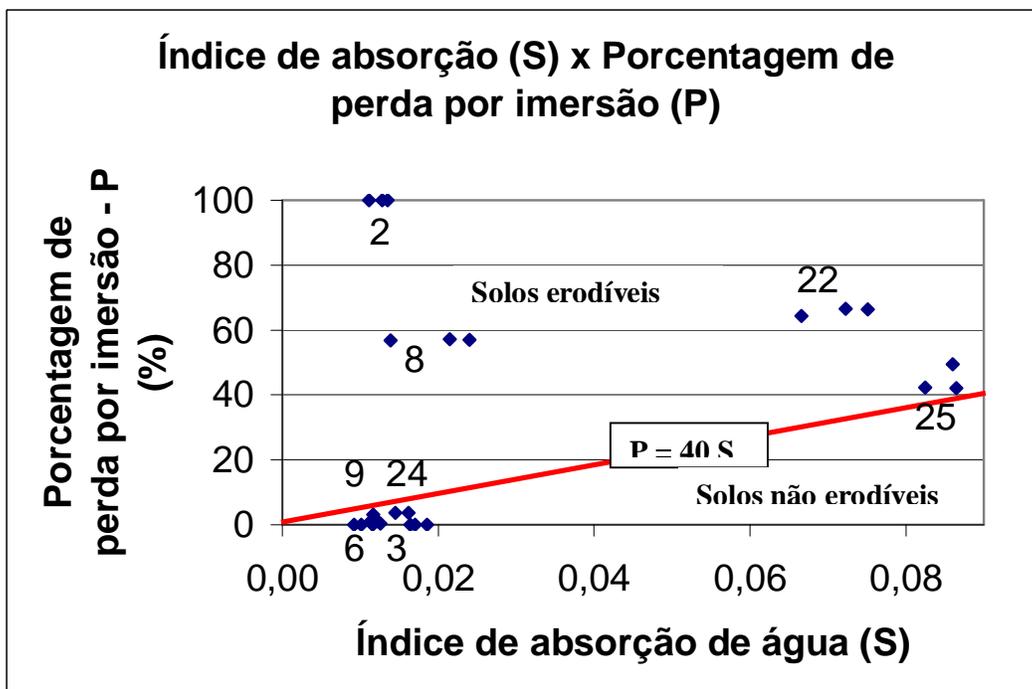


Figura 3.66 - Gráfico proposto por Pejon (1992) - Índice de Absorção de Água x Porcentagem de Perda por Imersão

4 - MODELAGEM PONTUAL DETERMINÍSTICA DOS PROCESSOS EROSIVOS

A base de dados, necessária para a modelagem, foi estabelecida a partir da compartimentação das informações dos mapas temáticos de geologia, geomorfologia, vegetação, declividade, tipo e uso e ocupação do solo extraídos diretamente das cartas temáticas do projeto Radam Brasil (Escala 1:1.000.000), além dos resultados dos ensaios de laboratório para as umidades natural e higroscópica, limites de liquidez e plasticidade, massa específica aparente seca e classificação MCT.

Uma vez estruturada a base de dados, o passo seguinte consistiu no tratamento estatístico dos dados na expectativa de se eliminar algum ponto discrepante (*outlier*) na amostra (Tabela 4.1). Para esta análise foram calculados a média e o desvio-padrão de cada uma das variáveis. Pontos discrepantes, segundo Tchebychev (in Triola, 1999) são os dados que estão compreendidos fora do intervalo delimitado pela média mais ou menos três desvios-padrão e são considerados elementos amostrais não representativos de sua população de origem. Para esta pesquisa essas situações não foram encontradas.

4.1 - PRIMEIRA FASE DA MODELAGEM: SELEÇÃO DE VARIÁVEIS

Depois de tratados os dados iniciou-se o processo de seleção das variáveis para a modelagem. Para isso, foi realizada a análise de correlação para identificar a relação existente entre as variáveis em análise (Tabela 4.2). Valores próximos de zero indicam que as variáveis não guardam nenhuma relação funcional matemática entre si. Valores próximos de um indicam que as duas variáveis em análise apresentam uma relação funcional bem definida. Dessa forma valores de correlação próximos de zero entre alguma variável com a variável que caracteriza a erosão mostra que essa variável não tem influência sobre os processos erosivos. Valores próximos de um, na correlação entre uma variável e a variável erosão, indicam uma relação matemática entre essas duas variáveis. Assim, se duas variáveis, que seriam consideradas como influenciadoras nos processos erosivos (variáveis independentes) apresentassem valores iguais a um em sua análise de correlação, uma delas deveria ser eliminada da análise, pois estaria explicando o mesmo fenômeno influenciador da erosão.

Tabela 4.2 - Valores de correlações entre as variáveis (1)

	Erosão	W nat.	W hig.	W l	W p	ρ	pH H ₂ O	pH KCl	Delta pH	MCT-c'
Erosão	1,000									
W nat.	0,323	1,000								
W hig.	-0,192	0,513	1,000							
W l	0,127	0,596	0,607	1,000						
W p	0,021	0,506	0,462	0,527	1,000					
ρ	0,085	-0,056	-0,275	-0,097	0,068	1,000				
pH H ₂ O	-0,197	0,134	0,054	-0,021	-0,048	-0,140	1,000			
pH KCl	-0,277	0,349	0,507	0,452	0,357	-0,022	0,574	1,000		
Delta pH	0,160	-0,301	-0,561	-0,560	-0,471	-0,096	0,186	-0,698	1,000	
MCT-c'	0,157	0,562	0,536	0,459	0,477	-0,257	-0,054	0,070	-0,131	1,000

Com relação a correlação “1” entre as erosões e a variável explicativa geomorfologia, um modelo expedito poderá ser desenvolvido, como premissa básica, na tentativa de caracterizar os processos erosivos em função dessa variável. Esta seria uma das propostas para trabalhos futuros a partir deste estudo ora apresentado. Nesse trabalho o foco se deu sobre a consideração de mais variáveis, ao mesmo tempo, na previsão dos processos erosivos.

4.2 - SEGUNDA FASE DA MODELAGEM: ANÁLISE DE REGRESSÃO – PRIMEIRO MODELO

As variáveis adotadas como independentes nessa primeira fase da modelagem foram as variáveis geomorfologia, geologia, ocupação do solo, declividade, solos, limite de liquidez (w_l), limite de plasticidade (w_p), umidade natural (w), umidade higroscópica (w_{hig}), massa específica real dos grãos (ρ), pH em água (pH_{H_2O}), pH em KCl (pH_{KCl}), Delta pH (ΔpH), parâmetro c' da classificação expedita MCT (MCT- c'). A variável dependente estudada como objetivo deste estudo foi a erosão. Como a variável erosão inicialmente apresentava-se em forma alfabética com opções sim ou não, utilizou-se o conceito de variável “Dummy” atribuindo-se valores 1 ou 0 para caracterizar, respectivamente, solos com e sem processos erosivos (Tabela 4.1).

Como as variáveis geologia, geomorfologia, ocupação do solo, declividade e tipos de solos apresentavam-se distribuídas em classes temáticas sem valores numéricos atribuídos a cada uma dessas classes, foram estabelecidos pesos a cada uma das classes temáticas de cada uma das cartas temáticas. Estes pesos foram dados em função da quantidade de pontos amostrais com e sem a presença de erosão dentro de cada variação das classes temáticas das cartas.

Assim, se uma determinada classe temática apresentasse em seis pontos com erosão e em vinte e quatro pontos sem erosão seu peso, na modelagem dos processos erosivos, seria de 06/30, ou 0,20.

Uma vez definidas as variáveis para o processo de modelagem por regressão, realizaram-se uma série de combinações das variáveis independentes com a variável dependente utilizando todos os tipos de funções, linear, exponencial, esférica, inversa, logarítmica, quadrática ou gaussiana, com um nível de confiança de 95%.

Neste sentido, após a experimentação de mais de 60 modelos, a partir da combinação de todos os conjuntos possíveis de variáveis independentes, não se chegou a nenhum modelo representativo do comportamento dos processos erosivos. Assim, os resultados ficaram longe do satisfatório. O melhor modelo encontrado, dentro de todos os que foram analisados, obteve testes de validação estatística com coeficiente de determinação (R^2) próximo a 52%, um valor do teste F de Fisher em torno de 2,4089 e um grau de significância de 0,05, ou seja, o modelo teve um nível de confiança de 95%, dentro do previamente estabelecido. (Tabela 4.3)

No entanto, os testes t de student indicaram que a maioria das variáveis não se mostrou significativa, assim como o sinal dos coeficientes de várias variáveis independentes (peso do solo, peso da vegetação, índice de plasticidade) apresentam um comportamento diferente ao esperado com relação aos processos erosivos.

A melhor equação encontrada, relativa ao modelo, foi a expressão ln-normal do tipo:

$$E = -5,51 - 0,10S + 1,22G + 0,54M - 3,01V + 7,48D + 0,12C + 0,34N + 1,72H - 0,15P \quad (4.1)$$

Onde:

E = probabilidade de surgimento de processos erosivos;

S = peso do solo;

G = peso da geologia;

M = peso da geomorfologia;

V = peso da vegetação;

D = peso da declividade;

Tabela 4.3 - Resultados estatísticos do modelo de regressão linear composta obtidos para trinta pontos amostrais

RESUMO DOS RESULTADOS						
<i>Estatística de regressão</i>						
R múltiplo	0,7212					
R-Quadrado	0,5202					
R-quadrado ajustado	0,3042					
Erro padrão	0,4204					
Observações	30,0000					
ANOVA						
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>	
Regressão	9,0000	3,8318	0,4258	2,4089	0,0487	
Resíduo	20,0000	3,5349	0,1767			
Total	29,0000	7,3667				
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-5,5095	2,7468	-2,0058	0,0586	-11,2392	0,2202
peso solo	-0,0974	1,3545	-0,0719	0,9434	-2,9229	2,7280
peso geologia	1,2217	0,9435	1,2950	0,2101	-0,7463	3,1897
peso geomorfol	0,5377	1,2378	0,4344	0,6686	-2,0443	3,1198
peso vegetação	-3,0123	2,5943	-1,1611	0,2593	-8,4238	2,3992
peso rec. Naturais (declividade)	7,4746	4,5458	1,6443	0,1157	-2,0077	16,9570
massa espec elevado a MCT	0,1241	0,0837	1,4826	0,1538	-0,0505	0,2988
ln(UM)-UH	0,3438	0,1142	3,0097	0,0069	0,1055	0,5821
pH H2O/KCl	1,7161	0,8215	2,0891	0,0497	0,0025	3,4296
ln(LL-LP)	-0,1455	0,3581	-0,4063	0,6888	-0,8924	0,6014

Legenda: gl – Graus de liberdade; SQ – Soma dos quadrados; MQ – Média dos Quadrados; F – Estatística “F” de Fisher.

C = massa específica aparente seca elevado ao parâmetro c' da classificação expedita MCT;

N = umidade natural menos umidade higroscópica;

H = pH em água dividido pelo pH em cloreto de potássio;

P = logaritmo natural do índice de plasticidade.

4.3 - TERCEIRA FASE DA MODELAGEM: DETALHAMENTO DAS VARIÁVEIS – SEGUNDO MODELO

Como os resultados alcançados não foram satisfatórios, passou-se ao detalhamento de cada uma das variáveis. Do aperfeiçoamento na compartimentação de informações temáticas a partir de imagens de satélite de alta resolução, foi desenvolvida uma pré-análise a partir de uma subárea piloto compreendida entre a DF-205 e a cidade de Brazlândia. Este sub-trecho foi escolhido em função da excelente quantidade de informações amostrais já existentes. Desta forma, detalhes desta área de estudo foram levantados a partir da análise simultânea do projeto Radam Brasil, com os dados de levantamento de campo e, principalmente, com as imagens do satélite Quickbird, a fim de promover uma análise mais detalhada em função de obter uma melhor modelagem dos processos erosivos.

Os resultados são apresentados em forma de cartas temáticas (Figuras 4.1 a 4.5) e na Tabela 4.4. Também foi realizada a identificação de pontos discrepantes ou *outliers* (Tabela 4.4), para a eliminação de dados amostrais não representativos. Nenhum *outlier* foi identificado.

Assim, novamente foram atribuídos pesos as variáveis geologia, geomorfologia, ocupação do solo, declividade e solos. Estes pesos foram dados em função da quantidade de pontos amostrais com e sem a presença de erosão dentro de cada variação de cada atributo das classes temáticas das cartas da mesma forma da primeira modelagem já apresentada. As variáveis independentes selecionadas para o segundo modelo foram analisadas de forma isolada e de forma conjunta sob vários cenários alternativos com várias combinações entre si. Assim, algumas variáveis, mesmo apresentando correlação significativa no modelo, foram eliminadas na análise, pois sua utilização prejudicava a modelagem como um todo, evidenciada nos coeficientes de determinação (r^2) e na estatística F de Fisher.

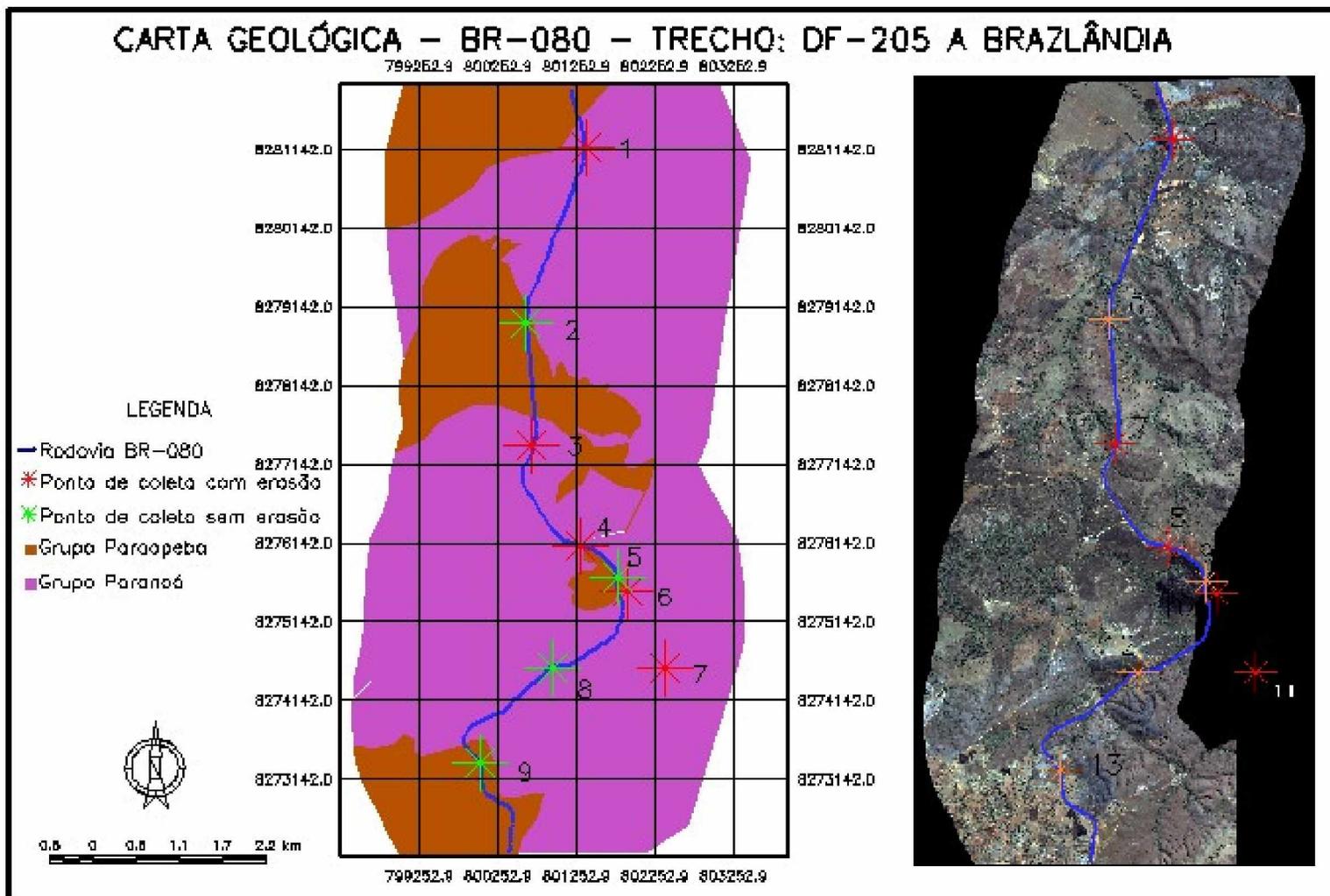


Figura 4.1 - Carta de Geologia do trecho compreendido entre a DF-205 e a cidade de Brazilândia – DF, na BR-080

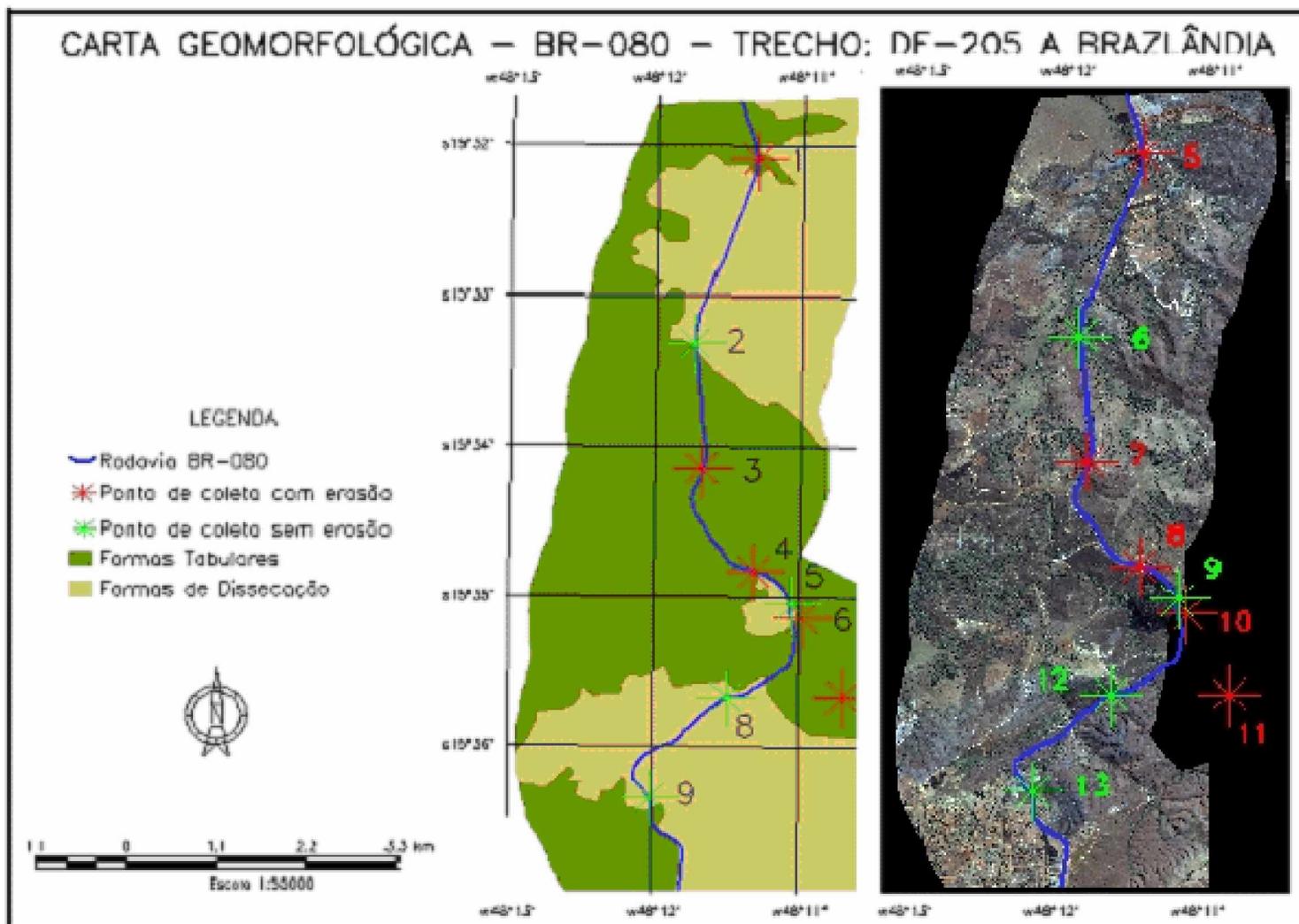


Figura 4.2 - Carta de Geomorfologia do trecho compreendido entre a DF-205 e a cidade de Brazlândia – DF, na BR-080

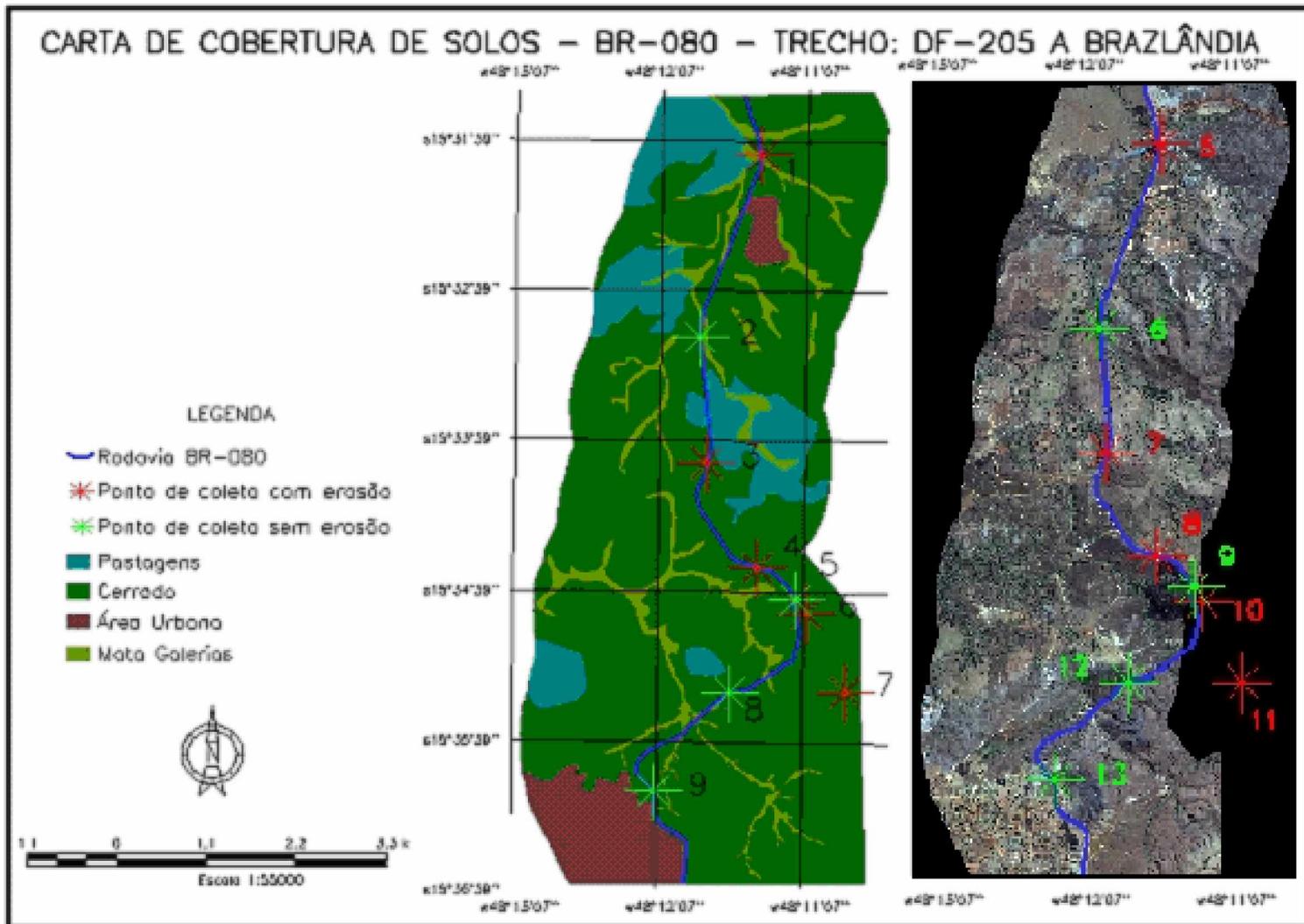


Figura 4.3 - Carta de Ocupação do Solo do trecho compreendido entre a DF-205 e a cidade de Brazlândia – DF, na BR-080

