

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALEXEI NOWATZKI

MAPEAMENTO PEDOLÓGICO PREDITIVO POR DIFERENTES MÉTODOS DE  
INTEGRAÇÕES DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS: APLICAÇÕES NO BAIXO CURSO  
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVAÍ - NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ

CURITIBA

2019

ALEXEI NOWATZKI

MAPEAMENTO PEDOLÓGICO PREDITIVO POR DIFERENTES MÉTODOS DE  
INTEGRAÇÕES DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS: APLICAÇÕES NO BAIXO CURSO  
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVAÍ - NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro Santos

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

N946m

Nowatzki, Alexei

Mapeamento pedológico preditivo por diferentes métodos de integrações de atributos topográficos: aplicações no baixo curso da bacia hidrográfica do Rio Ivaí - noroeste do estado do Paraná [recurso eletrônico] / Alexei Nowatzki. – Curitiba, 2019.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2019.

Orientador: Leonardo José Cordeiro Santos .

1. Mapeamento do Solo – Paraná. 2. Mapeamento digital. 3. Topografia. 4. Ivaí, Rio, Bacia (PR). I. Universidade Federal do Paraná. II. Santos, Leonardo José Cordeiro. III. Título.


CDD: 526.9808162

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

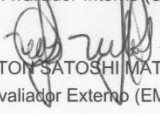
### TERMO DE APROVAÇÃO


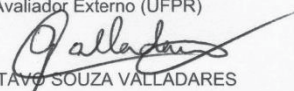
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **ALEXEI NOWATZKI**, intitulada: **MAPEAMENTO PEDOLÓGICO PREDITIVO POR DIFERENTES MÉTODOS DE INTEGRAÇÕES DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS: APLICAÇÕES NO BAIXO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVAÍ - NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ**., após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de Doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 11 de Março de 2019.

  
LEONARDO JOSÉ CORDEIRO SANTOS  
Presidente da Banca Examinadora

  
CLAUDINE TABORDA DA SILVEIRA  
Avaliador Interno (UFPR)

  
MILTON SATOSHI MATSUSHITA  
Avaliador Externo (EMATER)

  
JAIRO CALDERARI DE OLIVEIRA JUNIOR  
Avaliador Externo (UFPR)  
  
GUSTAVO SOUZA VALLADARES  
Avaliador Externo (UFPI)

## AGRADECIMENTOS

Assim como fiz na minha monografia de bacharelado e dissertação de mestrado, agradeço primeiramente a sociedade brasileira por financiar, através do pagamento de impostos, os meus estudos de Doutorado e pela bolsa CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

À Universidade Federal do Paraná, ao Setor de Ciências da Terra, ao Departamento de Geografia e em especial ao programa de Pós-Graduação em Geografia (Luiz Carlos Zem, Alexandra Aparecida Gama e Adriana Cristina Oliveira).

À União da Geomorfologia Brasileira (UGB) e ao professor orientador e, também amigo, Leonardo José Cordeiro Santos, que ao longo de todos os anos de convívio, seja em sala de aula, laboratório, trabalhos de campo ou mesmo em momentos de lazer, proporcionou meu crescimento intelectual enquanto geógrafo. Também por ter me dado a oportunidade de fazer parte da sua equipe e orientado este trabalho.

À equipe do Laboratório de Biogeografia e Solos (LABS) e especialmente a José Guilherme Oliveira, Caroline Manguera, Luciano Mattana Carollo da Luz, Maíra Oneda Dal Pai, Raquel Rodrigues, Adriano Goulart, Lucas Pontes, Amanda Machado de Almeida e Luciane Marcolin.

À equipe do Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias (LAGEO) da UFPR e especialmente à Gisele Neuman, Willian Bortolini e ao professor Claudinei Taborda da Silveira, que sempre foram solícitos tanto em ajudar ou compartilhar informações. Agradeço ainda especificamente à Ricardo Michael Pinheiro Silveira por toda sua ajuda com a análise digital do relevo (não tão complicado demais, mas nem tão simples assim) que foi fundamental para o desenvolvimento desta tese.

Aos amigos que a Geografia me proporcionou: Orestes Jarentchuk Jr., Diego Frantz, Gustavo Felipe Olesko, Márcio Aluizio Fonsaca Grochocki, Letícia Lesinhovski e Julio Manoel França da Silva.

À equipe do Laboratório de Geoprocessamento e Estudos Ambientais (LAGEAMB), especialmente ao professor Eduardo Vedor de Paula, à Renata Cunha e à Carlos Wroblewski.

À equipe do Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG) da UFPR especialmente à Gilson Bauer Schultz e à Marcelo Ng Wei Ban Hung e também à equipe do Laboratório de Climatologia (LABOCLIMA) especialmente à Gabriela Goudard.

À Milton Satoshi Matsushita por disponibilizar o material sobre o curso de mapeamento digital de solos com uso do QGIS e ao Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural (Instituto EMATER).

Ao professor e pesquisador da área de Pedometria Alessandro Samuel-Rosa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Santa Helena (UTFPR-SH) pelos esclarecimentos acerca do método das regressões logísticas aplicadas aos mapeamentos digitais de solos.