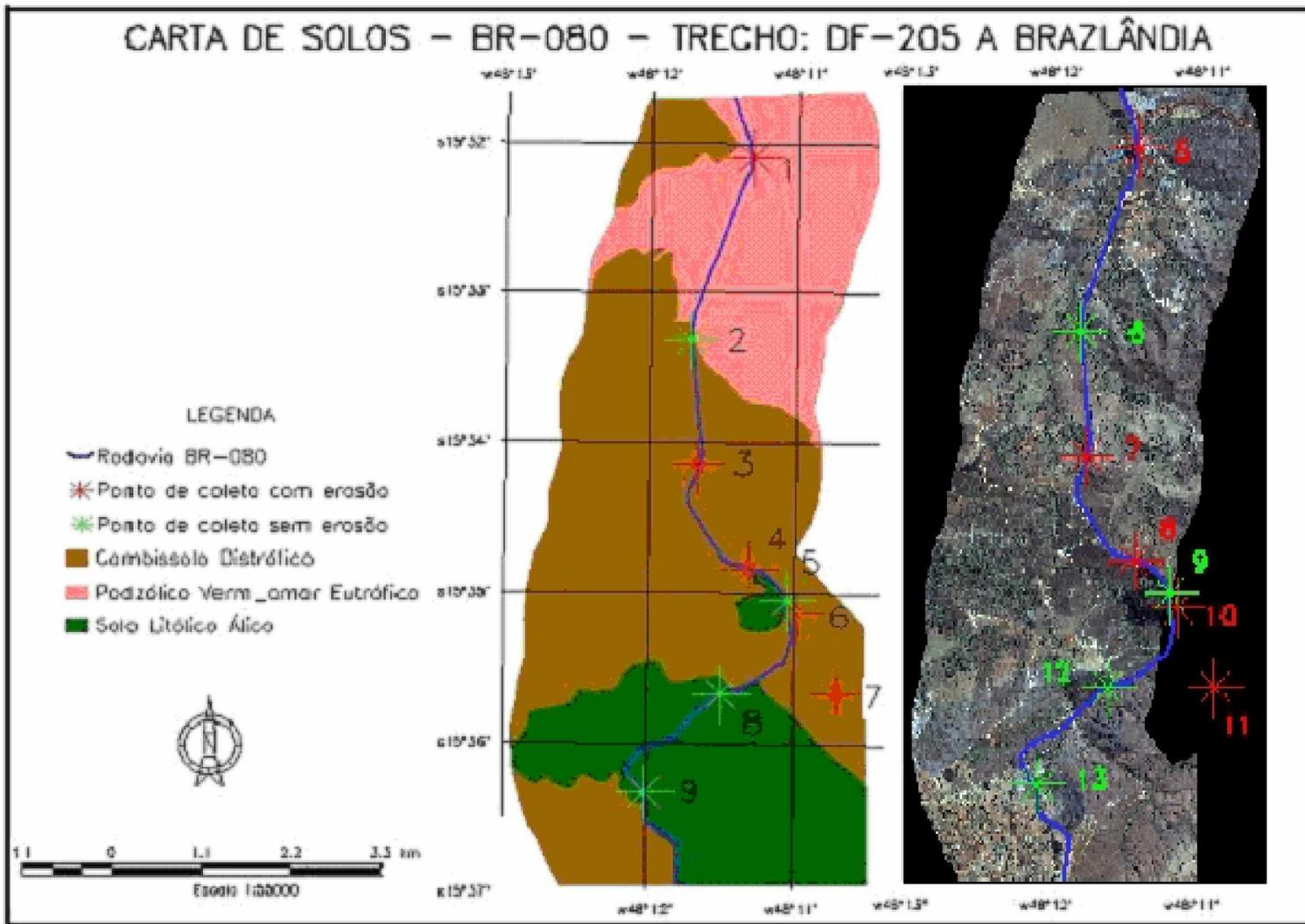


Figura 4.4 - Carta de Solos do trecho compreendido entre a DF-205 e a cidade de Brazlândia – DF, na BR-080

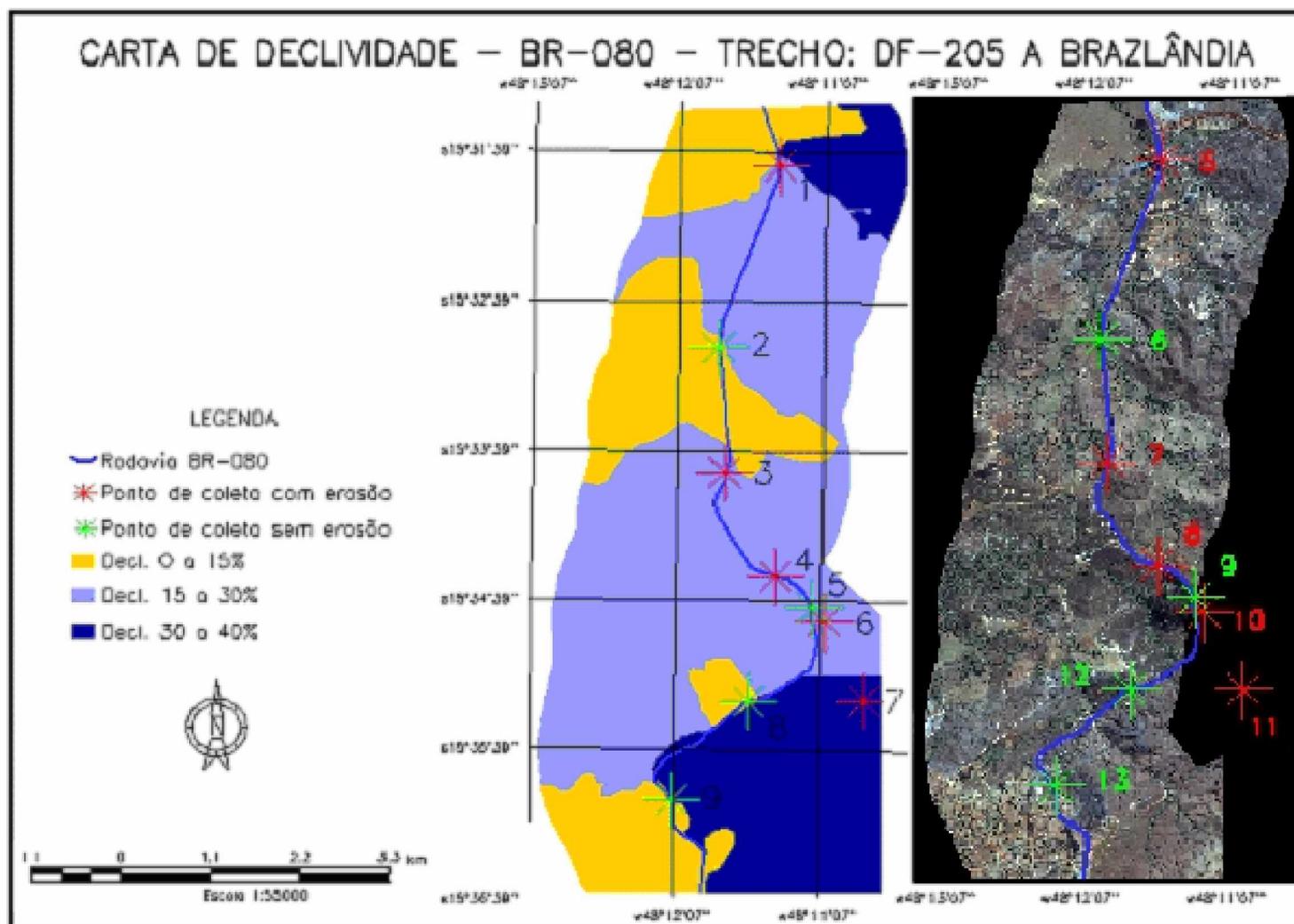


Figura 4.5 - Carta de Declividade do trecho compreendido entre a DF-205 e a cidade de Brazlândia – DF, na BR-080

Tabela 4.4 - Análise quanto a presença de *Outliers* na amostra (2)

Pto amostral	erosão	W hig.	ρ	peso solo	peso geologia	peso declividade	W l	W p
5	1	0,53	2,77	1,00	0,83	0,83	34	27
6	0	1,37	2,68	0,83	0,00	0,00	32	22
7	1	0,84	2,73	0,83	0,83	0,83	45	30
8	1	0,26	2,68	0,83	0,83	0,83	34	26
9	0	0,27	2,68	0,00	0,00	0,83	34	25
10	1	0,56	2,65	0,83	0,83	0,83	45	36
11	1	0,72	2,75	0,83	0,83	0,83	43	24
12	0	1,33	2,84	0,00	0,83	0,00	52	36
13	0	0,83	2,70	0,00	0,00	0,00	30	24
	Média	0,75	2,72	0,57	0,55	0,55	39	28
	Desvio-padrão	0,40	0,06	0,43	0,42	0,42	8	5
	Lim. Inf.	0,00	2,54	0,00	0,00	0,00	16	12
	Lim. Sup.	1,95	2,90	1,87	1,80	1,80	62	43

Finalmente, foi gerado o modelo de regressão múltipla, do tipo linear (Tabela 4.5) onde se pode verificar a boa representatividade da função encontrada, com um coeficiente de determinação de 0,971, ou seja, 97,1% de explicação do fenômeno erosão pelas variáveis utilizadas.

Apesar da análise não poder ser validada em função da pequena quantidade de elementos amostrais, o que se quis provar foi que, considerando a fotointerpretação da imagem de satélites de alta resolução, assim como a confirmação dessas informações em campo, pode-se aperfeiçoar os dados obtidos nas cartas temáticas do projeto Radam Brasil.

Assim, para esta etapa, o melhor modelo encontrado foi o seguinte:

$$E = 13,921 + 14,445H - 4,871M - 0,676S + 1,992G + 1,414D - 0,063L - 0,009P \quad (4.2)$$

Onde:

E = probabilidade de surgimento de processos erosivos;

H = umidade higroscópica;

M = massa específica aparente seca dos grãos;

S = peso do solo;

G = peso da geologia;

D = peso da declividade;

Tabela 4.5 - Resultados estatísticos do melhor modelo de regressão linear obtido para o primeiro trecho da rodovia BR-080

RESUMO DOS RESULTADOS						
<i>Estatística de regressão</i>						
R múltiplo	0,985					
R-Quadrado	0,971					
R-quadrado ajustado	0,767					
Erro padrão	0,254					
Observações	9					
ANOVA						
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>	
Regressão	7	2,158	0,308	4,768	0,339	
Resíduo	1	0,065	0,065			
Total	8	2,222				
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	13,921	17,682	0,787	0,575	-210,751	238,593
W hig.	1,445	2,838	0,509	0,700	-34,621	37,510
ρ	-4,871	6,247	-0,780	0,578	-84,247	74,505
peso solo	-0,676	1,836	-0,368	0,776	-24,006	22,655
peso geologia	1,992	1,973	1,009	0,497	-23,081	27,065
peso declividade	1,414	2,209	0,640	0,637	-26,650	29,478
W l	-0,063	0,112	-0,559	0,676	-1,488	1,363
W p	-0,009	0,039	-0,239	0,851	-0,508	0,489

Legenda: gl – Graus de liberdade; SQ – Soma dos quadrados; MQ – Média dos Quadrados; F – Estatística “F” de Fisher

L = limite de liquidez;

P = limite de plasticidade.

Os resultados para a variável dependente erosão poderão variar entre 0 e 1, onde valores próximos de zero indicariam a probabilidade de não ocorrência de processos erosivos e valores próximos de 1 indicariam a possibilidade de ocorrência de processos erosivos no solo.

4.4 - QUARTA FASE DA MODELAGEM: EXPANSÃO DO MODELO 2 PARA TODA A ÁREA DA PESQUISA

Como os procedimentos adotados na segunda modelagem se mostraram bastante eficientes passou-se, na seqüência, a expansão desse modelo para toda a área de estudos. Dessa forma, as cartas temáticas utilizadas na modelagem passaram pela análise de detalhamento de informações a partir da interpretação das imagens de satélite quickbird assim como de observações de campo. As novas cartas com as compartimentações dessas informações melhoradas em termos de resolução são apresentadas nas Figuras 4.6 a 4.15.

A partir desse detalhamento foi montada nova tabela com valores de cada uma das variáveis. Novamente, foram atribuídos pesos as variáveis geologia, geomorfologia, ocupação do solo, declividade e solos seguindo-se a mesma metodologia adotada até aqui em função da quantidade de pontos amostrais com e sem a presença de erosão dentro de cada variação das classes temáticas das cartas. Desta forma, novamente nessa determinação, se determinado atributo apresentasse em seis pontos com erosão e em vinte e quatro pontos sem erosão seu peso, na modelagem dos processos erosivos, seria de 06/30, ou 0,20.

As variáveis adotadas estão representadas na Tabela 4.6. As variáveis independentes, já validadas na modelagem anterior para o trecho da rodovia BR-080 foram eliminadas da análise pelo simples de fato de apresentarem baixa influência na modelagem dos processos erosivos, quando comparadas com as demais variáveis. A eliminação dessas variáveis do modelo não prejudicou a análise como um todo, pois o coeficiente de determinação (r^2) e a estatística F de Fisher sofreram alteração pouco significativas.

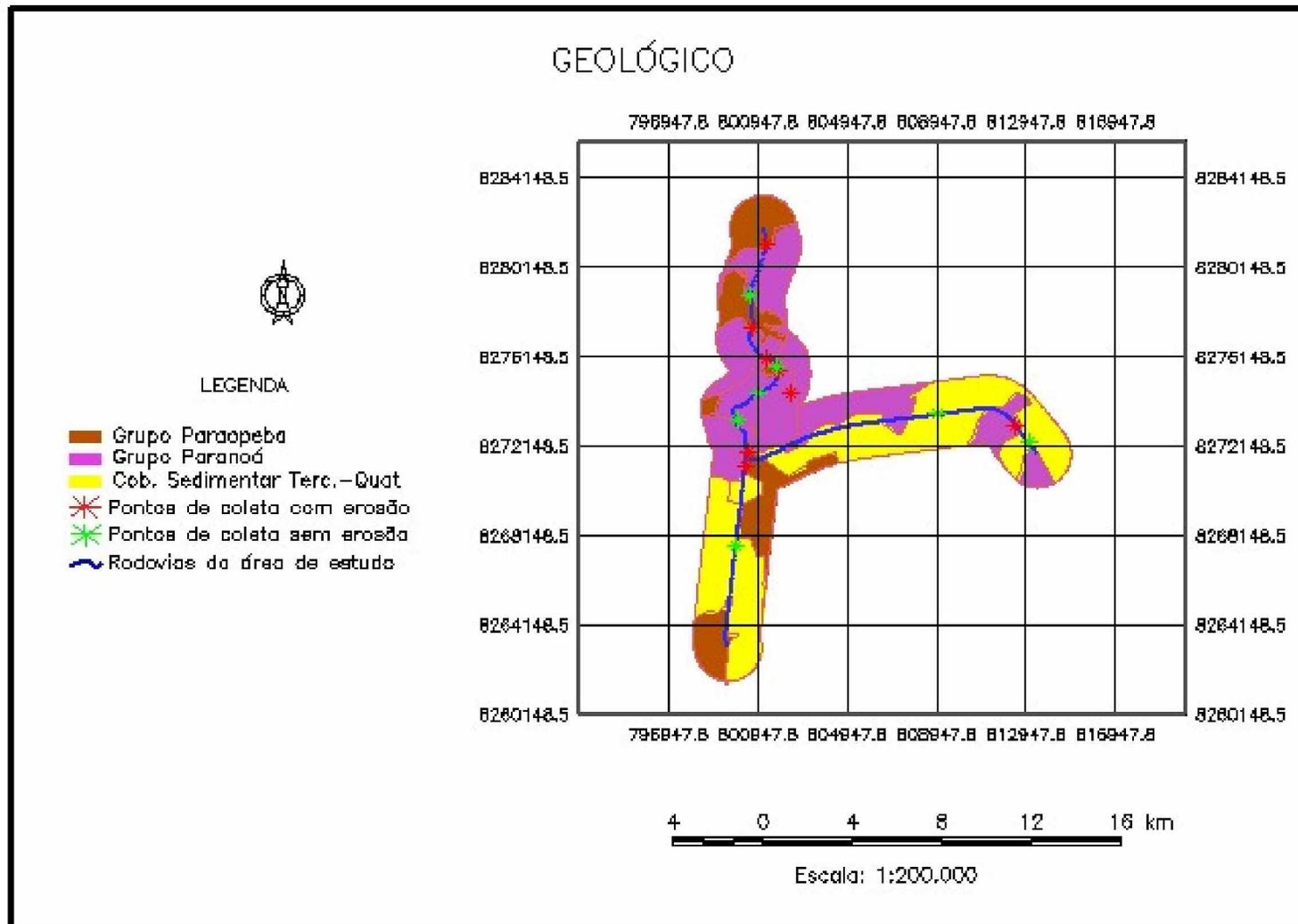


Figura 4.6 - Carta de Geologia da área de estudos das rodovias BR-080 e DF-220.

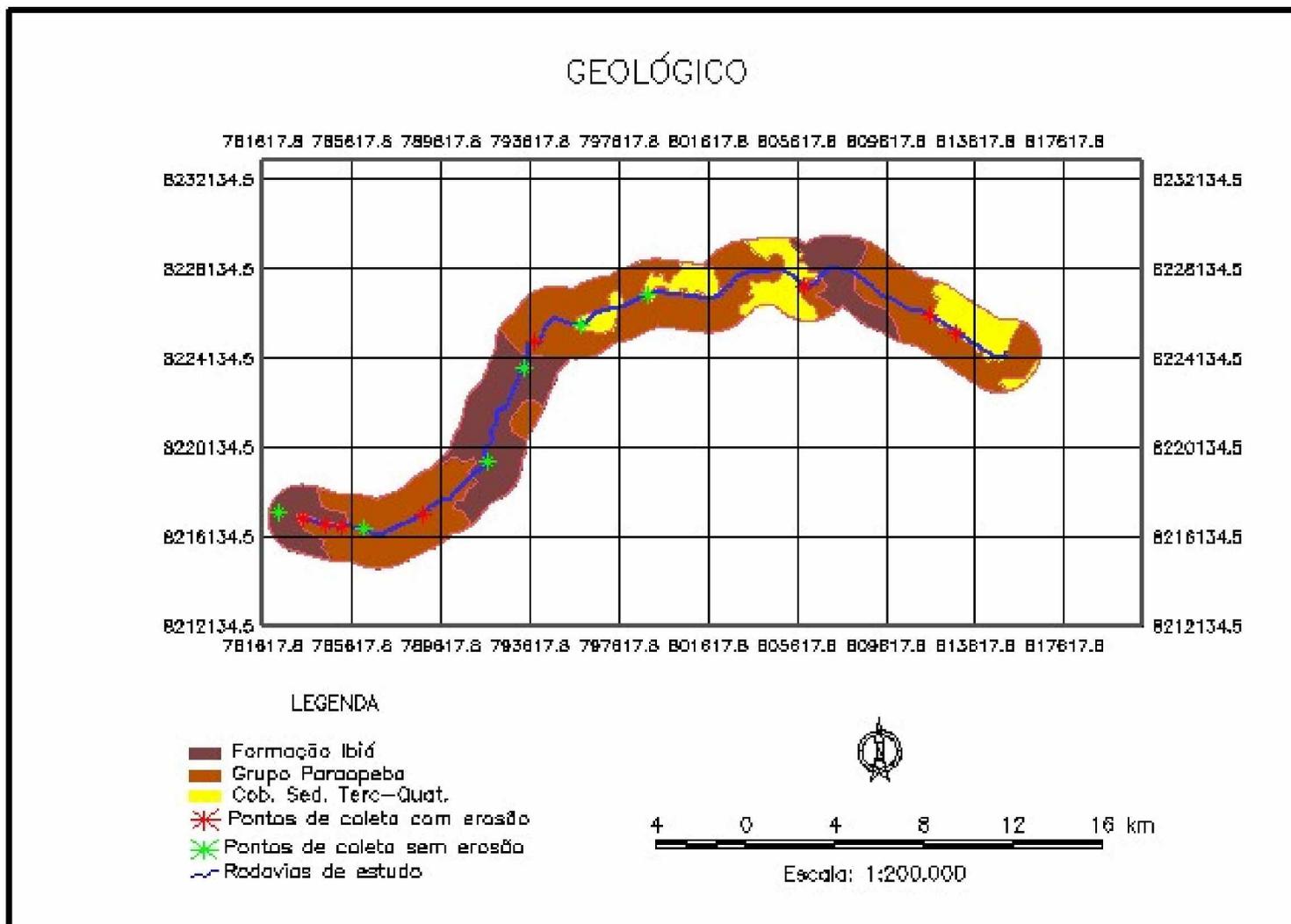


Figura 4.7 - Carta de Geologia da área de estudos das rodovias BR-060 e DF-290.

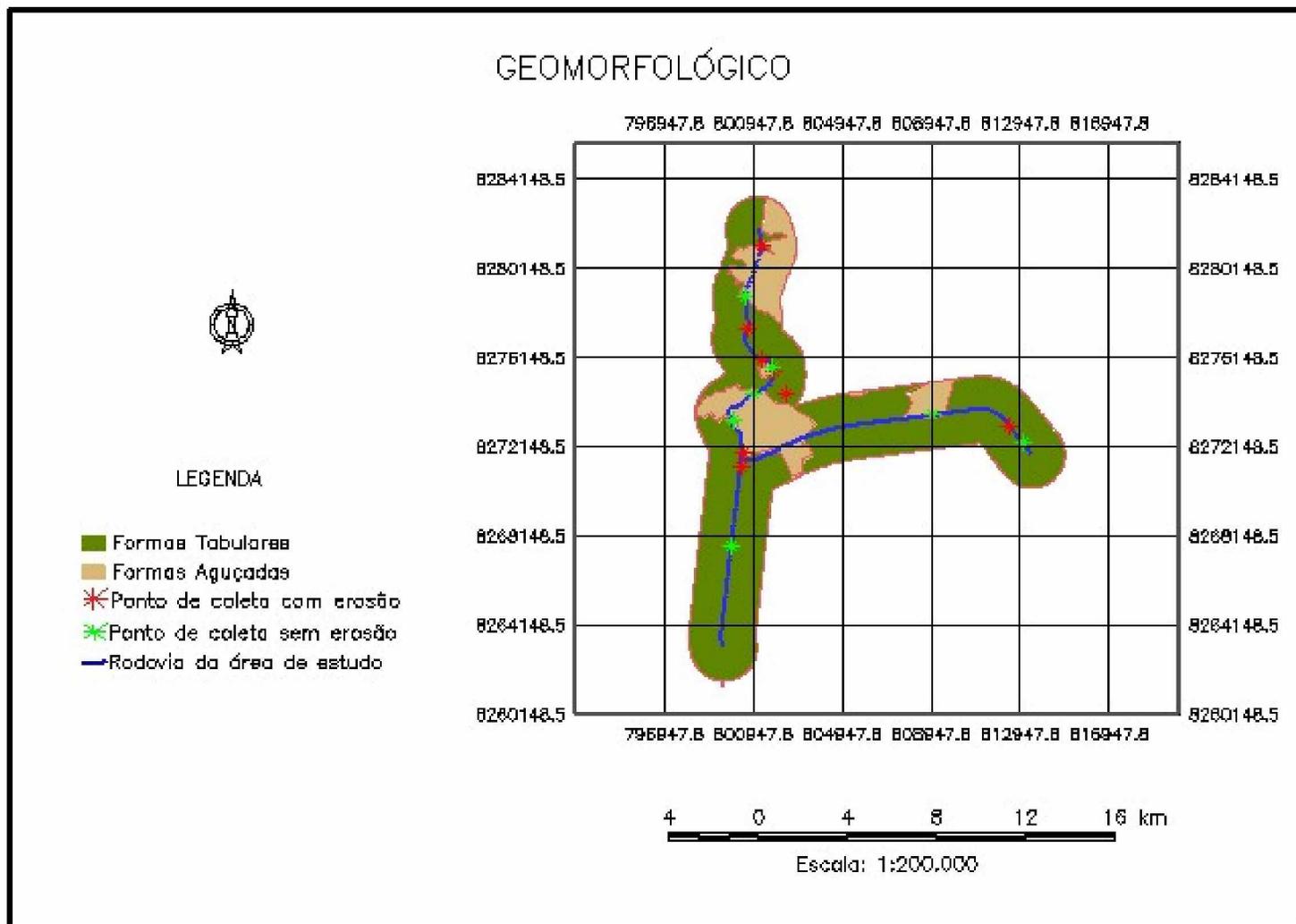
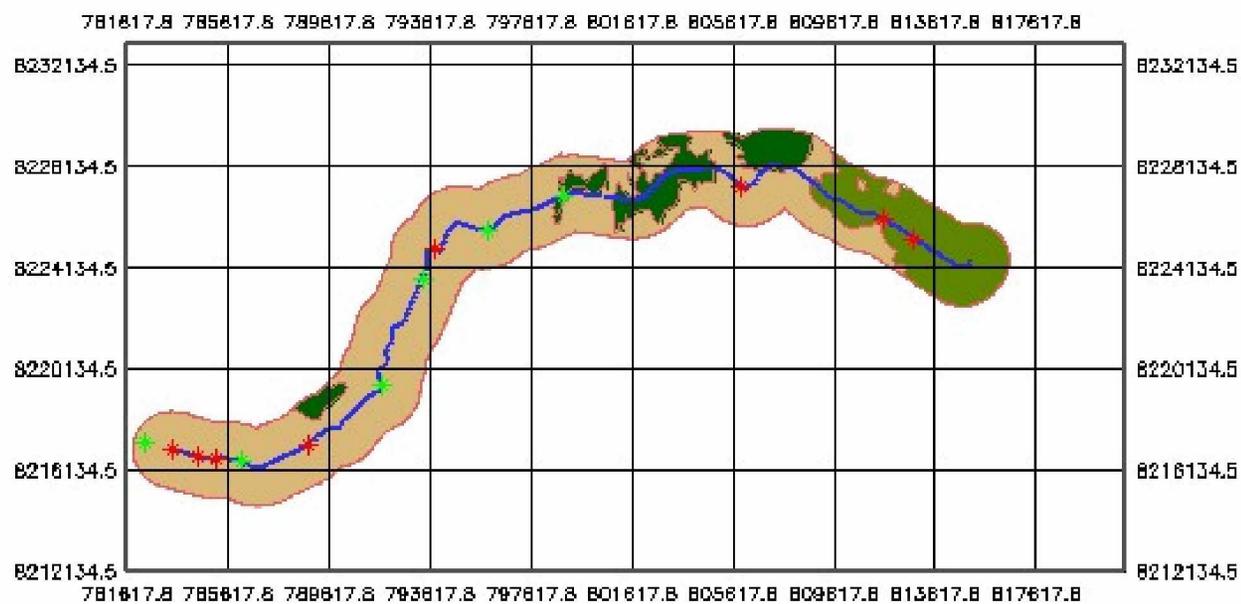


Figura 4.8 - Carta de Geomorfologia da área de estudos das rodovias BR-080 e DF-220.

GEOMORFOLÓGICO



LEGENDA

- Formas Tabulares
- Formas Aguçadas
- Superfície Erasiva Tabular
- ✱ Pontos de coleta com erosão
- ✱ Pontos de coleta sem erosão
- ~ Rodavias de estudo



4 0 4 8 12 16 km

Escala: 1:200.000

Figura 4.9 - Carta de Geomorfologia da área de estudos das rodovias BR-060 e DF-290.

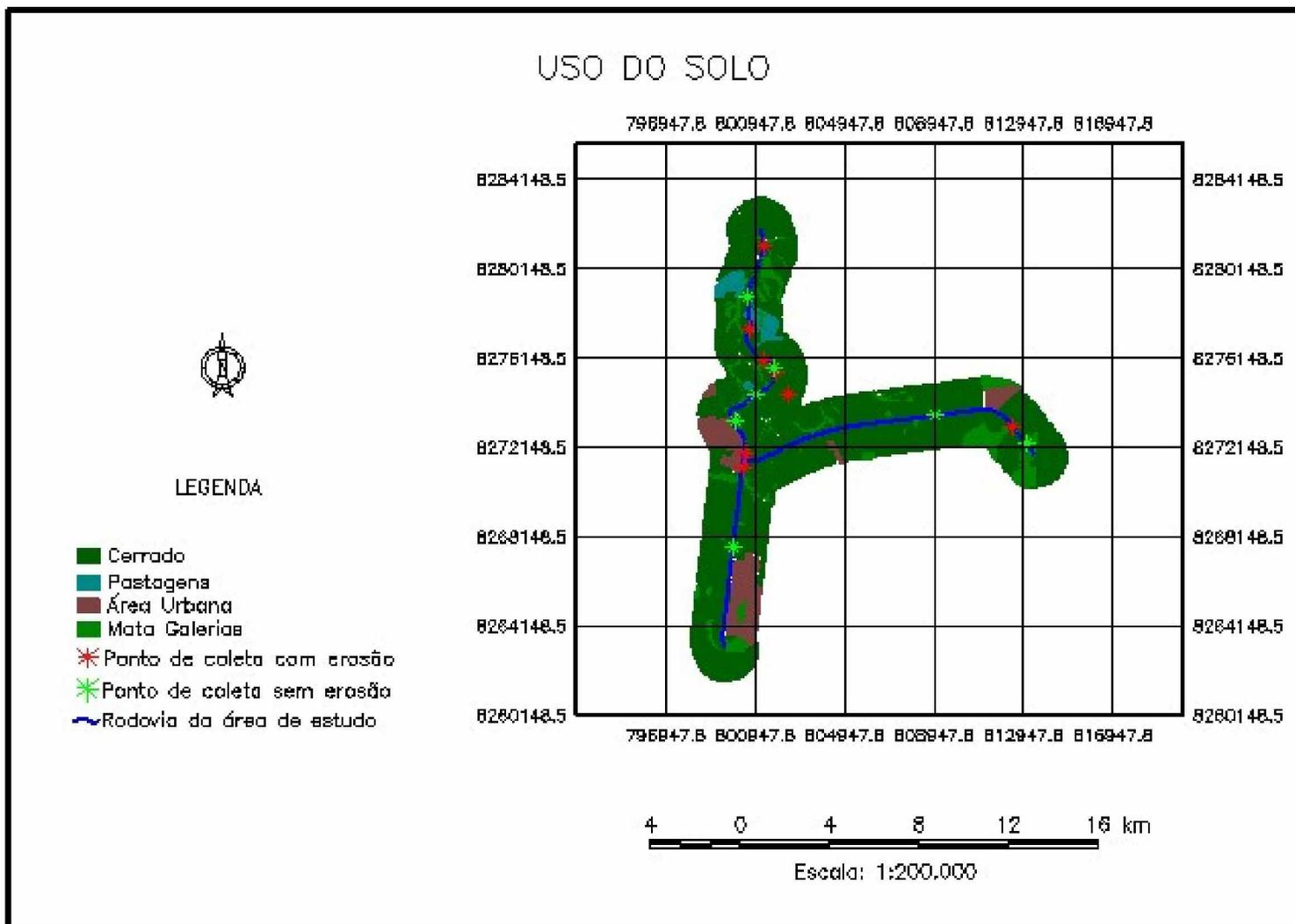


Figura 4.10 - Carta de Uso do Solo da área de estudos das rodovias BR-080 e DF-220.

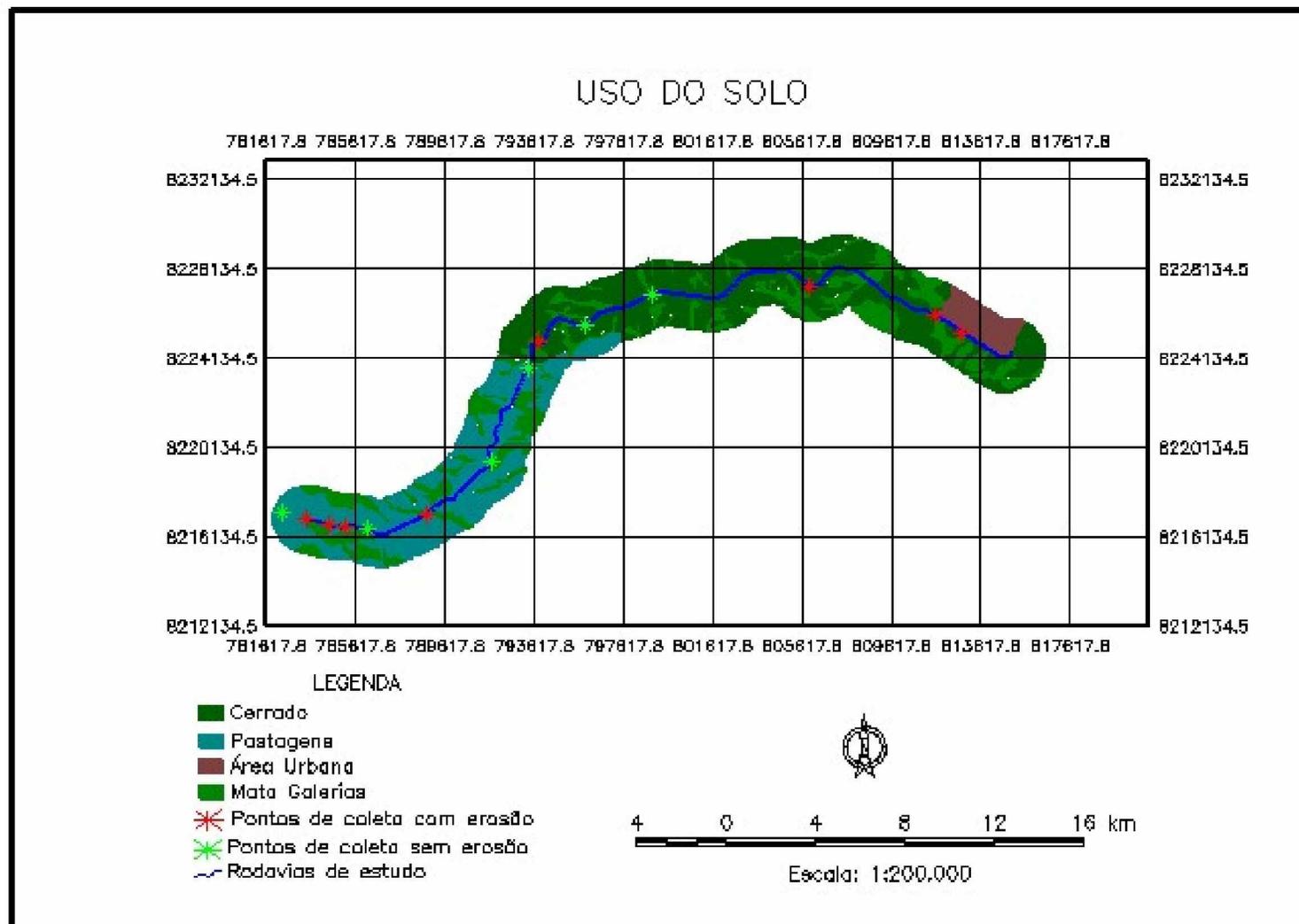


Figura 4.11 - Carta de Uso do Solo da área de estudos das rodovias BR-060 e DF-290.

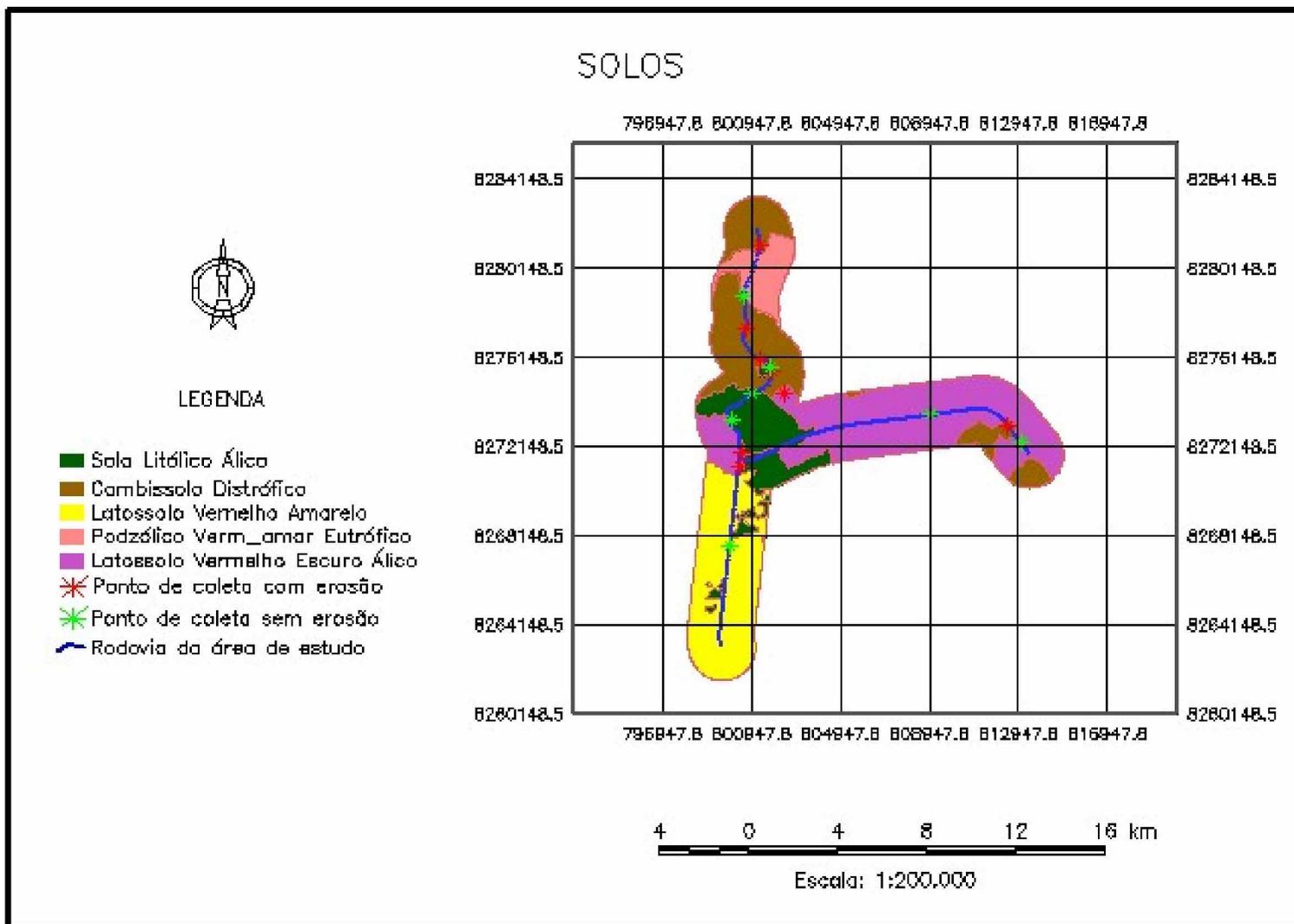


Figura 4.12 - Carta de Solos da área de estudos das rodovias BR-080 e DF-220.

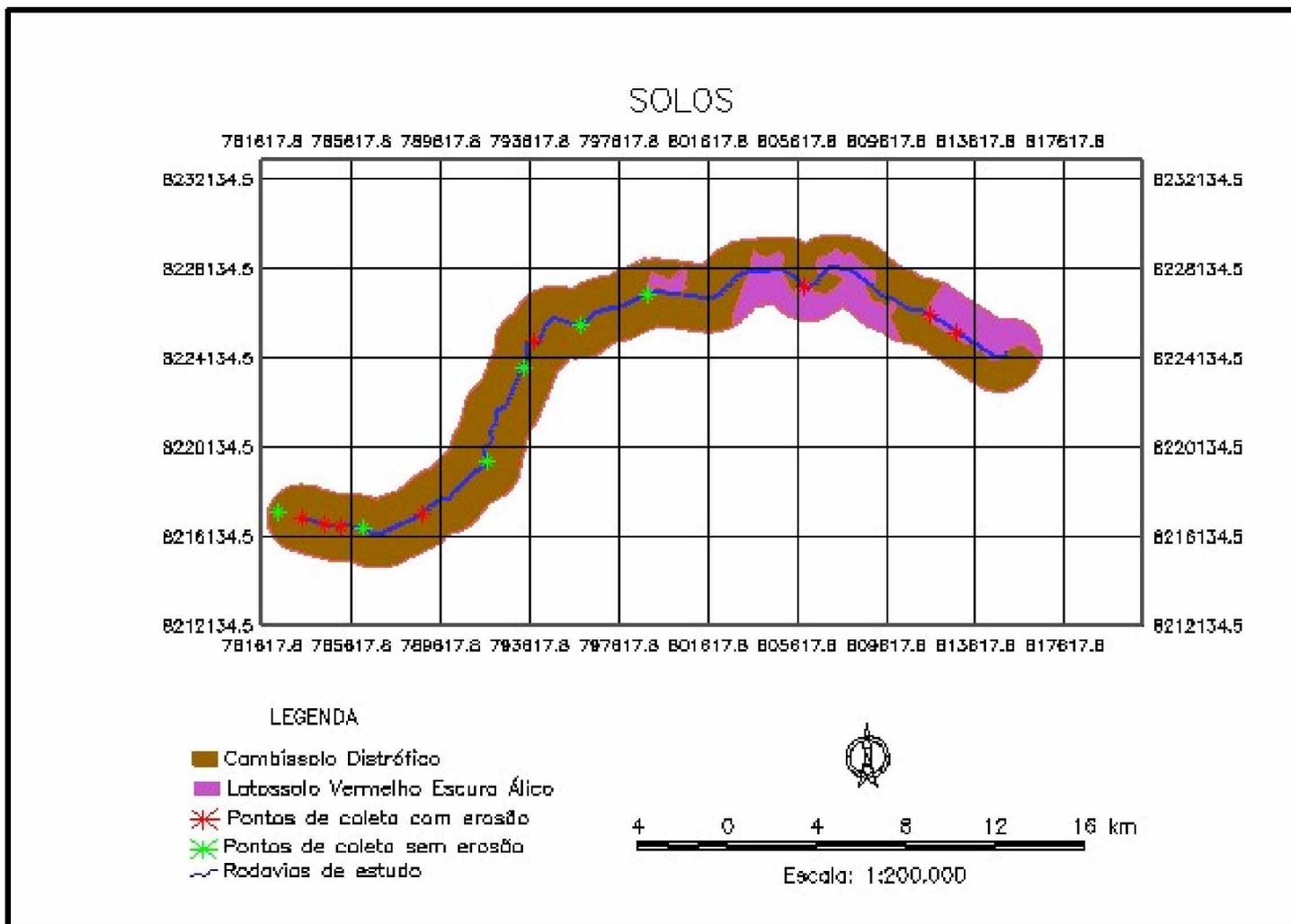


Figura 4.13 - Carta de Solos da área de estudos das rodovias BR-060 e DF-290.

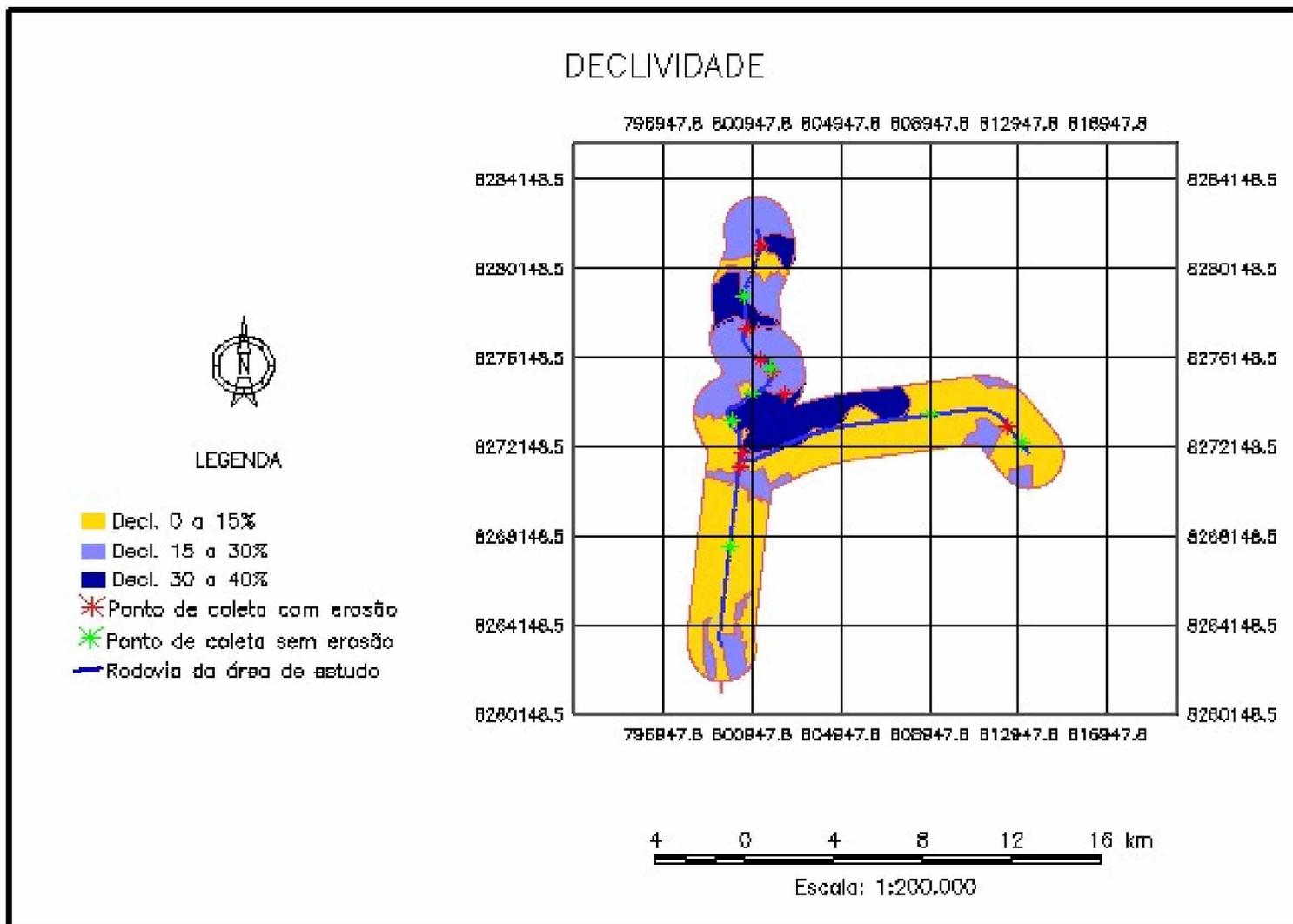


Figura 4.14 - Carta de Declividade da área de estudos das rodovias BR-080 e DF-220.

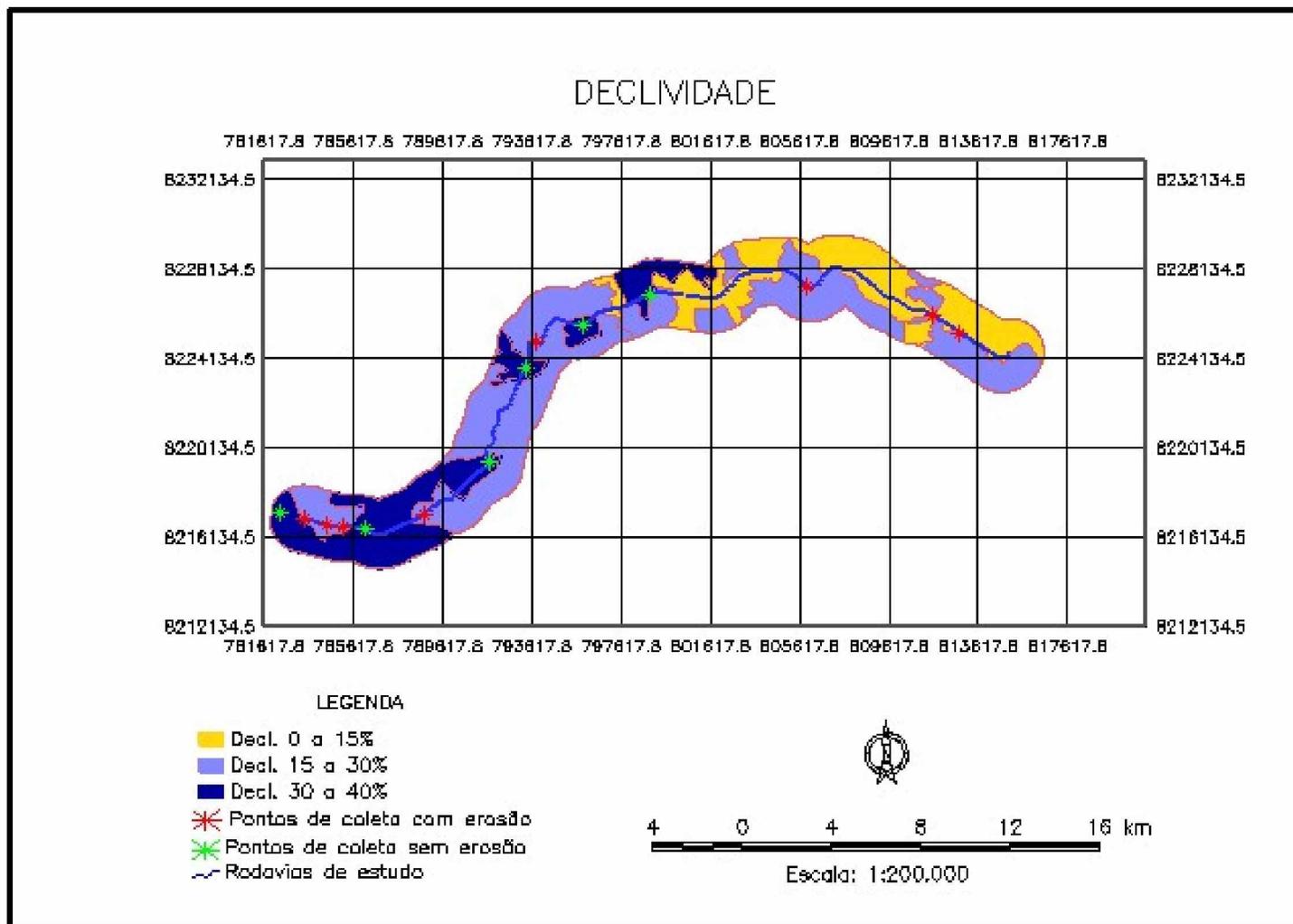


Figura 4.15 - Carta de Declividade da área de estudos das rodovias BR-060 e DF-290.

Tabela 4.6 - Variáveis adotadas no modelo de previsão de erosão

Pto amostral	erosão	W hig.	ρ	peso solo	peso geologia	peso declividade
01	0	2,49	2,69	0,63	0,00	0,17
02	1	1,12	2,81	0,61	0,43	0,17
03	0	2,26	2,74	0,63	0,00	0,17
04	1	2,52	2,63	0,63	0,43	0,94
05	1	0,53	2,77	0,61	0,93	0,94
06	0	1,37	2,68	0,61	0,43	0,13
07	1	0,84	2,73	0,61	0,93	0,94
08	1	0,26	2,68	0,61	0,93	0,94
09	0	0,27	2,68	0,00	0,43	0,94
10	1	0,56	2,65	0,61	0,93	0,94
11	1	0,72	2,75	0,63	0,43	0,94
12	0	1,33	2,84	0,00	0,43	0,17
13	0	0,83	2,70	0,00	0,43	0,17
14	1	1,39	2,71	0,63	0,93	0,94
15	0	1,55	2,74	0,00	0,00	0,17
16	1	0,18	2,76	0,61	0,25	0,13
17	0	0,52	2,78	0,61	0,25	0,13
18	1	0,59	2,80	0,61	0,93	0,94
19	1	0,11	2,70	0,61	0,93	0,94
20	1	0,27	2,75	0,61	0,93	0,94
21	0	0,12	2,67	0,61	0,93	0,13
22	1	0,52	2,78	0,61	0,93	0,94
23	0	0,39	2,76	0,61	0,25	0,13
24	0	0,22	2,84	0,61	0,25	0,13
25	1	0,41	2,80	0,61	0,93	0,94
26	0	0,35	2,82	0,61	0,00	0,13
27	0	2,09	2,69	0,61	0,00	0,13
28	1	0,50	2,96	0,63	0,93	0,94
29	1	1,62	2,79	0,63	0,93	0,94
30	1	1,20	2,72	0,63	0,93	0,94

A partir da Tabela 4.6, foi realizada a identificação de pontos discrepantes ou outliers (Tabela 4.7), para a eliminação de dados amostrais não representativos. Nenhum outlier foi identificado. A análise de correlação (Tabela 4.8) também foi desenvolvida.

Tabela 4.7 - Análise quanto a presença de Outliers na amostra (3)

Média	0,6	0,90	2,75	0,53	0,57	0,57
Desvio-padrão	0,5	0,72	0,07	0,21	0,37	0,40
Lim. Inferior	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lim. Superior	2,1	3,08	2,95	1,17	1,68	1,78

Tabela 4.8 - Valores de correlações entre as variáveis (2)

	<i>erosão</i>	<i>W hig.</i>	ρ	<i>peso solo</i>	<i>peso geologia</i>	<i>peso declividade</i>
<i>erosão</i>	1					
<i>W hig.</i>	-0,19218	1				
ρ	0,084515	-0,27473	1			
<i>peso solo</i>	0,451789	-0,03259	0,042408	1		
<i>peso geologia</i>	0,73446	-0,42026	0,028394	0,262605613	1	
<i>peso declividade</i>	0,800523	-0,18671	-0,05578	0,211437999	0,784512774	1

Novamente, em função das variáveis independentes conhecidas que poderiam influenciar nos processos erosivos (variável dependente na modelagem), foram testados vários modelos, dentre eles modelos lineares, quadráticos, exponenciais, gaussianos, logarítmicos e inversos.

Finalmente, depois de várias análises, foi gerado o melhor modelo de regressão múltipla, do tipo linear (Tabela 4.9) onde se pode verificar a boa representatividade da função encontrada, com um coeficiente de determinação de 0,75, ou seja, 75% de explicação do fenômeno erosão pelas variáveis utilizadas. Os valores das estatísticas F de Fisher, p e t de Student também se mostraram significativos no sentido de validação do modelo encontrado.

Assim, para esta etapa, o melhor modelo encontrado foi o seguinte:

$$E = -2,663 + 0,036H + 0,828M + 0,630S + 0,306G + 0,729D \quad (4.3)$$

Onde:

E = probabilidade de surgimento de processos erosivos;

H = umidade higroscópica;

M = massa específica aparente seca dos grãos;

S = peso do solo;

G = peso da geologia;

D = peso da declividade;

Tabela 4.9 - Resultados estatísticos do melhor modelo de regressão linear obtido no estudo

RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,867439769
R-Quadrado	0,752451753
R-quadrado ajustado	0,700879201
Erro padrão	0,275651155
Observações	30

F(critico) = 3,154816342

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	5	5,543061244	1,108612249	14,5901595	0,00000130
Resíduo	24	1,823605423	0,075983559		
Total	29	7,366666667			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-2,662533916	2,165647032	-1,229440382	0,230824121	-7,132208791	1,80714096
W hig.	0,035631931	0,084086314	0,423754228	0,675518869	-0,137913656	0,209177518
Massa Específica	0,827769537	0,777357499	1,06485052	0,297540031	-0,776617157	2,432156231
peso solo	0,630239824	0,250763826	2,513280459	0,019081045	0,112688831	1,147790817
peso geologia	0,306368753	0,25398968	1,206225201	0,239487329	-0,217840075	0,830577581
peso declividade	0,729019362	0,211874836	3,440802021	0,002132334	0,291731284	1,166307441

Legenda: *gl* – Graus de liberdade; *SQ* – Soma dos quadrados; *MQ* – Média dos Quadrados; *F* – Estatística “F” de Fisher.

Analisando o modelo encontrado pode-se perceber a sua consistência a partir dos valores das estatísticas encontradas. O coeficiente de determinação (r^2) se mostrou bastante significativo, da ordem de 75%. O valor de F crítico ficou inferior ao valor da estatística F encontrada para o modelo. Os erros padrão das variáveis ficaram todos menores que 1, mostrando que os erros de estimação desses coeficientes são pequenos e aceitáveis. Para a estatística t de student pode-se comprovar a confiança da análise pois o I.C. (intervalo de confiança) para as estatísticas t encontradas ficou em torno de 82%. Os valor da estatística P se apresentaram bastante razoáveis à exceção da variável independente umidade higroscópica. Entretanto, essa variável foi mantida no modelo, mesmo apresentando coeficiente de apenas 0,036 porque se mostrou importante no modelo como um todo quando analisados o coeficiente de determinação e a estatística F de Fisher, ou seja, eliminando essa variável os valores de r^2 e F seriam menos expressivos para a função.

Desta forma, a partir da modelagem final dos processos erosivos, é importante lembrar que os resultados para a variável dependente erosão neste modelo determinístico poderão variar entre 0 e 1, onde valores próximos de zero (entre 0 e 0,25) indicam a probabilidade de praticamente não ocorrer processos erosivos, valores entre 0,25 e 0,50 indicariam média possibilidade de ocorrência de processos erosivos, valores entre 0,50 e 0,75 indicariam alta possibilidade de ocorrência de processos erosivos e valores próximos de 1 (entre 0,75 e 1) indicariam crítica possibilidade de ocorrência de processos erosivos no solo.

5 - MODELAGEM ESPACIALIZADA DOS PROCESSOS EROSIVOS

O modelo apresentado no capítulo 4 pode ser utilizado para a determinação da possibilidade de encontrar processos erosivos em qualquer tipo de terreno. Entretanto, apresenta uma limitação pelo fato dessa determinação ser pontual. Dessa forma, foi estudada a espacialização das variáveis adotadas nesse modelo com objetivo de se ter uma metodologia para trabalhos em escala regional.

Em um primeiro momento foram analisados os valores das variáveis a serem espacializadas com relação aos tipos de solos em que as mesmas estavam inseridas já que as variáveis a serem espacializadas, umidade higroscópica e massa aparente seca dos solos, têm ligação direta com o tipo de solo amostrado. Como exemplo de aplicação da análise desenvolvida apresenta-se as considerações realizadas para a variável umidade higroscópica no trecho das rodovias BR-060 / DF-290. Nesse trecho foram extraídas as amostras 16 a 30. A Tabela 5.1 mostra os tipos de solos assim como os valores de umidade higroscópica de cada ponto amostrado.

A partir da Tabela 5.1 se pode perceber que a umidade higroscópica para o cambissolo distrófico (média = 0,35) apresentou valores bastante inferiores aos resultados apontados para o latossolo vermelho escuro álico (média = 1,64). Assim foram considerados esses valores médios para a variável umidade higroscópica ao longo de cada área relacionada a cada tipo de solo. Os mesmos procedimentos foram adotados para a variável umidade higroscópica no trecho das rodovias BR-080 / DF-220 e para a variável massa específica aparente seca nos dois trechos rodoviários. Obviamente as cartas apresentaram as mesmas distribuições de classes temáticas das cartas de solos sendo que a diferença ficou apenas nos valores relacionados a cada uma das classes.

Finalmente, com o apoio da função suporte à decisão do programa SPRING foram geradas, para a área de estudos, cartas de propensão ao surgimento de processos erosivos, a partir das variáveis estudadas. Os pesos de cada uma das variáveis espacializadas foram determinados em função dos coeficientes estabelecidos na análise de regressão efetuada para a modelagem determinística apresentada. Com esses pesos e com a função de programação LEGAL do programa SPRING foram gerados os planos de informações (PI's) (Figuras 5.1 e 5.2) com as áreas de maior e menor propensão a surgimento de processos erosivos. Através das várias

categorias encontradas para processos erosivos foi criada uma carta temática com as faixas de probabilidade de surgimento de processo erosivos, sendo: **1ª Classe** - Praticamente não erodível com probabilidade entre 0 e 25%; **2ª Classe** - Medianamente erodível com probabilidade entre 25 e 50%; **3ª Classe** - Muito erodível com probabilidade entre 50 e 75%; **4ª Classe** - Criticamente erodível com probabilidade entre 75 e 100%.

Tabela 5.1 - Tipos de solos e umidade higroscópica para pontos amostrados nas rodovias BR-060 e DF-290

Pto amostral	Erosão	W hig.	Tipo de Solo
16	sim	0.18	Cambissolo Distrofico
17	não	0.52	Cambissolo Distrofico
18	sim	0.59	Cambissolo Distrofico
19	sim	0.11	Cambissolo Distrofico
20	sim	0.27	Cambissolo Distrofico
21	não	0.12	Cambissolo Distrofico
22	sim	0.52	Cambissolo Distrofico
23	não	0.39	Cambissolo Distrofico
24	não	0.22	Cambissolo Distrofico
25	sim	0.41	Cambissolo Distrofico
26	não	0.35	Cambissolo Distrofico
27	não	2.09	Latossolo Vermelho Escuro Alico
28	sim	0.50	Cambissolo Distrofico
29	sim	1.62	Latossolo Vermelho Escuro Alico
30	sim	1.20	Latossolo Vermelho Escuro Alico

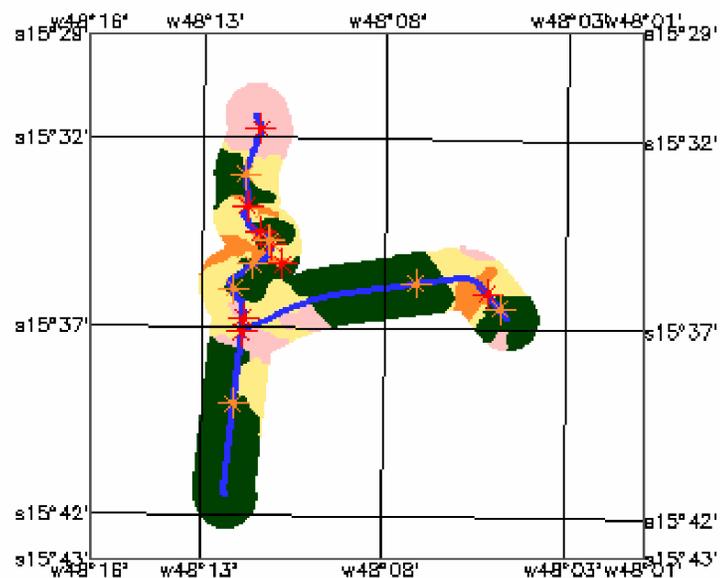
5.1 - VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DA ESPACIALIZAÇÃO DE VARIÁVEIS

Muitos métodos tradicionais de interpolação incorporados em sistemas de informação geográficas – SIG, para a espacialização de variáveis, são baseados em funções matemáticas. Burrough (1987) apresenta vários métodos de interpolação espacial, tais como: método da poligonal, triangulação, média local das amostras, método da distância inversa, etc. Em geral, estes métodos são facilmente implementados e razoavelmente rápidos para determinação. Por outro lado, possuem limitações na representação da variabilidade espacial de dados, pois desconsideram a anisotropia e a continuidade dos fenômenos analisados. Além disso, segundo Camargo (1997), deixa sem resposta algumas questões importantes, tais como: o tamanho ideal do domínio ou da janela de estimação, a forma e orientação que deve ter a janela para se obter uma estimação ótima, se existem outros modos para estimar os pesos além daqueles baseados em função da distância e quais são os erros (incertezas) associados aos valores estimados.

CARTA DE PROPENSÃO A PROCESSOS EROSIVOS – BR-080 – DF-220

LEGENDA

- Praticamente_não_erod
- Medianamente_erod
- Muito_erod
- Criticamente_erod
- ✱ Ponto de coleta com erosão
- ✱ Ponto de coleta sem erosão
- ~ Rodovia da área de estudo

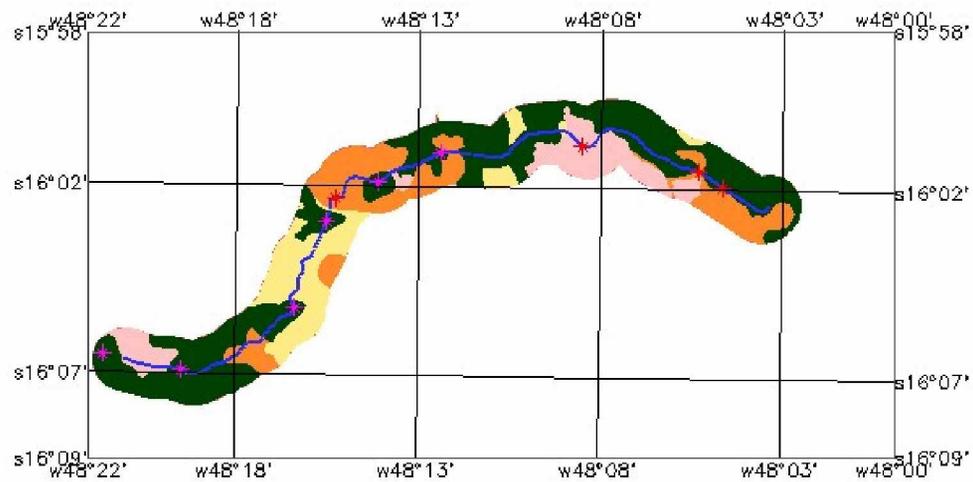


5 0 5 10 15 20 km

Escala: 1:250.000

Figura 5.1 - Carta de propensão a processos erosivos nas rodovias BR-080 e DF-220.

CARTA DE PROPENSÃO A PROCESSOS EROSIVOS – BR-060 – DF-290



LEGENDA

- Praticamente_não_erod
- Medianamente_erod
- Muito_erod
- Críticamente_erod
- ✱ Pontos de coleta com erosão
- ✱ Pontos de coleta sem erosão
- Rodovias de estudo



Escala: 1:250.000

Figura 5.2 - Carta de propensão a processos erosivos nas rodovias BR-060 e DF-290.

Na realidade, as propriedades naturais da superfície terrestre apresentam variabilidade espacial que não podem ser medidas por simples funções matemáticas. A anisotropia deve ser considerada. Desta forma, a krigeagem (Matheron, 1971) vem sendo utilizada como um modelo fundamentado na regionalização de variáveis, considerando a aleatoriedade das mesmas.

Na krigeagem foi introduzido o uso das médias móveis a fim de evitar a superestimação das variáveis. O que diferencia a krigeagem de outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos a diferentes amostras, o tratamento e a redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Além disso, a krigeagem fornece estimadores exatos com propriedades de não tendenciosidade e eficiência.

Assim, inicialmente foi evidenciado que as variáveis, pesos de solos, de geologia e de declividade, já se encontravam regionalizadas, pois as próprias cartas temáticas já demonstravam essa situação. Dessa forma, amostras em MNT (modelo numérico de terreno) foram atribuídas a cada um desses temas, produzindo cartas MNT bastante semelhantes às temáticas. A única diferença é que nas cartas MNT apresentavam-se valores numéricos em função da representatividade de cada atributo na influencia dos processos erosivos, de forma diferente das cartas temáticas, obtidos em função da representatividade de cada uma das classes em estudo em relação a todos as classes conhecidas. Esses valores percentuais foram extraídos da modelagem determinística pontual apresentada no item 4.4 deste estudo.

Entretanto, para as variáveis umidade higroscópica ($W_{hig.}$) e massa específica aparente seca dos solos (ρ) os valores disponíveis eram apenas os resultados dos ensaios em amostras pontuais, localizadas ao longo de toda a área de estudo. Dessa forma, se fez necessário a espacialização dessas variáveis, o que foi executado por meio de uma análise lógica validada com o auxílio de ferramentas de geoestatística do programa SPRING. Na seqüência são apresentados os passos seguidos na espacialização de cada uma das duas variáveis. Para tanto a demonstração a seguir seguirá os procedimentos que foram adotados para a variável umidade higroscópica no trecho das rodovias BR-060/DF-290. Para espacialização da mesma variável no trecho das rodovias BR-080/DF-220, assim como na espacialização da variável massa específica aparente seca para os dois trechos citados, foram utilizados procedimentos idênticos.

Já, para a validação estatística foram seguidos os seguintes passos: Inicialmente foram obtidas as estatísticas descritivas dos dados (Figura 5.3), a fim do conhecimento das tendências de suas medidas.

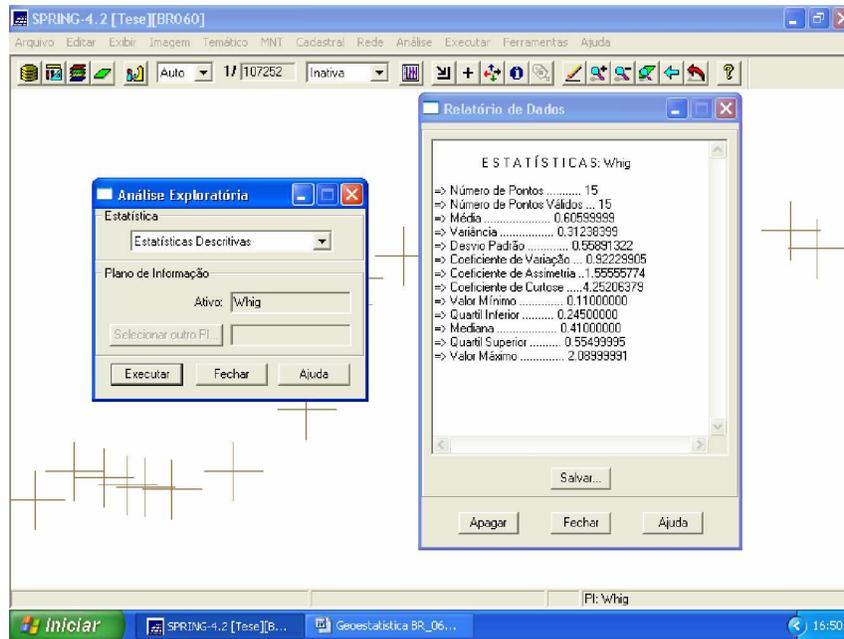


Figura 5.3 - Estatísticas Descritivas - dados amostrais de Um. Higroscópica – BR-060

O Histograma dos dados (Figura 5.4) também foi determinado:

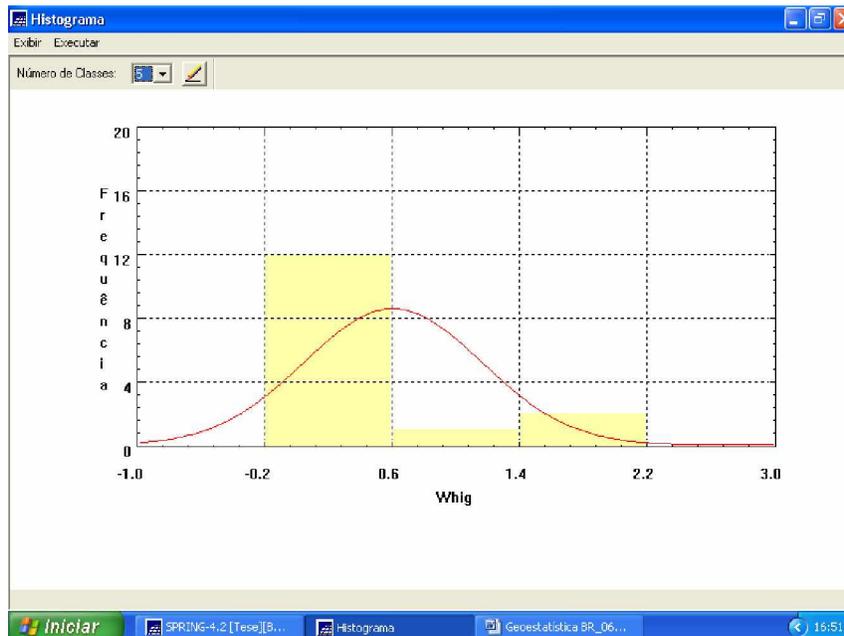


Figura 5.4 - Histograma dos dados amostrais de Umidade Higroscópica – BR-060

Na seqüência os dados foram normalizados, ou seja, foi determinado a quantos desvios-padrão os dados estavam de sua média . Detalhes do gráfico (Figura 5.5):



Figura 5.5 - Dados amostrais normalizados de Umidade Higroscópica – BR-060

Na seqüência foram gerados, após várias tentativas, os melhores semivariogramas para as diversas orientações (0, 45, 90 e 135°) adotadas. Os variogramas representam as funções matemáticas para a espacialização dos dados em cada uma de suas direções. A Figura 5.6 apresenta os gráficos dos semivariogramas de todas as direções estudadas:

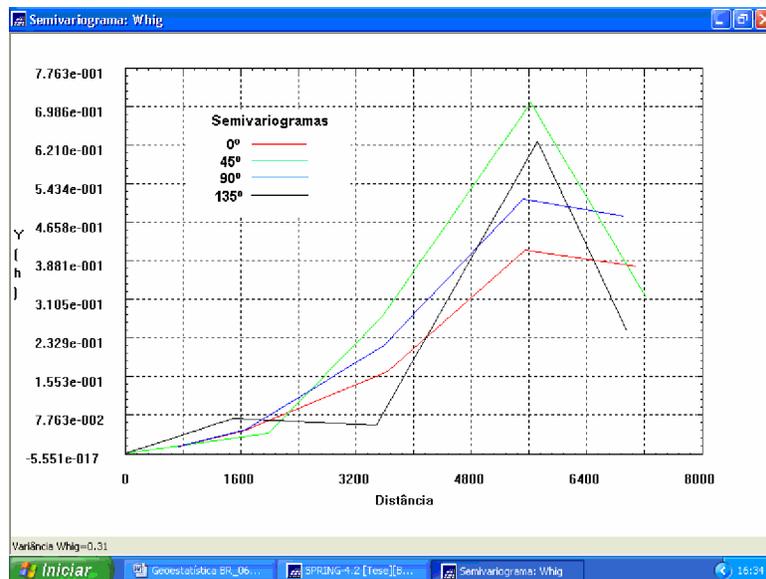


Figura 5.6 - Semivariogramas para 0°, 45°, 90° e 135° dos dados de Umidade Higroscópica – BR-060

Após os ajustes de cada um dos semivariogramas o próximo procedimento adotado foi o do estabelecimento do ângulo de anisotropia de toda a modelagem. Este ângulo de anisotropia estabelecido pelo próprio SPRING, a partir dos dados em análise foi o ângulo de 135°. Com esse valor e ainda os dados dos gráficos para cada ângulo de trabalho de contribuição e alcances máximo e mínimo foram lançados os valores desses parâmetros para a geração do modelo de krigeagem (especialização) dos dados. As Figuras 5.7 a 5.10 apresentam os valores adotados.

O próximo passo foi definir, a partir dos dados de semivariograma de todas as direções, o semivariograma final da variável. Na Figura 5.11 encontramos os parâmetros adotados que foram obtidos com o auxílio do programa SPRING.

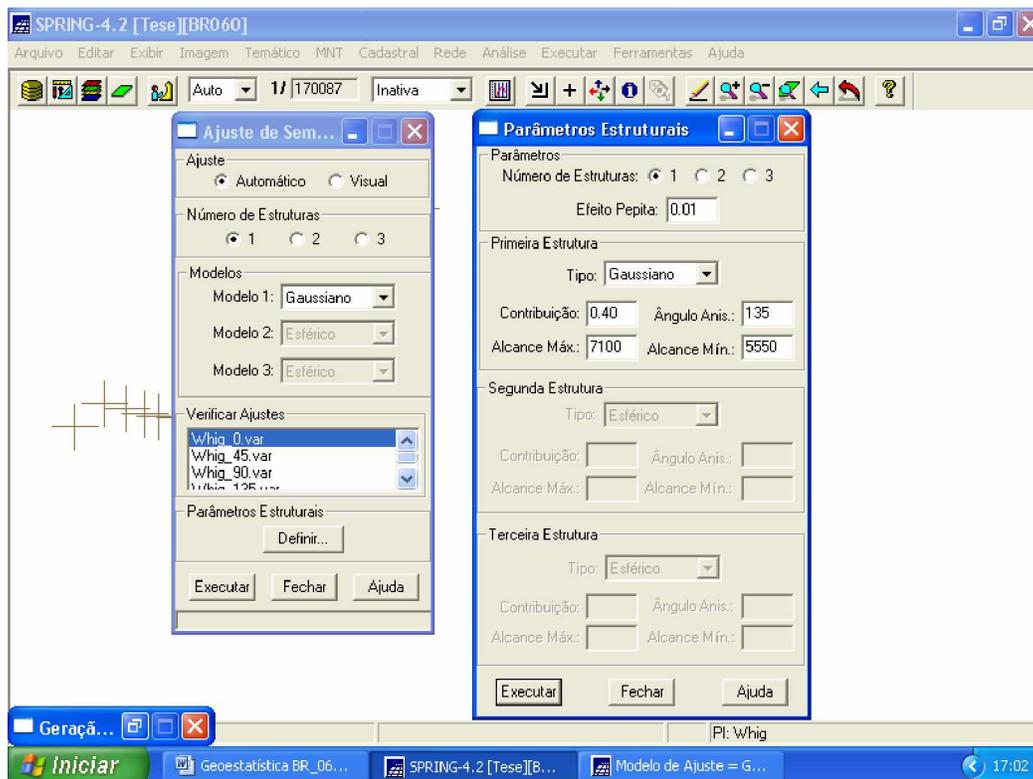


Figura 5.7 - Parâmetros Estruturais para composição do modelo de Krigagem para 0°

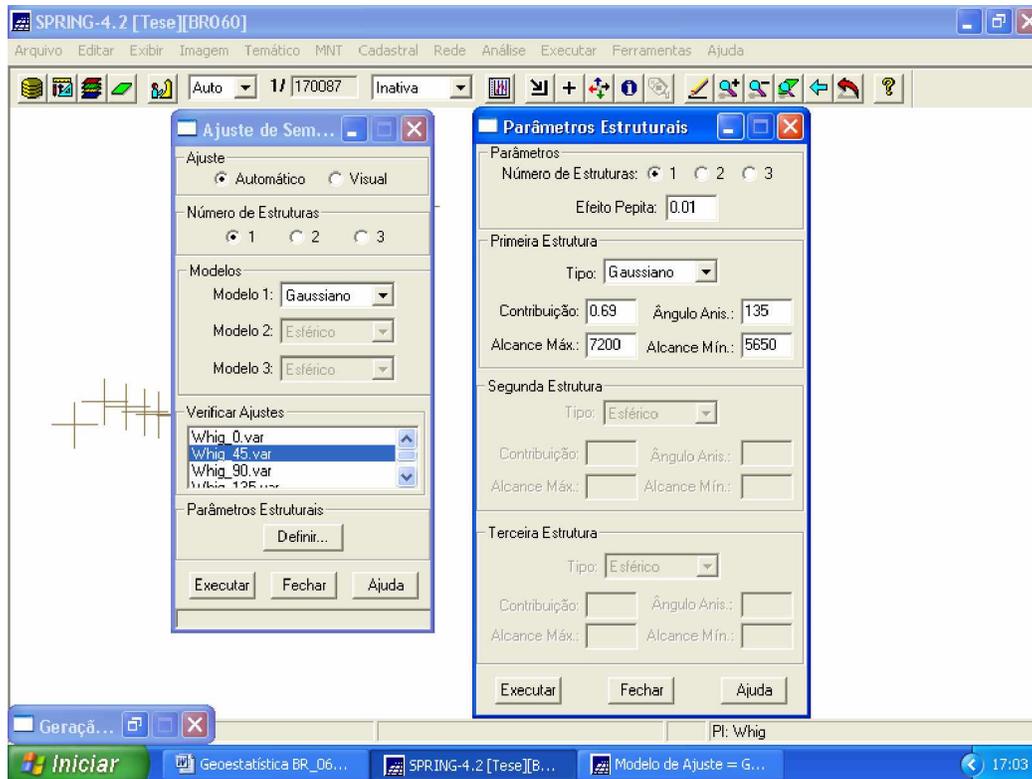


Figura 5.8 - Parâmetros Estruturais para composição do modelo de Krigagem para 45°

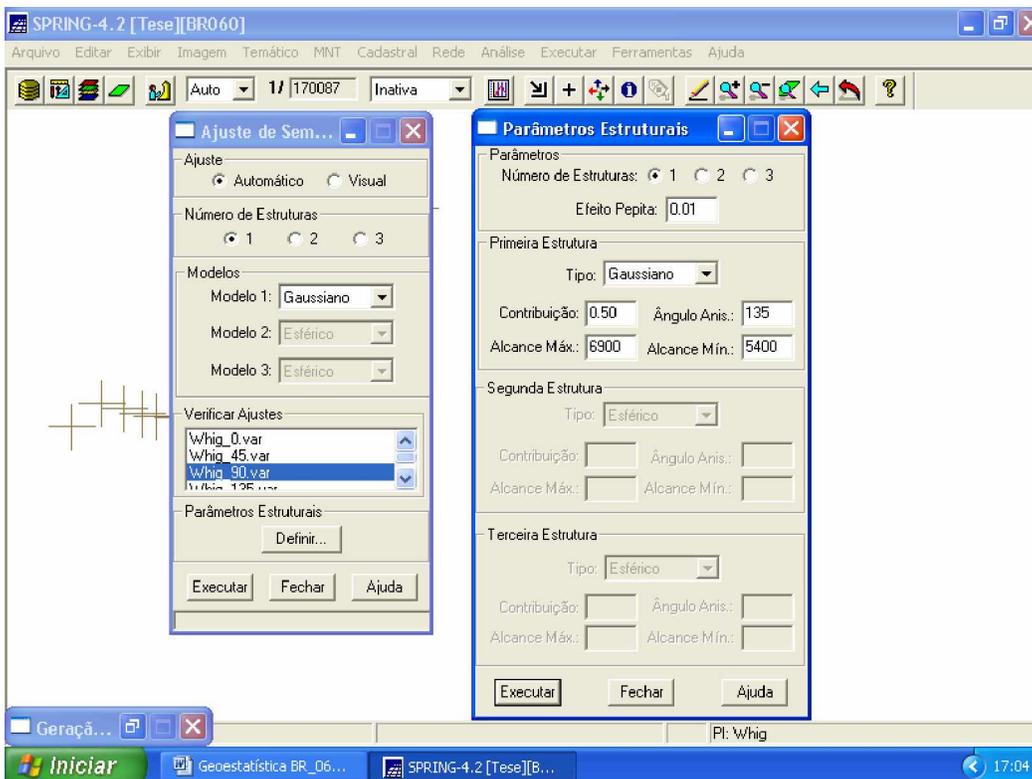


Figura 5.9 - Parâmetros Estruturais para composição do modelo de Krigagem para 90°

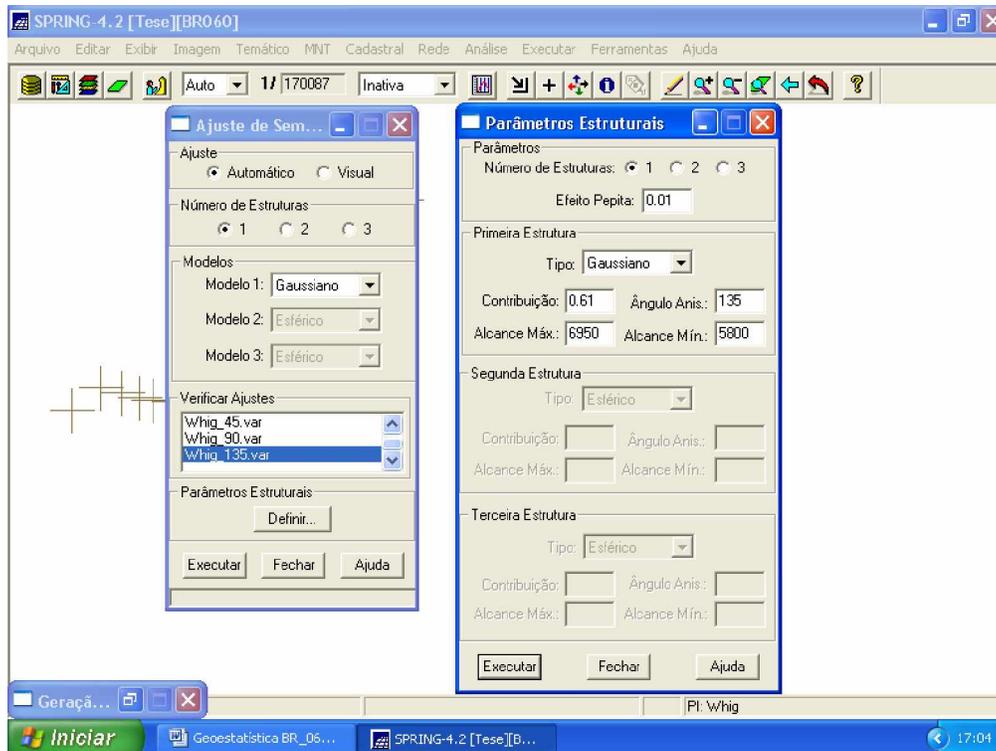


Figura 5.10 - Parâmetros Estruturais para composição do modelo de Krigagem para 135°

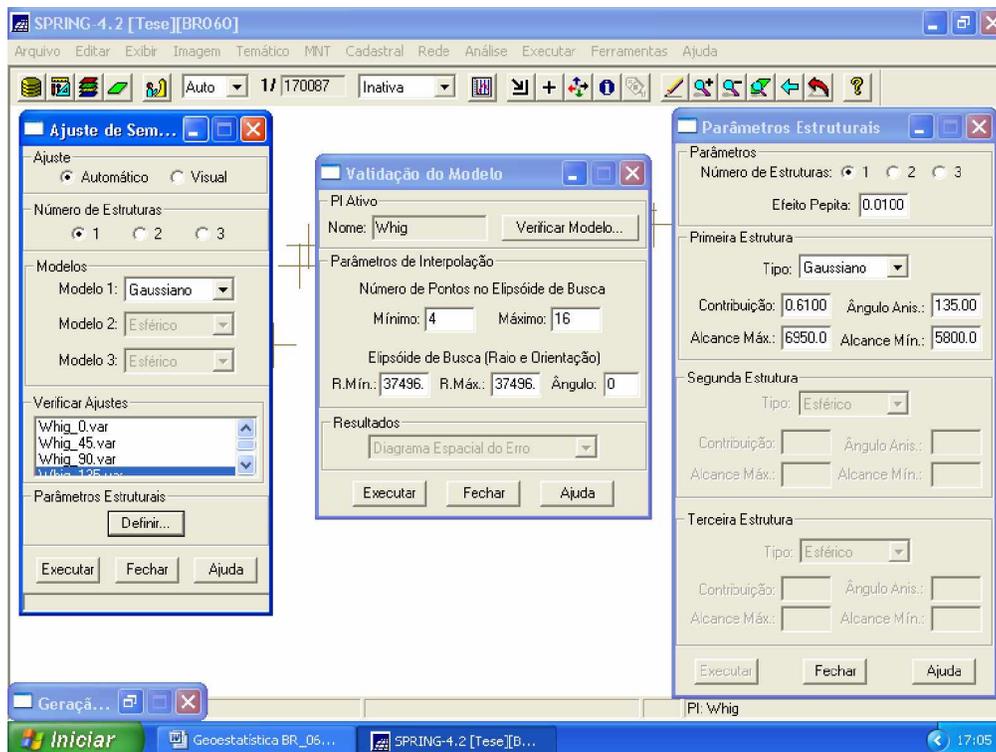


Figura 5.11 - Parâmetros estruturais da modelagem final da variável Umidade Higroscópica para a BR-060

5.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ERROS ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE

Dando prosseguimento foi feita uma análise dos possíveis erros encontrados na análise. Para tanto foram observadas as Figuras 5.12 a 5.14 que indicam que os erros encontrados na modelagem são bastante pequenos e aceitáveis, pois apresentam média de 0,063 com desvio-padrão de 0,509.

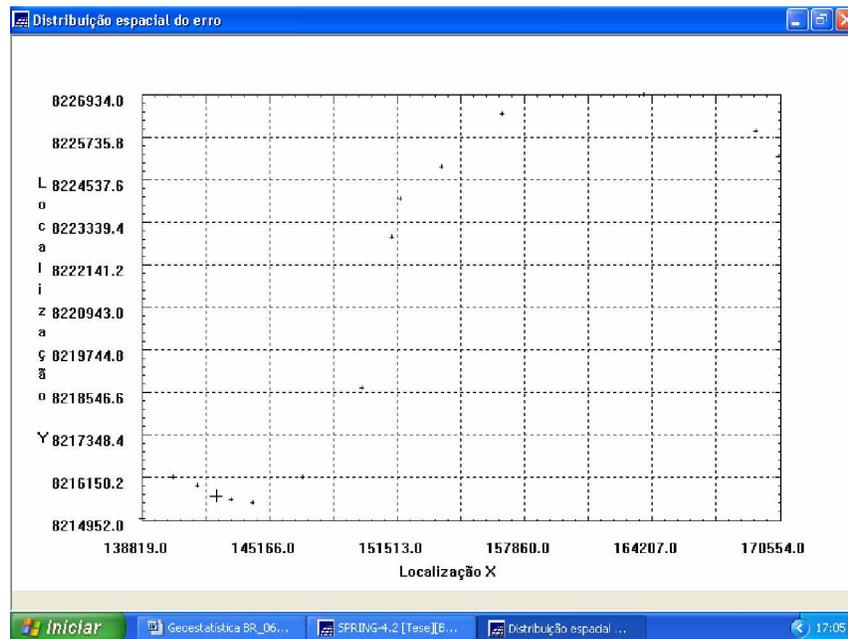


Figura 5.12 - Distribuição espacial do "Erro"

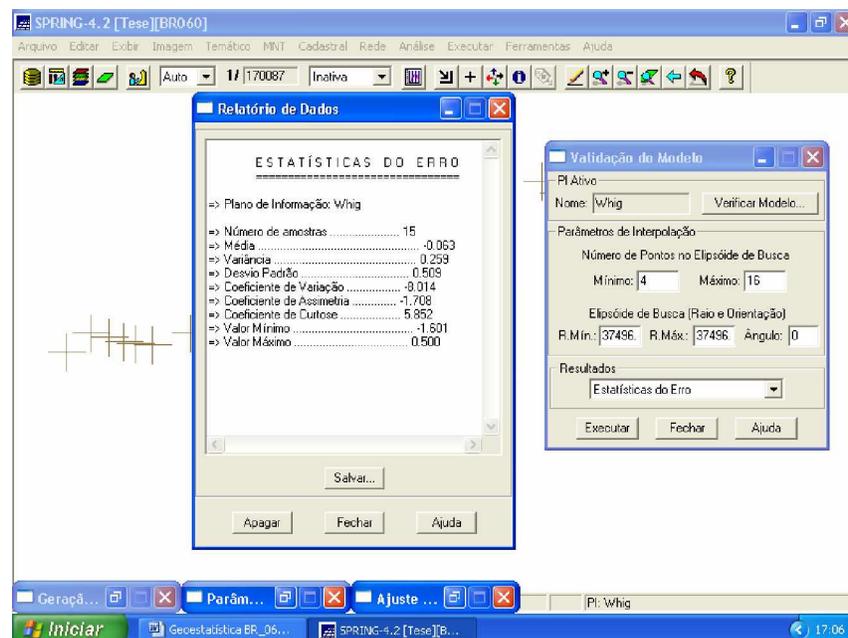


Figura 5.13 - Estatísticas do "Erro".

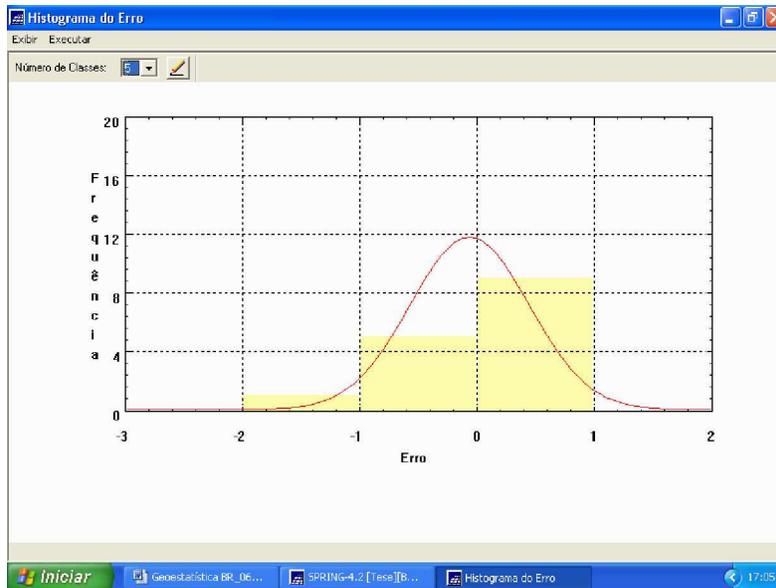


Figura 5.14 - Histograma do “Erro”.

O próximo procedimento foi a avaliação do gráfico de dados observados versus dados estimados a partir da modelagem em estudo (Figura 5.15). Importante observar que quanto mais os dados estiverem dispostos com angulação de 45° melhor a aproximação entre seus valores observados e estimados. Um único ponto apresentou resultado fora das imediações da perfeita relação entre dados estimados x observados. Trata-se do ponto 27 que apresentou umidade higroscópica de 2,09%. Esta disparidade se deu em função do alto valor encontrado nesse ponto, pois a maior umidade encontrada, para os outros pontos analisados, foi de 1,62%. A grande maioria dos dados apresentou valores menores que 1%.

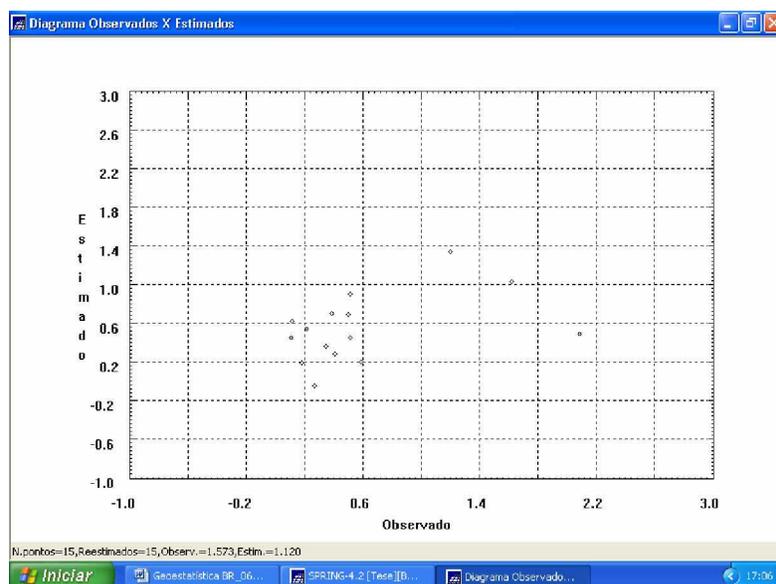


Figura 5.15 - Diagrama de valores observados x estimados.

5.3 - A ESPACIALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS – PROCEDIMENTOS FINAIS

Por fim foi gerada a krigeagem ordinária dos dados (Figura 5.16) a fim de produzir um plano de informação MNT com dados espacializados, no caso de umidade higroscópica.

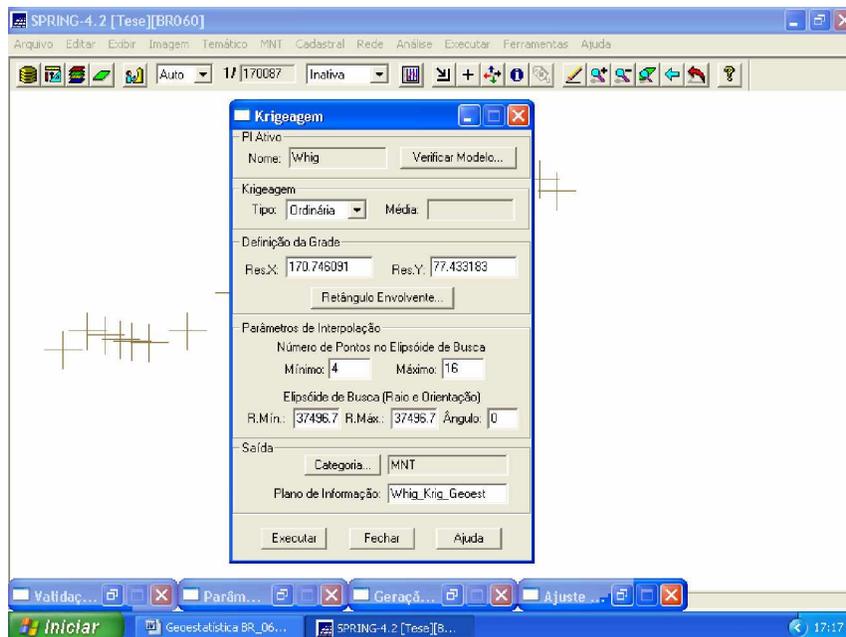


Figura 5.16 - Parâmetros finais para a Krigeagem da variável Umidade Higroscópica.

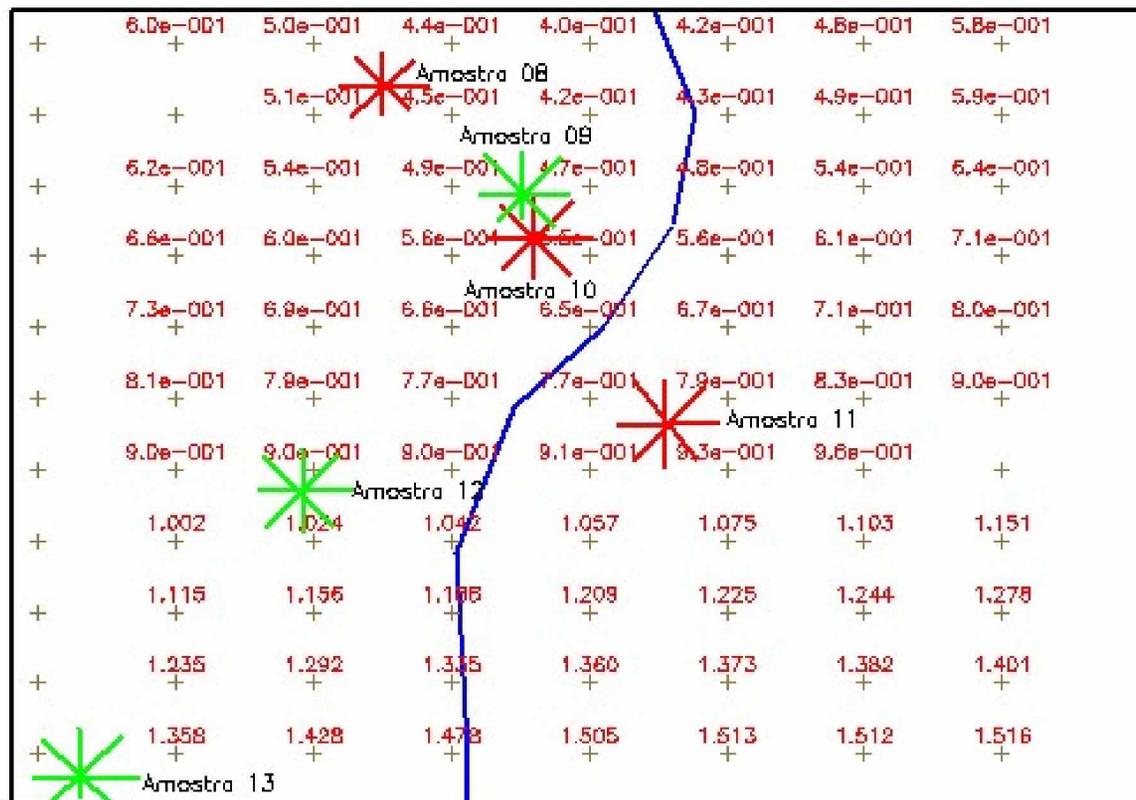
Na seqüência é apresentada a Figura 5.17 que demonstra o plano de informação obtido com a espacialização da variável higroscópica para as rodovias BR-060/DF-290. As cartas de umidade higroscópica para os trechos das rodovias BR-080/DF-220 e de massa específica para os trechos das rodovias BR-060/DF-290 e BR-080/DF-220 também foram obtidas com base na mesma modelagem apresentada para a carta de umidade higroscópica das rodovias BR-060/DF-290.

Considerando ainda a pequena quantidade amostral de dados utilizados na análise (apenas 30) e a fim de comprovar a eficiência na espacialização dos mesmos, alcançada nesta pesquisa, foi promovida a análise bidimensional com o objetivo de comparar as diferenças entre os dados levantados de campo em relação as informações de massa específica aparente seca e umidade higroscópica obtidas pela espacialização dos dados na modelagem geoestatística, ou seja, comparar os valores obtidos pela modelagem nos exatos pontos onde valores reais foram obtidos em laboratório.

O objetivo dessa análise foi comprovar em que grau de significância (α) e sua conseqüente confiança as diferenças entre os dados estimados e reais foram significativas (Tabela 5.2). Dessa análise (Tabela 5.3) pode-se evidenciar a confiança na análise em torno de 88% para a variável umidade higroscópica e em torno de 87% para a variável massa específica aparente seca. Esses resultados validam estatisticamente a espacialização das duas variáveis utilizadas na modelagem proposta neste estudo.

Finalmente, com o apoio da função suporte à decisão do programa SPRING foram novamente geradas, para a área de estudos, cartas de propensão ao surgimento de processos erosivos, a partir das variáveis estudadas. Os pesos de cada uma das variáveis especializadas foram determinados em função dos coeficientes estabelecidos na análise de regressão efetuada para a modelagem determinística apresentada. Com esses pesos e com a função de programação LEGAL do programa SPRING foram gerados os planos de informações (PI's) (Figuras 5.18 e 5.19) com as áreas de maior e menor propensão a surgimento de processos erosivos. Através das várias categorias encontradas para processos erosivos foi criada uma carta temática com as faixas de probabilidade de surgimento de processo erosivos, sendo: **1ª Classe** - Praticamente não erodível com probabilidade entre 0 e 25%; **2ª Classe** - Medianamente erodível com probabilidade entre 25 e 50%; **3ª Classe** - Muito erodível com probabilidade entre 50 e 75%; **4ª Classe** - Criticamente erodível com probabilidade entre 75 e 100%.

CARTA DE ESPACIALIZAÇÃO (POR KRIGEAGEM) DA VARIÁVEL UMIDADE HIGROSCÓPICA – TRECHO BR-080



- LEGENDA
- Ponto de coleta com erosão
 - Ponto de coleta sem erosão
 - Rodovia BR-080

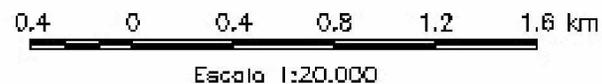
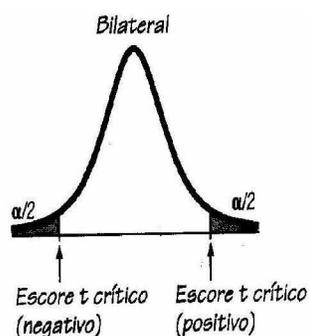


Figura 5.17 - Carta espacializada de Umidade Higroscópica (W hig.) para trecho da rodovia BR-080.

Tabela 5.2 - Valores de escores Z em função da significância (α) e dos graus de liberdade dos dados.



Distribuição t						
α						
Graus de liberdade	0,01 (bilateral)	0,02 (bilateral)	0,05 (bilateral)	0,10 (bilateral)	0,20 (bilateral)	0,50 (bilateral)
1	63,657	31,821	12,706	6,314	3,078	1,000
2	9,925	6,965	4,303	2,920	1,886	0,816
3	5,841	4,541	3,182	2,353	1,638	0,765
4	4,604	3,747	2,776	2,132	1,533	0,741
5	4,032	3,365	2,571	2,015	1,476	0,727
6	3,707	3,143	2,447	1,943	1,440	0,718
7	3,500	2,998	2,365	1,895	1,415	0,711
8	3,355	2,896	2,306	1,860	1,397	0,706
9	3,250	2,821	2,262	1,833	1,383	0,703
10	3,169	2,764	2,228	1,812	1,372	0,700
11	3,106	2,718	2,201	1,796	1,363	0,697
12	3,054	2,681	2,179	1,782	1,356	0,696
13	3,012	2,650	2,160	1,771	1,350	0,694
14	2,977	2,625	2,145	1,761	1,345	0,692
15	2,947	2,602	2,132	1,753	1,341	0,691
16	2,921	2,584	2,120	1,746	1,337	0,690
17	2,898	2,567	2,110	1,740	1,333	0,689
18	2,878	2,552	2,101	1,734	1,330	0,688
19	2,861	2,540	2,093	1,729	1,328	0,688
20	2,845	2,528	2,086	1,725	1,325	0,687
21	2,831	2,518	2,080	1,721	1,323	0,686
22	2,819	2,508	2,074	1,717	1,321	0,686
23	2,807	2,500	2,069	1,714	1,320	0,685
24	2,797	2,492	2,064	1,711	1,318	0,685
25	2,787	2,485	2,060	1,708	1,316	0,684
26	2,779	2,479	2,056	1,706	1,315	0,684
27	2,771	2,473	2,052	1,703	1,314	0,684
28	2,763	2,467	2,048	1,701	1,313	0,683
29	2,756	2,462	2,045	1,699	1,311	0,683
Grande (z)	2,575	2,327	1,960	1,645	1,282	0,675

CARTA DE PROPENSÃO A PROCESSOS EROSIVOS – BR-080 – DF-220

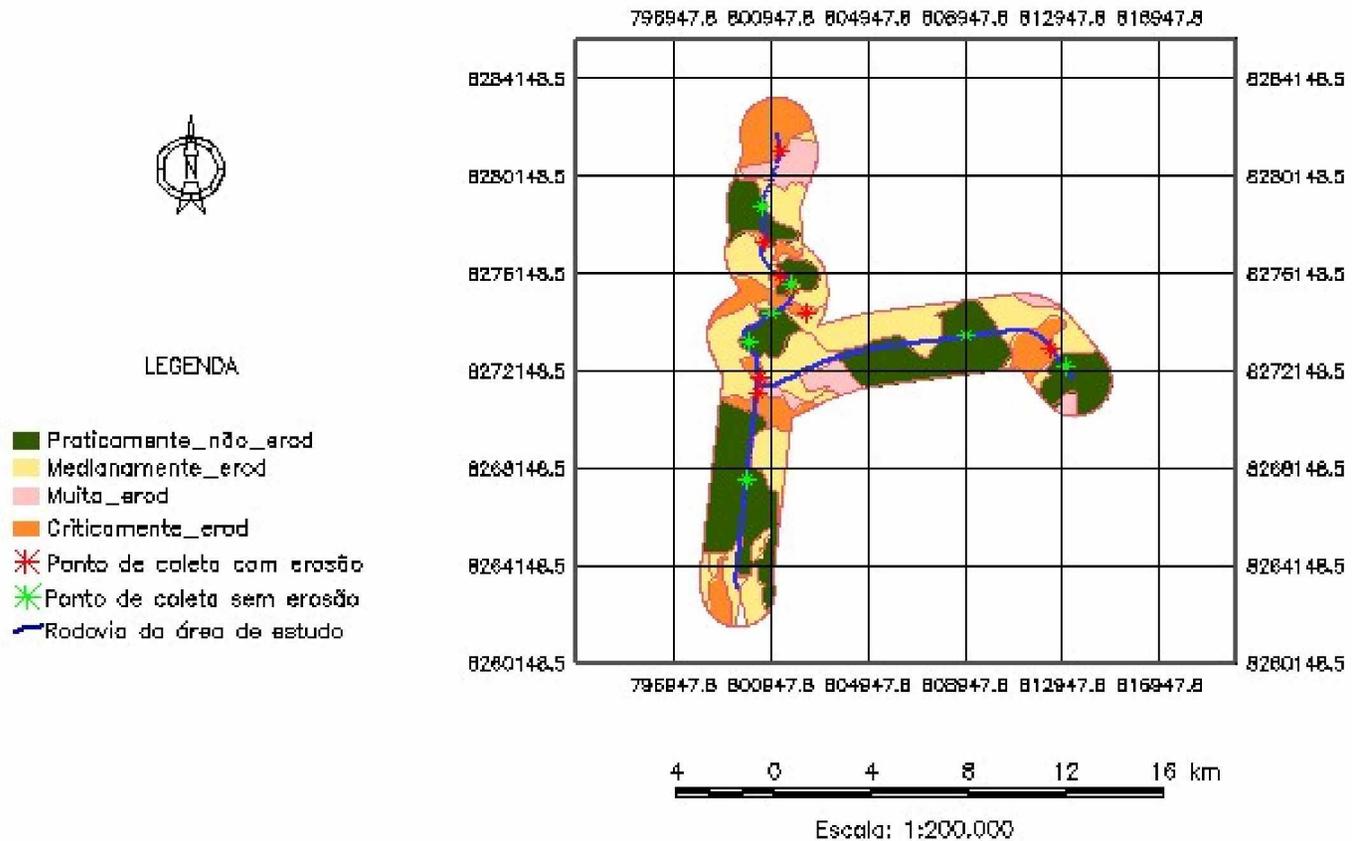


Figura 5.18 - Carta de propensão a processos erosivos nas rodovias BR-080 – DF-220 (2).

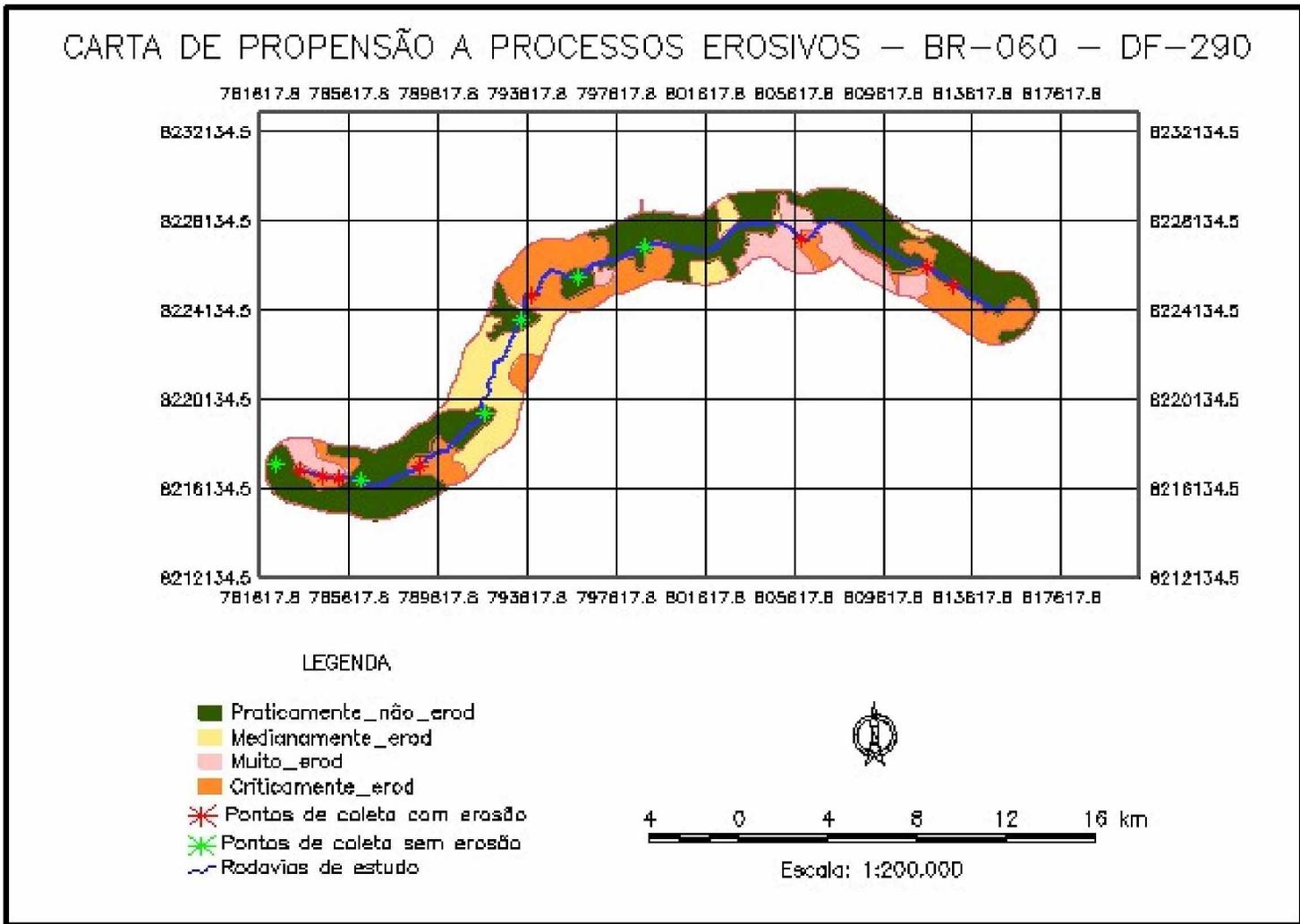


Figura 5.19 - Carta de propensão a processos erosivos nas rodovias BR-060 – DF-290 (2).

6 - VALIDAÇÃO DOS MODELOS

As antigas normas do Departamento Nacional de Estradas de Rodagens – DNER estabeleciam que os taludes de corte e de aterro, independente do tipo de solo e da altura dos mesmos, deveriam ter uma relação 2V:3H de sua inclinação com relação ao greide final da rodovia. Dessa forma, não raro, encontram-se tanto cortes como aterros com vários problemas de erosão, escorregamentos, quedas de barreiras, etc.

Assim este trabalho veio a corroborar com as novas Especificações de Serviços nº 280/97 e 282/97, do Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR do DNER, onde as mesmas detalham que “As inclinações dos taludes, tendo em vista a natureza dos solos e as condições locais, serão fornecidas pelo projeto”.

Dessa forma, se a altura dos taludes, tanto de corte, como de aterro, forem baixas e seus solos tiverem parâmetros de resistência altos, os mesmos poderão apresentar a inclinação máxima, preconizada pelas antigas normas de 2V:3H. Entretanto, se as alturas dos taludes forem crescendo e a resistência dos solos diminuindo, esta inclinação deverá ser reduzida até a inclinação necessária para que os fenômenos geotécnicos não ocorram. Com essa redução na inclinação dos taludes a velocidade de escoamento das águas superficiais seria mínima e com obras auxiliares de hidrosseadura, por exemplo, os problemas geotécnicos seriam eliminados. Assim as características geotécnicas dos solos de resistência e condutividade hidráulica seriam consideradas na determinação das inclinações desses taludes.

Este trabalho poderá ser uma ferramenta útil para a definição de pontos localizados, no caso da modelagem determinística pontual, ou de áreas, no caso da modelagem espacial, que tenham a propensão ao surgimento de processos erosivos. Com isso, esses pontos poderão ser tratados no momento da construção / restauração da rodovia, evitando os inconvenientes que os movimentos de massas provocam nas mesmas, onerando, e muito, os seus custos de conservação.

6.1 - VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DETERMINÍSTICA DE PREVISÃO DE PROCESSOS EROSIVOS.

O trabalho apresenta uma formulação matemática para, em função de algumas variáveis dos solos (peso solo, peso geologia, peso declividade, massa específica real dos grãos e umidade higroscópica) estabelecer a propensão ao surgimento de processos erosivos.

Na modelagem desenvolvida foi determinada a seguinte formulação matemática:

$$E = -2,663 + 0,036H. + 0,828M + 0,630S + 0,306G + 0,729D \quad (6.1)$$

Onde:

E = probabilidade de surgimento de processos erosivos;

H = umidade higroscópica;

M = massa específica real dos grãos;

S = peso do solo;

G = peso da geologia;

D = peso da declividade;

Desta forma, foram levantadas, em outubro de 2006, as informações de dois pontos amostrais, sendo um em local com a presença de erosão e outro em local sem a presença dos processos erosivos. Os locais amostrados localizam-se na rodovia BR-060 ao norte da rodovia DF-290 estudada nesse trabalho. (Figura 6.1).

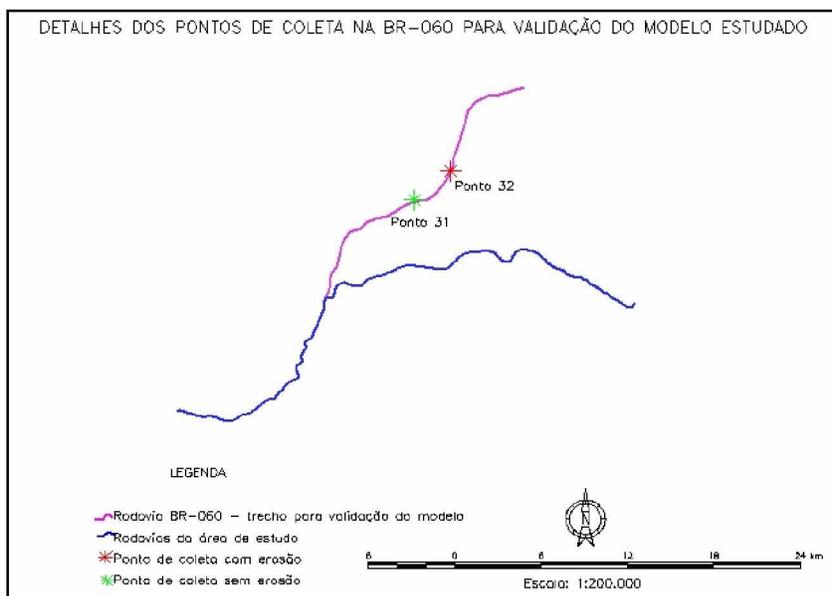


Figura 6.1 - Detalhe dos pontos de coleta na BR-060 para validação do modelo estudado

Nas Figuras 6.2 e 6.3 podem-se perceber os detalhes dos pontos de coleta 31 e 32.



Figura 6.2 - Detalhe do ponto de coleta 31 (em local sem a presença de processos erosivos).



Figura 6.3 - Detalhe do ponto de coleta 32 (em local com a presença de processos erosivos).

Na seqüência amostras georreferenciadas deformadas de solos foram coletadas nos dois pontos 31 (sem a presença de processos erosivos) e 32 (com a presença de processos erosivos). Foram executados os ensaios de umidade higroscópica e massa aparente seca dos grãos.

A amostra 31 apresentou massa específica igual a 2,69 e a amostra 32 o resultado de 2,73. Para a umidade higroscópica as duas amostras apresentaram mesmo resultado 0,61%.

A partir dos dados do projeto Radam Brasil, das informações levantadas no campo e das imagens de satélites quickbird da região e ainda com o auxílio da fotointerpretação foram estabelecidas as cartas de geologia, solos de declividade para a região. (Figuras 6.4 a 6.6).

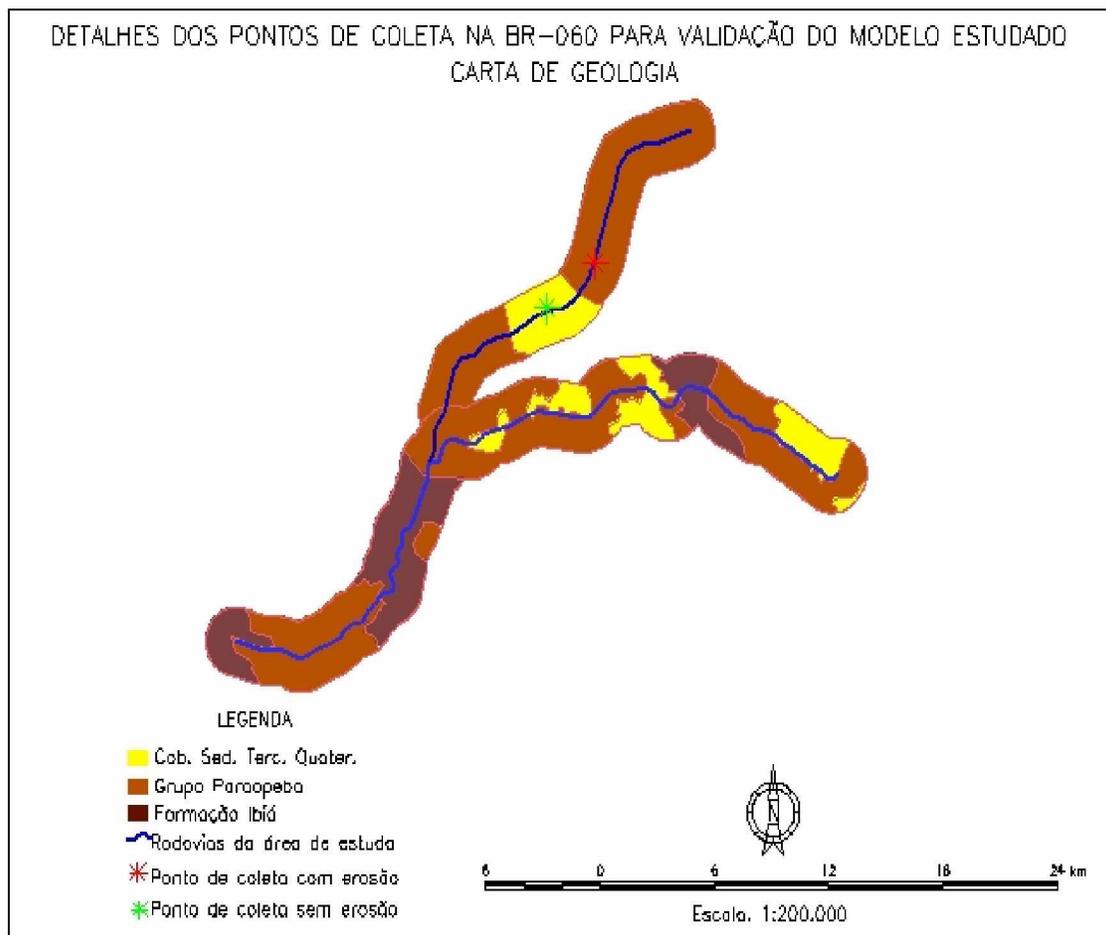


Figura 6.4 - Carta de geologia do trecho de validação do modelo proposto de análise de propensão a processos erosivos.

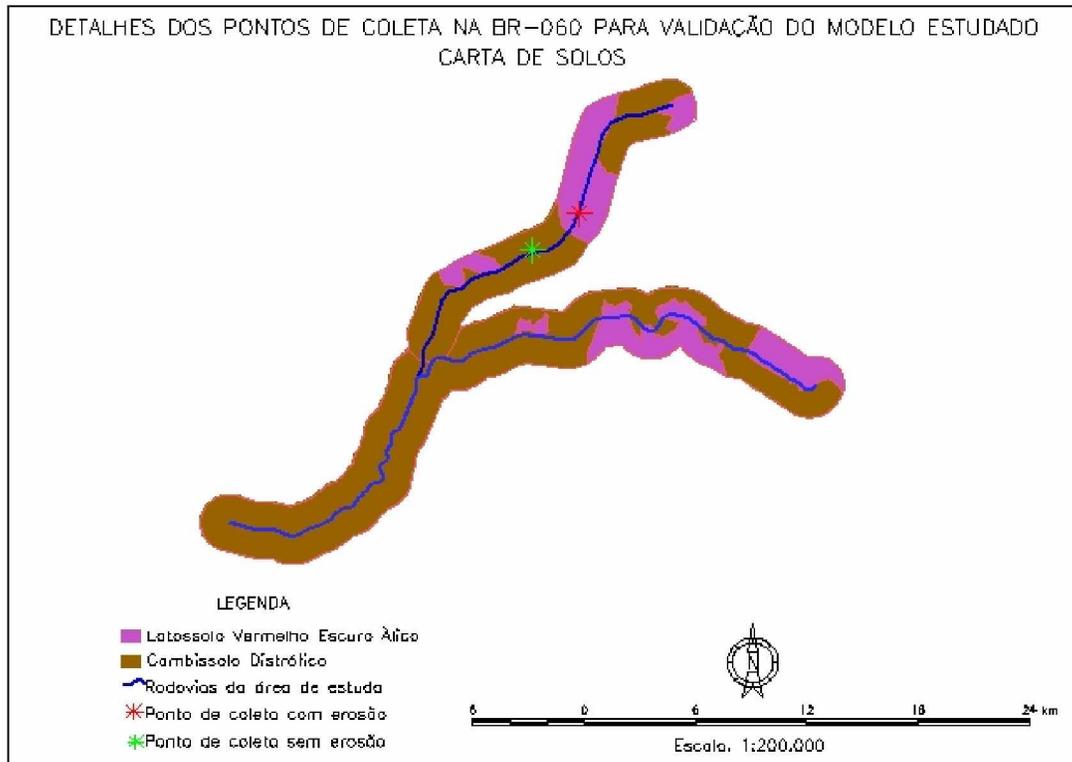


Figura 6.5 - Carta de solos do trecho de validação do modelo proposto de análise de propensão a processos erosivos.

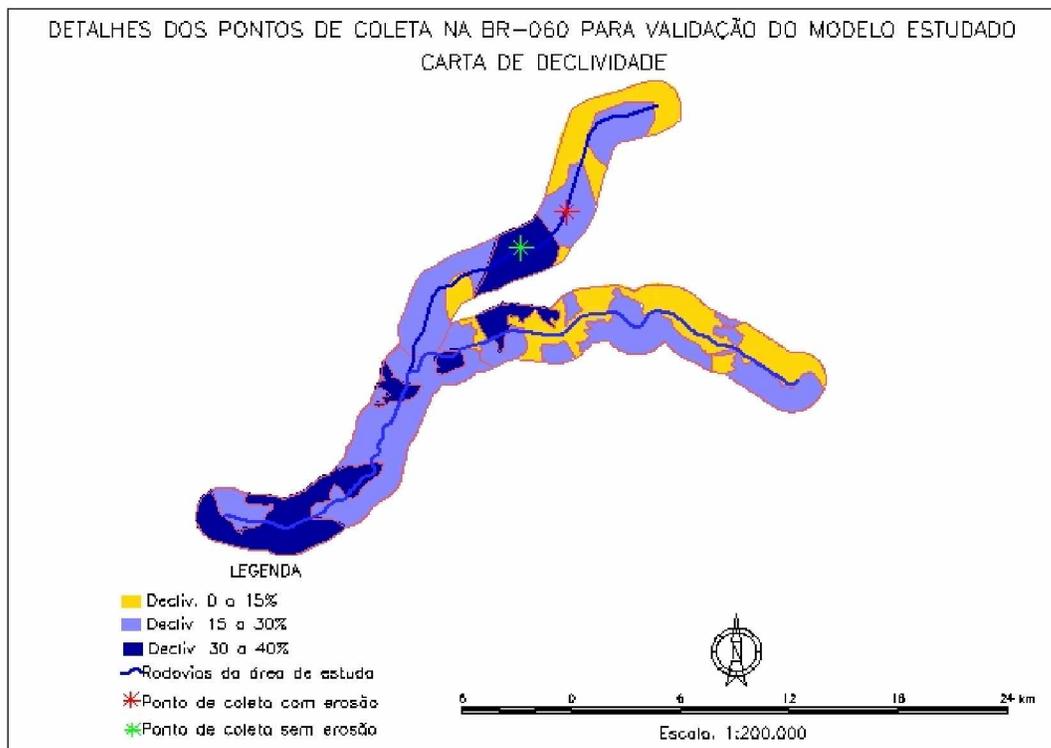


Figura 6.6 - Carta de declividade do trecho de validação do modelo proposto de análise de propensão a processos erosivos.

Com as informações extraídas das cartas de geologia, solos e declividade em função dos pesos das classes estabelecidas na modelagem proposta na metodologia desenvolvida no trabalho, sendo que esses pesos foram dados em função da quantidade de pontos amostrais com e sem a presença de erosão dentro de cada variação das classes temáticas das cartas, onde uma determinada classe temática apresentasse em cinco pontos com erosão e em vinte e cinco pontos sem erosão, por exemplo, seu peso, na modelagem dos processos erosivos, seria de 05/30, ou 0,20, chegou-se aos seguintes valores numéricos para os dois pontos amostrados (Tabela 6.1):

Tabela 6.1 - Valores dos parâmetros utilizados para validação da modelagem determinística de propensão a processos erosivos.

Parâmetro	Amostra 31		Amostra 32	
	Descrição	Valor	Descrição	Valor
Massa Específica dos Grãos (g/cm³)	-	2,69	-	2,73
Umidade Higroscópica (%)	-	0,61	-	0,61
Carta de Solos (Fator)	Cambissolo Distrófico	0,61	Latossolo Vermelho Álico	0,63
Carta de Geologia (Fator)	Cobertura Sedimentar Terciária-Quaternária	0,00	Grupo Paraopeba	0,93
Carta de Declividade (Fator)	Declividade entre 30% a 40%	0,13	Declividade entre 15% a 30%	0,94

Finalmente, esses parâmetros foram utilizados para a determinação do coeficiente estabelecido na modelagem proposta nesse estudo. Para o solo 31 chegou-se a um resultado igual a 0,065 e para o solo 32 chegou-se a um resultado igual a 0,986.

Considerando que nas premissas básicas do modelo desenvolvido quanto mais próximo de 1 (um) o valor, maior a propensão a processos erosivos nos solos e, por outro lado, quanto mais próximo de 0 (zero), menor a propensão a surgimento de processos erosivos nos solos. Considerando ainda que o solo 31 foi extraído em local estável e sem a presença de processos erosivos e que o solo 32 foi extraído em local com adiantado processo de erosão, pode verificar que o modelo se mostrou eficiente.

6.2 - VALIDAÇÃO DA MODELAGEM ESPACIALIZADA DE PREVISÃO DE PROCESSOS EROSIVOS.

A fim de consolidar a proposta desenvolvida neste estudo, a seguir é apresentada uma comparação dos resultados alcançados pelas cartas de propensão ao surgimento de processos erosivos com as figuras retiradas nos locais de transição das categorias de propensão a processos erosivos dessas cartas. Pelas Figuras 6.7 a 6.26 pode-se perceber a eficiência do trabalho desenvolvido.

O primeiro local fotografado estava localizado nas coordenadas S 16° 06' 41,87" W 48° 18' 20,97" (Figura 6.7). Pelas Figuras 6.8 (visão geral da área), 6.9 (trecho sem a presença de processos erosivos) e 6.10 (trecho com sulcos e princípios de ravinamentos), pode-se perceber a transição entre as áreas com e sem a presença de processos erosivos.

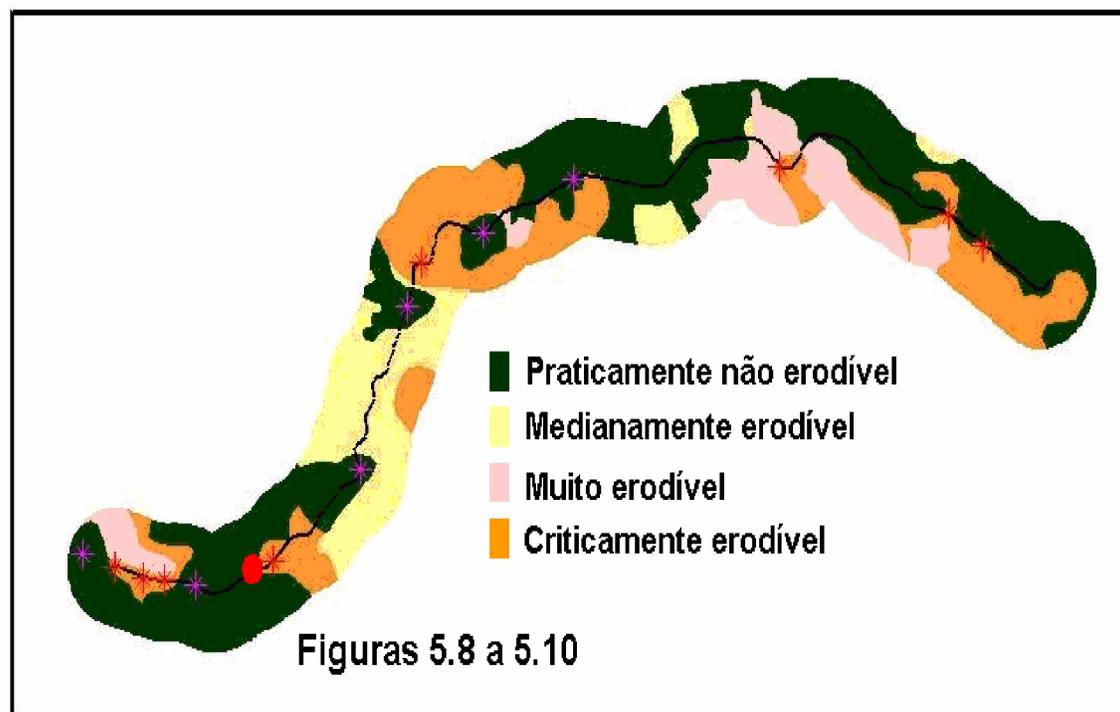


Figura 6.7 - Detalhe de ponto nas coordenadas S 16° 06' 41,87" e W 48° 18' 20,97



Figura 6.8 - Visão geral da área de coordenadas S 16° 06' 41,87" e W 48° 18' 20,97"



Figura 6.9 - Visão geral do trecho sem erosão - coord. S 16° 06' 41,87" e W 48° 18' 20,97"



Figura 6.10 - Visão geral do trecho com erosão - coord. S 16° 06' 41,87'' e W 48° 18' 20,97''

O segundo local fotografado estava localizado nas coordenadas S 16° 02' 37,10'' W 48° 15' 26,29'' (Figura 6.11). Pela Figura 6.12 (visão geral da área), pode-se perceber a transição entre as áreas com e sem a presença de processos erosivos.

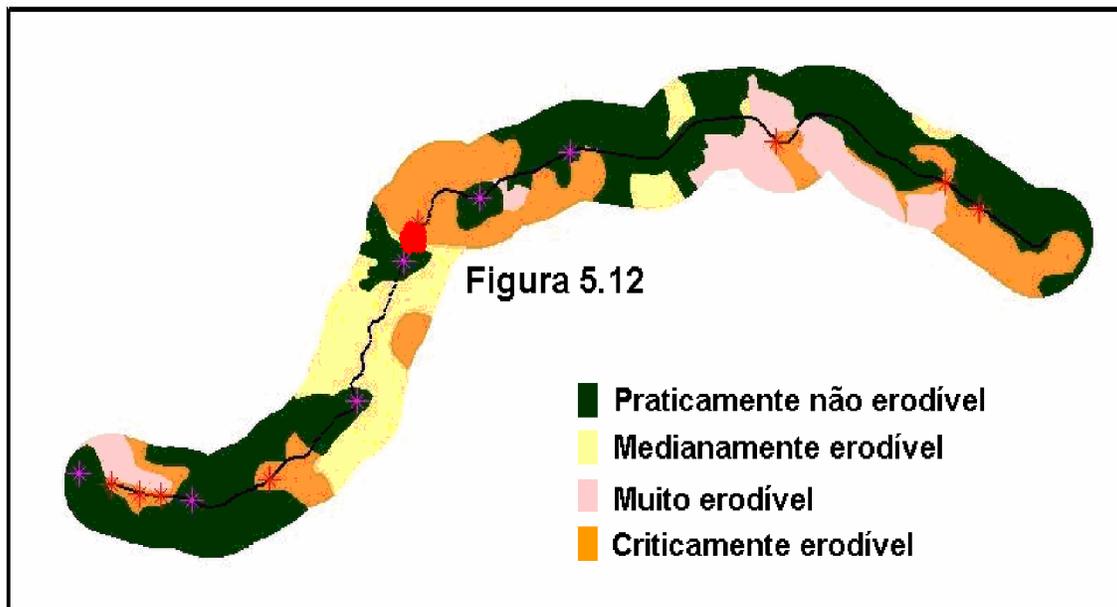


Figura 6.11 - Detalhe de ponto nas coordenadas S 16° 02' 37,10'' e W 48° 15' 26,29''



Figura 6.12 - Visão geral do trecho de transição com e sem processos erosivos. Coordenadas S 16° 02' 37,10" e W 48° 15' 26,29"

O terceiro local fotografado estava localizado nas coordenadas S 16° 00' 48,70" W 48° 09' 52,94" (Figura 6.13). Pelas Figuras 6.14 (visão geral da área), 6.15 (trecho sem a presença de processos erosivos) e 6.16 (trecho com presença de processos erosivos), pode-se perceber a transição entre as áreas com e sem a presença de erosão.

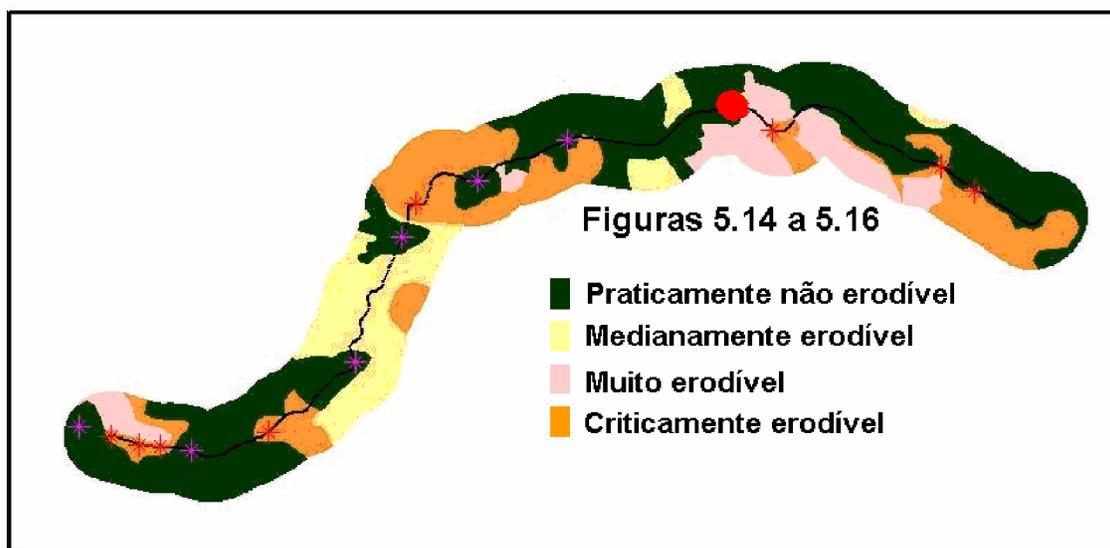


Figura 6.13 - Detalhe de ponto nas coordenadas S 16° 00' 48,70" e W 48° 09' 52,94"



Figura 6.14 - Visão geral da área de coordenadas S 16° 00' 48,70" e W 48° 09' 52,94"



Figura 6.15 - Visão geral do talude sem erosão - coord. S 16° 00' 48,70" e W 48° 09' 52,94"



Figura 6.16 - Visão geral trecho com erosão - coord. S 16° 00' 48,70" e W 48° 09' 52,94"

O quarto local fotografado estava localizado nas coordenadas S 16° 01' 28,87" W 48° 05' 34,82" (Figura 6.17). Pelas Figuras 6.18 (visão geral da área), 6.19 (trecho sem a presença de processos erosivos) e 6.20 (trecho com presença de processos erosivos), pode-se perceber a transição entre as áreas com e sem a presença de erosão.

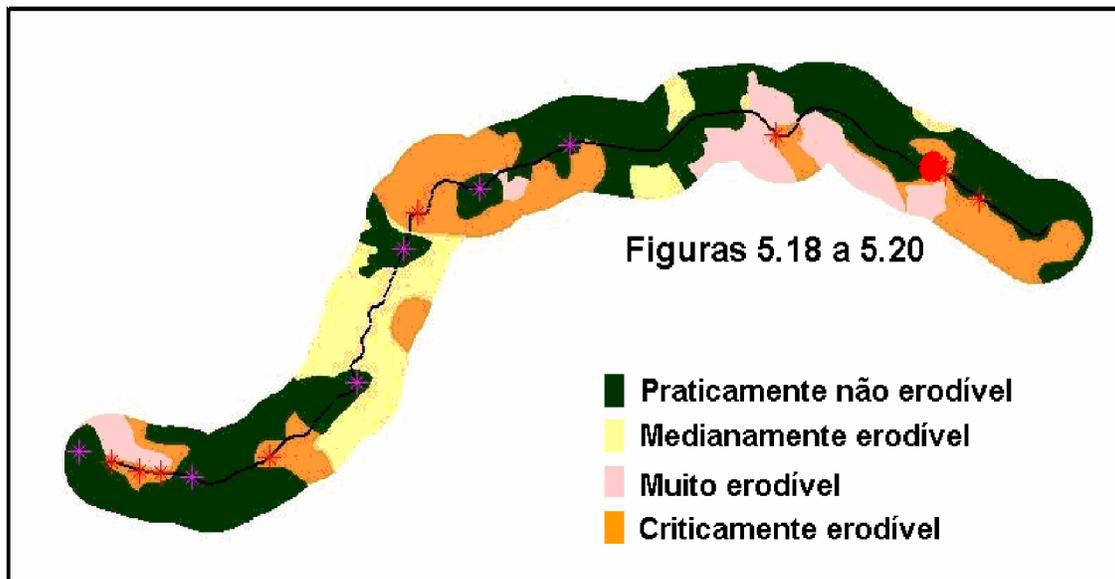


Figura 6.17 - Detalhe de ponto nas coordenadas S 16° 01' 28,87" e W 48° 05' 34,82"

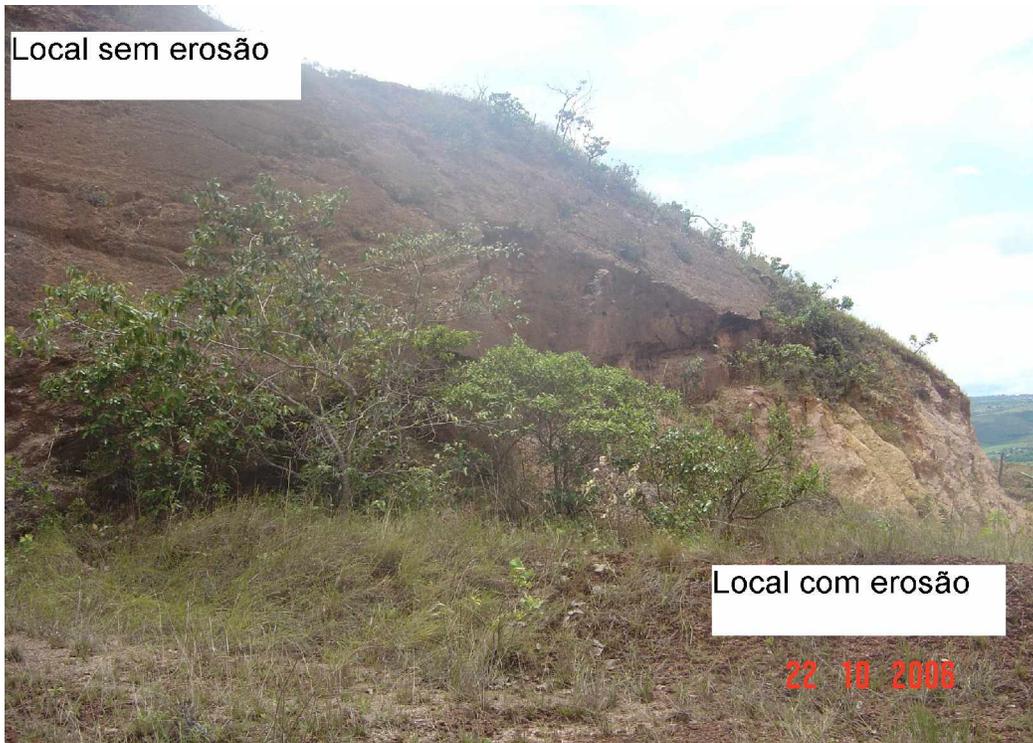


Figura 6.18 - Visão geral da área de coordenadas S 16° 01' 28,87" e W 48° 05' 34,82"



Figura 6.19 - Visão geral do talude sem erosão – cd. S 16° 01' 28,87" e W 48° 05' 34,82"



Figura 6.20 - Visão geral talude com erosão - cd. S 16° 01' 28,87" e W 48° 05' 34,82"

O quinto local fotografado estava localizado nas coordenadas S 15° 33' 36,03" W 48° 11' 48,61" (Figura 6.21). Pelas Figuras 6.22 (visão geral da área), 6.23 (trecho sem a presença de processos erosivos) e 6.24 (trecho com presença de processos erosivos), pode-se perceber a transição entre as áreas com e sem a presença de erosão.

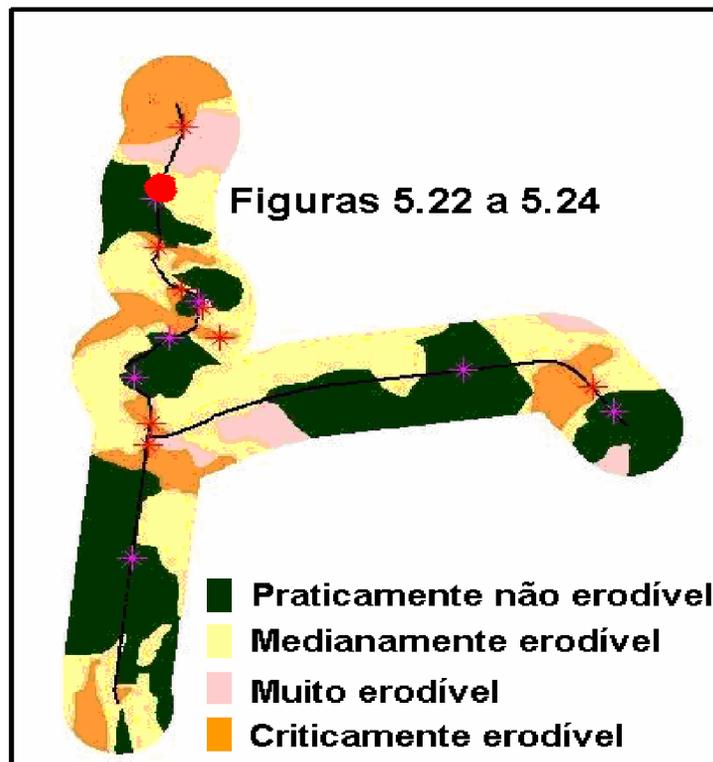


Figura 6.21 - Detalhe de ponto nas coordenadas S 15° 33' 36,03" e W 48° 11' 48,61"



Figura 6.22 - Visão geral da área de coordenadas S 15° 33' 36,03" e W 48° 11' 48,61"



Figura 6.23 - Visão geral do talude sem erosão – cd. S 15° 33' 36,03" e W 48° 11' 48,61"



Figura 6.24 - Visão geral talude com erosão - cd. S 15° 33' 36,03" e W 48° 11' 48,61"

O sexto local fotografado estava localizado nas coordenadas S 15° 36' 18,62" W 48° 11' 53,66" (Figura 6.25). Pela Figura 6.26 (visão geral da área), pode-se perceber a transição entre as áreas com e sem a presença de processos erosivos.

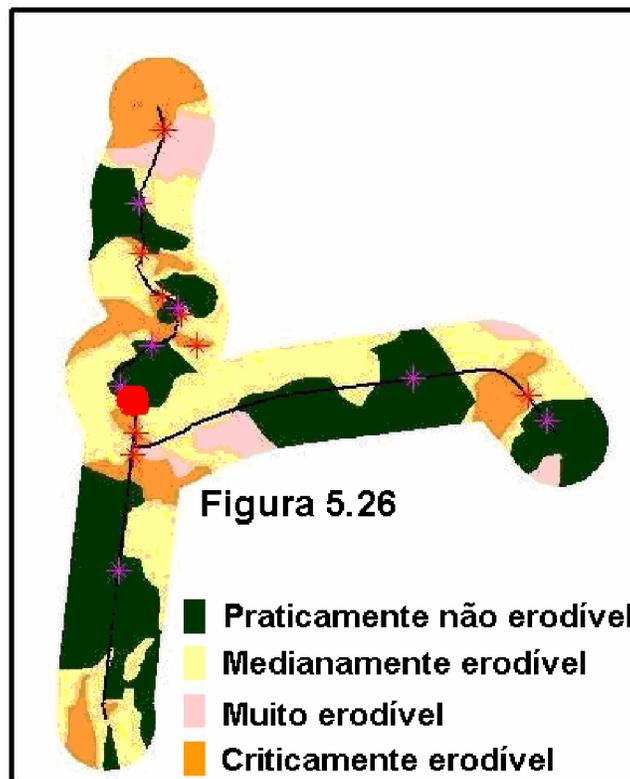


Figura 6.25 - Detalhe de ponto nas coordenadas S 15° 36' 18,62" e W 48° 11' 53,66"



Figura 6.26 - Visão geral do trecho de transição com e sem processos erosivos. Coordenadas S $15^{\circ} 36' 18,62''$ e W $48^{\circ} 11' 53,66''$

7 - CONCLUSÕES

O trabalho apresentado demonstra a possibilidade de previsão de processos erosivos em áreas de influência de rodovias a partir de uma modelagem em função de cartas temáticas de geologia, geomorfologia, declividade, ocupação e tipo de solos, além de parâmetros físicos como umidade higroscópica e massa específica aparente seca.

Entretanto como os mapas temáticos do projeto Radam Brasil se apresentavam em escalas com pequeno detalhamento de suas informações (escala 1:1.000.000) a utilização de imagens de satélite de alta resolução se mostrou de extrema eficiência no detalhamento da melhor compartimentação das informações desses mapas temáticos, pois com o auxílio da fotointerpretação dessas imagens, aliadas a levantamentos / inspeções de campo, as informações dos mapas temáticos puderam ser melhor detalhadas.

Como alguns dados utilizados nos modelos se encontravam especializados (mapas temáticos) e outros não (umidade higroscópica e massa específica aparente seca dos solos) foi necessária a espacialização dessas variáveis para a geração da modelagem, em escala regional, dos processos erosivos. A metodologia adotada, validada por ferramentas geoestatísticas se mostrou eficiente, produzindo erros, entre parâmetros reais e estimados menores que 15%.

Já para a modelagem determinística houve a necessidade de atribuir valores aos atributos dos solos relacionados aos mapas temáticos de geologia, geomorfologia, declividade, vegetação, tipo e uso e ocupação do solo. Para tanto o critério de definição da ponderação (peso) de cada atributo se deu em cima da quantidade de cada atributo que pertencia a regiões com processo erosivos deflagrados sobre a quantidade total desses atributos em toda a área de pesquisa. Esta metodologia também se mostrou eficiente na análise, pois o modelo final chegou com um coeficiente de determinação (r^2) de 0,75.

O trabalho ora apresentado poderá ser expandido para qualquer região do país, desde que seguida a metodologia aqui desenvolvida. Acredita-se que a proposta aqui apresentada servirá como apoio aos órgãos rodoviários nacionais no que diz respeito ao dimensionamento das inclinações de taludes de cortes e de aterro, pois a propensão a surgimento dos processos erosivos em cada ponto analisado poderá ser estabelecida através da modelagem aqui apresentada.

Assim, grandes prejuízos provocados pelos processos erosivos poderão ser evitados uma vez que surgem nos solos justamente em função do mau dimensionamento da inclinação desses taludes em função de características locais.

Como as normas do DNIT em vigor que determinam as inclinações dos taludes de corte e aterros de rodovias não prevêm a inclinação dos mesmos em função do tipo de solo que os constitui e ainda, baseado nos estudos aqui apresentados que demonstram a necessidade dessa compatibilização a primeira sugestão seria a da elaboração de um estudo definindo uma metodologia parametrizada para a definição dos ângulos de inclinação dos taludes de estradas de cortes e aterros em função das características geológico-geotécnicas dos mesmos. Esse estudo, caso desenvolvido, poderia servir de embasamento para a emissão de uma Instrução de Serviços do DNIT.

Como os mapas temáticos de geomorfologia apontaram correlação 1 (um) com os processos erosivos valeria a proposta de estudar mais profundamente esta relação.

Outra proposta seria a de estudos para grandes áreas, seguindo a mesma proposta aqui apresentada, expandido a ação da pesquisa não só para o meio rodoviário, como também para a agricultura, a fim de evitar a perda de solo fértil nas lavouras nacionais, causadas pelos processos laminares de erosão.

Finalmente, a terceira proposta estaria relacionada a desenvolvimento de estudos relativos a definição de novas variáveis a serem considerados nas modelagens futuras de processos erosivos. Poderia ser pesquisada, por exemplo, a influência da coesão e do ângulo de atrito nos processos erosivos dos solos, levando em consideração as cartas temáticas de geologia, geomorfologia, declividade e ocupação e tipo de solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M.; RIBEIRO, A.C.O. (1998). **A Terra em Transformação**. Geologia de Engenharia, Oliveira, A. M. S. & Brito, S. N. A. (eds), FAPESP, São Paulo, SP, pp. 7-13.
- ALMEIDA, G.A.G. (2003). **Utilização de um Sistema de Informação Geográfica e Resultados de Ensaio SPT como subsídio ao Planejamento Urbano**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 98 p.
- ARAKI, M.S. (1997). **Aspectos Relativos às Propriedades dos Solos Porosos Colapsíveis do Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 215 p.
- ARAÚJO, A.L. (2002). **Construção Social dos Riscos e Degradação Ambiental: Município de Sousa, um Estudo de Caso**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 130 p.
- ARAÚJO, F.A.R. (1994). **Contribuição ao Estudo da Erodibilidade de Solos Tropicais, Baseada em Ensaio de Sucção e na Metodologia MCT**. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São Paulo, SP, 231 p.
- ASSUNÇÃO, R.A.B. (2004). **Uso de Tipos de Krigagem no Estudo da Produtividade de Soja em uma Área espacialmente Referenciada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste de Paraná, Cascavel, PR, 90 p.
- BARRETO NETO, A.A. (2004). **Modelagem Dinâmica de Processos Ambientais**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 137 p.
- BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W.Y.Y.; DIAS, R.D. (1998). **Avaliação da Erodibilidade de Perfis de Solos Residuais da Grande Porto Alegre**. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Brasília, DF, 1:557-563.
- BASTOS, C.A.B. (1999). **Estudo Geotécnico sobre a Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 323 p.
- BELLINAZZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPINOLA, C. R.; LEPSCH, I. F. (1961). **Manual para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação de Terras no Sistema de Capacidade de Uso**. SBCS, Campinas, SP, 175 p.
- BLAIS, R.A. & CARLIER, P.A. (1968). **Applications of geostatistics in ore evaluation**. In: CANADIAN INSTITUTE OF MINING AND METALURGY, Ore Reserve Estimation and Grade Control, Montreal, (Special Volume 9), pp. 41-48.
- BURGESS, T.M. & WEBSTER, R. (1980a) **Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging**. The Journal of Soil Science, 31: 315-331.

- BURGESS, T.M. & WEBSTER, R. (1980b) **Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging.** The Journal of Soil Science, 31: 333-341.
- BURROUGH, P.A. (1987). **Principles of geographical information systems for land resources assessment.** Oxford, Clarendon Press, 193p.
- BURROUGH, P.A.; VAN RIJN, R. e RIKKEN, M. (1996). **Spatial data quality and error analysis Issues: GIS functions and environmental modeling.** GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues. Edited by Michael F. Goodchild, Louis T. Steyaert, Bradley O Parks, Carol Johnston, David Maidment, Michael Crane, and Sandi Gendinning. p.29-34.
- BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R.A. (1988). **Principles of geographical information systems.** New York: Oxford University Press, 334p.
- CÂMARA, G. & MEDEIROS, J.S. de (1998). **Princípios Básicos em Geoprocessamento.** Sistema de Informações Geográficas: Aplicação na Agricultura. ASSAD, E.D.; SANO, E. E. (eds), EMBRAPA, Brasília, DF, pp. 3-11.
- CAMARGO, E.C.G. (1997). **Desenvolvimento, Implementação e Teste de Procedimentos Geoestatísticos (Krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas.** Dissertação de Mestrado. Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, SP, 121 p.
- CAMPOS, C. V. (2001). **Análise das Redes de Infra-Estrutura e Vazios Urbanos com o Uso de Geoprocessamento.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121 p.
- CASTRO DA CRUZ, J.B. (2003). **Avaliação Operacional da Revisão da Equação Universal de perda de Solo (REUPS) para o Latossolo Vermelho Distrófico Típico de Ponta Grossa, PR.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Londrina, PR, 65 p.
- CAVIGLIONE, J.H. (1999). **A Influência da Evolução da Tecnologia SIG na Pesquisa de Simulação da Erosão de Solo: Estudo de Caso de Mambore - PR.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, PR, 114 p.
- CRUZ, E.S. (2004). **Estudo dos Impactos do Uso do Solo Através da Modelagem da Geração do Escoamento Superficial e Erosão do Solo na Região do Cariri Paraibano.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 177 p.
- D'AGOSTINI, L.R. (1999). **Erosão: o Problema mais que o Processo.** Ed. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 131 p.
- DNER – Departamento Nacional de estradas de Rodagens (1997). **ES 280/97 – Terraplenagem - cortes.** Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico – IPR, Divisão de Capacitação Tecnológica, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

- DNER – Departamento Nacional de estradas de Rodagens (1997). **ES 282/97 – Terraplenagem - aterros**. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico – IPR, Divisão de Capacitação Tecnológica, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.
- DNER – Departamento Nacional de estradas de Rodagens (1996). **ISA 01 – Impactos da Fase de Planejamento de Rodovias**. Diretoria de Engenharia Rodoviária, Divisão de Estudos e Projetos, Serviço de Estudos Rodoviários e Ambientais, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1988). **Definição e Notação de Horizontes e Camadas de Solos**. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro, RJ, 54 p.
- ESPINOZA, J.A.A. (2001). **Processos Erosivos e Dinâmica Litorânea nos Setores de anglaralto e Olon, Província de Guayas – Equador**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto MG, 136 p.
- FELGUEIRAS, C.A. (1999). **Modelagem Ambiental de Incertezas em Sistemas de Informação Geográfica: O Paradigma Geoestatístico por Indicação**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, SP, 174 p.
- FERNÁNDEZ, G.A.V. (1996). **Análise de Erosão do Solo Usando a EUPS, através de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento**. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, SP, 194 p.
- FRANGOMENI, L.P. (2002). **Análise da Variabilidade Espacial e Dinâmica de Atributos dos Latossolos: Uma Aplicação de Geoprocessamento ao Planejamento Ambiental**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Porto Alegre, RS, 98 p.
- FRANZONI, A.M.B. (2000). **Avaliação do Meio Físico para Fins de Planejamento Geoambiental no Traçado e Manutenção de Rede Viária: Ilha de Santa Catarina - SC**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, SP, 145 p.
- GALVÃO, C.O. (1990). **Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão do Solo em Microbacias**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 184 p.
- GAMEIRO, M.G. (1997). **Avaliação de Métodos para Obtenção dos Fatores “L” e “S” da EUPS numa Microbacia, via Geoprocessamento e Banco de Dados**. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, SP, 124 p.
- HARMON, R.S. & DOE, W.N. (2001). **Landscape Erosion and Evolution Modelling**. New York, USA, 223 p.
- HOLANDA, F.T.P. (1996). **Padrões de Fotointerpretação do Uso do Solo no Município de Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 74 p.

- HUIJBREGTS, C. J. (1975). **Regionalized Variables and Quantitative Analysis of Spatial Data**. Display and Analysis of Spatial Data. DAVIS, J.C.; MC CULLAGH, M.J. John Wiley, New York, USA, pp.38-53.
- INFANTI JR., N. & FORNASARI FILHO, N. (1998). **Processos de Dinâmica Superficial**. Geologia de Engenharia, Oliveira, A.M.S.; Brito, S.N.A. (eds), FAPESP, São Paulo, SP, pp. 131-152.
- ITO, H. K. (1998). **Previsão de Erosão e Demarcação de Talhões para Plantação de Eucaliptos na Microbacia Hidrográfica do Rio Itupeva (São Paulo), com Base num Sistema de Informações Georeferenciada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 80 p.
- IWASA, O.Y. (1998). **Controle da Erosão Urbana**. Geologia de Engenharia, Oliveira, A.M.S. & Brito, S.N.A. (eds), FAPESP, São Paulo, SP, pp. 271-281.
- JAKOB, A.A.E. (2002). **A Krigagem como Método de Análise de Dados Demográficos**. Associação Brasileira de estudos Populacionais, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 21p.
- JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, J. C. H. (1978). **Mining Geostatistics**. Academic Press, London, United Kingdom, 600 p.
- KITANIDIS, P.K. e VOMVORIS, E.G. (1983). **A geostatistical approach to the inverse problem in groundwater modeling (steady state) and one dimensional simulations**. Water Resources Research, 19(3):677-690.
- KRIGE, D.G. (1951) **A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand**. Journal Chemistry Mining, South Africa, 52:119-139.
- LAJAUNIE, C.A. (1984). **A geostatistical approach to air pollution modelling. Geostatistics for Natural Resources Characterization**, A.G. Journel & A. Marechal (ed), London, United Kingdom, pp.877-891.
- LAL, R. (1999). **Soil Quality and Soil Erosion**. Amazon, Flórida, USA, 138 p.
- LAMPARELLI, R.A.C. ; ROCHA, J.V. ; BORGHI, E. (2001). **Geoprocessamento e Agricultura de Precisão**. Agropecuária, Guaíba, RS, 118 p.
- LIMA, M.C. (2003). **Degradação Físico-Química e Mineralógica de Maciços Junto à Voçorocas (Distrito Federal)**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 336 p.
- LIMA, P.M.P. (1999). **Erodibilidade de Entresulcos em Solos com B Textural e B Latossolico no Município de Lavras (MG)**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 100 p.
- MACHADO, R.P.P. (2001). **Um Modelo Geoespacial de Uso do Solo e Demografia. O caso do Município de São Paulo**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 241 p.

- MARASCHIN, L. (2003). **Aplicações da Geoestatística em Atributos do Solo e da Planta em um Talhão Comercial para Produção de Soja em Sorriso, Mato Grosso.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 93 p.
- MARINO, M.T.R.D. (2004). **Diagnóstico Geoambiental do Município de Aquiraz – Região Metropolitana de Fortaleza.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 120 p.
- MARTINS FILHO, M.V. (1999). **Modelagem do Processo de Erosão Entressulcos em Latossolos de Jaboticabal-SP.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 140 p.
- MATHERON, G. (1962). **Traité de Géostatistique Appliquée.** Memóires du Bureau de Recherches Géologiques et. Minières, Paris, France, Tome I, 333p, Tome II, 172 p.
- MATHERON, G. (1963). **Principles of geostatistics.** Econ. Geology, 58: 1246-1266.
- MATHERON, G. (1971) **The theory of regionalized variables and its application.** Les Cahiers du centre de Morphologie Mathématique, Fas. 5, C. G. Fontainebleau, France.
- MEIRELES, J.F.M. (1967). **Erosão de Taludes de Estradas.** Segunda Jornada Luso-Brasileira de Engenharia Civil, Rio de Janeiro e São Paulo, pp. 87-95.
- MITCHELL, J.K. & BUBENZER, G.D. (1989). **Soils Loss Estimation. Soil Erosion.** KIRKBY, M.J. & MORGAN, R.P.C. (eds). John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 17-61.
- NALON, M.A. (2000). **Mapeamento de Risco de Escorregamento na Região de Cubatão - SP.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 147 p.
- NASCIMENTO, P.S.R. (1997). **Avaliação de Técnicas de Segmentação e Classificação por Regiões em Imagens LANDSAT-TM Visando o Mapeamento de Unidades de Paisagem na Amazônia.** Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo, SP, 123 p.
- NASCIMENTO, U. & CASTRO, E. (1974). **Preventive Measures against Slope Erosion. Criteria for Soil Selection.** Second International Congress of the International Association of Engineering Geology. São Paulo, SP, pp. V.15.1 – v. 15.11.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1979). **Soil Characterization of Mapping Units for Highway Purposes in a Tropical Area.** Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 19: 196-199.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1981). **Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias.** Anais do Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, COPPE/UFRJ, CNPQ, Rio de Janeiro, RJ, pp. 118-123.
- OLEA, R.A. (1977) **Measuring spatial dependence with semivariograms.** Kansas Geol. Survey, University of Kansas, Lawrence, USA. (Series on Spatial Analysis nº 2).

- OLEA, R.A. (1975) **Optimum mapping techniques using regionalized variable theory.** Kansas Geol. Survey, University of Kansas, Lawrence, USA, 137p, (Series on Spatial Analysis nº 2)
- OLIVEIRA, M.G.B. (1996). **Estudo dos Processos Erosivos e Avaliação da Produção de Sedimentos na Bacia Hidrográfica da Pampulha.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 209 p.
- ORSI, A.G. (2004). **Mapeamento dos Parâmetros Pedológicos e Ambientais da Bacia do Ribeirão Lavapés, em Botucatu – SP, Utilizando Técnicas de Geoprocessamento.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 112 p.
- PEJON, O.J. (1992). **Mapeamento Geotécnico da Folha Piracicaba-SP (Escala 1:100.000): Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação dos Atributos.** Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 224 p.
- PEJON, O.J. (1987). **Estudos Geológico-Geotécnicos da Região Urbana de Araraquara-SP.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 117 p.
- PEJON, O.J. & ZUQUETTE, L.V. (1993). **Carta do Potencial de Escoamento Superficial da Folha de Piracicaba-SP.** Geociências, São Paulo, SP, 12(2): 515-529.
- PEREIRA, J.A. (1997). **Modelagem do Escoamento Superficial e Erosão em Microbacias da Bacia Experimental de Sume-PB.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 120 p.
- PHILIPPONAT, G. (1973). **Etude Experimentale de L'erosion des Sol et du Drainage Superficiel a Madagascar.** Ver. Ge, Routes. 489, Paris, France, pp. 59-64.
- PINTO, F.R.L. (1999). **Equações de Intensidade-Duração-Frequência da Precipitação para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo: Estimativa e Espacialização.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 70 p.
- QUADROS R.M.B. (1999). **Representação Matemática e Simulação Numérica da Evolução do Processo Erosivo em Sulcos.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Londrina, PR, 149 p.
- QUAINI, P.H. (2001). **Avaliação de Esquemas de Amostragens de Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico Sob Plantio Direto em Região de Cerrado.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 80 p.
- RAMALHO, M.F.J.L. (1999). **Evolução dos Processos Erosivos em Solos Arenosos entre os Municípios de Natal e Parnamirim.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 347 p.
- RANIERI, S.B.L. (1996). **Avaliação de Métodos e Escalas de trabalho para Determinação de Risco de Erosão em Bacia Hidrográfica Utilizando Sistema de Informações**

- Geográficas (SIG).** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Carlos, São Carlos, SP, 129 p.
- RESENDE, K.D. (1997). **Estimativa de Perda de Solo por Erosão Superficial em Bacia Hidrográfica utilizando Sistema de Informação Geográfica - SIG.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 130 p.
- RIBEIRO, F.L. (2002). **Mapa de Vulnerabilidade à Erosão da Região do Alto Rio Pardo – Pardinho (SP).** Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 108 p.
- RIBEIRO, S.C. (2004). **Susceptibilidade aos Processos Erosivos Superficiais com Base na Dinâmica Geomorfológica na Microbacia do Rio Granjeiro, Crato – CE.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 136 p.
- RUHOFF, A.L., PEREIRA, R.S., SOUZA, B.S.P., GIOTTO, E. (2002). **Avaliação do Processo Erosivo pela Equação Universal de Perda de Solos com Algoritmos do SPRING.** Fundo Setorial de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 19 p.
- SAITO, S.M. (2004). **Estudo Analítico da Susceptibilidade a Escorregamentos e Quedas de Blocos no Maciço Central de Florianópolis – SC.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 132 p.
- SALOMÃO, F.X.T. & IWASA, O.Y. (1995). **Erosão e a Ocupação Rural e Urbana.** Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente, ABGE, São Paulo, SP, Cap. 3, pp. 31-57.
- SANTOS, H.M.C. (1999). **Diagnóstico Geoambiental e Caracterização dos Principais Impactos do Uso / Ocupação dos Solos na Região Administrativa de Guaratiba – Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 127 p.
- SANTOS, L.F. (2000). **Cartografia Geotécnica Regional do Município de Palmas / TO: Área Oeste do Meridiano 48° W.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150 p.
- SANTOS, M.P.P. & CASTRO, E. (1966). **Soil Erosion in Roads.** Memória 282, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 81 p.
- SANTOS, M.P.P. & CASTRO, E. (1967). **Estudos sobre Erosão em Taludes.** Segunda Jornada Luso-Brasileira de Engenharia Civil, Rio de Janeiro e São Paulo, pp. 127-138.
- SANTOS, I. & KOBIYAMA, M. (2002). **Modelagem e Delimitação de Processos Erosivos em Vertentes.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 8 p.
- SILVA, M.L.N. (1997). **Erosividade da Chuva e Proposição de modelos para Estimar a Erodibilidade de Latossolos Brasileiros.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 154 p.

- SILVA, P.C.M. (2001). **Avaliação e Variabilidade Espacial de Propriedades Químicas do Solo da “Extensão Maria Teresa” – Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 104 p.
- SILVA, T.M. (1991). **Evolução Geomorfológica e Sedimentação de Canais Erosivos Holocenos no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 166 p.
- SIMOES, G.F. (1994). **Modelagem Numérica do Fenômeno de Erosão de Maciços Rochosos Fraturados a Jusante de Estruturas de Vertedouros.** Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 116 p.
- SOARES, A.M.L. (1998). **Zoneamento Geoambiental do Município de Beberibe - CE.** Dissertação de Mestrado, Fundação Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE, 92 p.
- STURARO, J.R. (1993). **Mapeamento Geoestatístico de Propriedades Geológico-Geotécnicas Obtidas de Sondagens de Simples Reconhecimento.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 180 p.
- ROSEMBLUETH, E. (1975). **Point Estimates for Probability moments.** Proc. National Academy of Sciences. 72(10). 3812-3814.
- TRIOLA, M.F. (1999). **Introdução À Estatística.** Ed. LTC, Rio de Janeiro, RJ, 410 p.
- VALENTE, A.L.S. (1999). **Integração de Dados por Meio de Geoprocessamento, para a Elaboração de Mapas Geotécnicos, análise do Meio Físico e suas Interações com a Mancha Urbana: O caso de Porto Alegre (RS).** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 391 p.
- VALERIANO, M.M. (1999). **Estimativa de Variáveis Topográficas por Geoprocessamento para Modelagem da Perda de Solos.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro, SP, 146 p.
- VASCONCELOS, R.P.R. (2001). **Mapas de Suscetibilidade de Solos Colapsíveis e Expansivos no Estado de Pernambuco.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 132 p.
- VETTORATO, J.A. (2003). **Mapeamento da Fertilidade do Solo Utilizando Sistema de Informação Geográfica.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 87 p.
- VIEIRA, A.F.G. (1998). **Erosão por Voçorocas em Áreas Urbanas: O Caso de Manaus (AM).** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 225 p.
- VILLIBOR, D.F. & NOGAMI, J.S. (1982). **Comparações de Solos: Nova Classificação.** Revista do Departamento de Rodagem dos Estado de São Paulo, 172: 42-48.

- VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S.; FABBRI, G.T.P. (1986). **Proteção à Erosão em Pavimentos de Baixo Custo**. 21 Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, BA, pp. 154 - 161.
- WEBSTER, R. (1973) **Automatic soil boundary location for transect data**. *Mathematical Geology*, 5(1): 27-37.
- WEBSTER, R. & BURGESS, T.M. (1980). **Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties**. III. Changing drift and universal kriging. *The Journal of Soil Science*, 31: 505-524.
- WEBSTER, R. & CUANALO, H.E.C. (1975) **Soil transects correlograms of north Oxfordshire and their interpretation**. *The Journal of Soil Science*, 26(2): 176-194.
- WEILL, M.A.M. (1999). **Estimativa da Erosão do Solo e Avaliação do seu Impacto na Microbacia do Ceveiro (Piracicaba-SP), através do Índice do Tempo de Vida**. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 100 p.