Ao professor, pesquisador e amigo Edivando Vitor do Couto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão (UTFPR-CM) que me incentivou a prestar a prova do doutorado em 2014 e me ajudou a elaborar um projeto de pesquisa (requisito parcial para prestar a prova).

À Juliana Corrales Tauil pela sua companhia, conselhos, compreensão, carinho e também ajuda na revisão dos textos.

Aos amigos de longa data: Luiz Alberto Veiga Vieira Junior, Daiymon Erik Calegari, Pericles Marcondes, João Paulo da Costa Rosa, Julio César Penha, Julio Cezar Peripolli, Jonathan Henning, Renato Hermes, Cleber Dias de Araújo, Anderson Silva Correa, Aquiles Priester (posso provar), Michael Stephen Portnoy, Francine Carvalho, Marcos Adão, Douglas Messias e também a Fabio Jacques pela ajuda nas análises estatísticas.

Por fim, agradeço aos meus familiares todo o apoio e amor incondicional. Agradeço ao meu avô Harry Nowatzki, meus tios Ronald e Dorly, minhas primas Jenifer, Nádia, Agnes e Livia e em especial a minha mãe Elli Nowatzki.

*“Não se refuta estudo com opinião”*

(Autor desconhecido)

*“O primeiro pecado da humanidade foi  
a fé; a primeira virtude foi a dúvida”*

(Carl Sagan)

## RESUMO

A região noroeste do estado do Paraná é composta por rochas areníticas do grupo Caiuá, relevo plano a suavemente ondulado, clima tropical e com ocorrência de sequências laterais de Latossolos-Argissolos. Os Latossolos se encontram frequentemente associados a relevos planos e em regiões de menor densidade de drenagem, enquanto os Argissolos estão associados a relevos mais ondulados, com maiores declives e maior densidade de drenagem. A área de estudo compreende a área de drenagem do baixo curso da bacia hidrográfica do rio Ivaí, e para esta área, há disponibilidade apenas de mapas pedológicos em escalas regionais, sendo os de maior detalhe disponibilizados unicamente para alguns municípios da região. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento metodológico de técnicas de mapeamentos que possam contribuir na espacialização dos solos da região. Baseada na relação solo-relevo, foram realizados mapeamentos digitais de solos a partir da integração de atributos topográficos efetuados pelos métodos de tabulação cruzada e regressões logísticas. Os atributos selecionados para geração dos modelos preditivos foram clinografia, índice de posição topográfica, índice de rugosidade do terreno, índice topográfico de umidade (modificado) e plano de curvatura. Os mesmos foram gerados por meio de um modelo digital do terreno com resolução espacial de 20 metros e de dois modelos de elevação: SRTM de 30 e 90 metros. Por apresentar uma extensa planície fluvial com ocorrência de Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Organossolos optou-se por primeiramente delimitar este compartimento, separando a área de estudo em setores norte e sul. Para a geração dos três modelos preditivos a partir da tabulação cruzada, foram discretizadas para cada atributo topográfico duas classes de unidades de mapeamento: UM-01 representando os Latossolos e UM-02 os Argissolos. Para os três modelos de regressões logísticas foram inseridos 1.200 pontos de controle ao longo de dezesseis áreas de referência (oito para cada setor). Os resultados das seis previsões apresentaram de um modo geral uma maior distribuição da UM-01 no setor norte enquanto que a UM-02 foi mais expressiva no setor sul. A comparação das áreas das UM feita entre os três modelos preditos (20, 30 e 90 metros) que apresentou menores índices de variação (como desvio padrão), foi a realizada pelo método das regressões logísticas, em detrimento dos três modelos preditos por tabulação cruzada. A variação também foi menor na análise entre os dois modelos preditos a partir da base do modelo digital do terreno de 20 metros. Para a verificação de qualidade, tendo por base o mapeamento preexistente mais detalhado, os modelos que apresentaram melhores índices Kappa foi o gerado por tabulação cruzada de 20 metros e por regressões logísticas de 20 metros, tendo a pior classificação o modelo predito por tabulação cruzada de 90 metros. Os dois modelos de elevação SRTM apenas apresentaram melhores índices de qualidade, em relação ao modelo digital do terreno, quando foram comparados com o mapeamento preexistente de menor escala de detalhamento, sendo justificada pela maior resolução espacial. O índice de posição topográfica foi o atributo que apresentou os melhores índices de qualidade individual em relação ao mapeamento preexistente mais detalhado.

**Palavras-chave:** Mapeamento Digital de Solos. Atributos Topográficos. Tabulação Cruzada. Regressões Logísticas. Índice de Posição Topográfica. Noroeste do Estado do Paraná.

## ABSTRACT

The northwestern region of the state of Paraná is composed of sandstone rocks of the Caiuá group, flat to gently undulating relief, tropical climate and the occurrence of lateral sequences of Oxisols-Ultisols. Oxisols (Ferralsols) are often associated with flat reliefs and regions with lower drainage density, while Ultisols (Acrisols) are associated with more undulating reliefs, with higher slopes and higher drainage density. The study area is the drainage area of the lower course of the Ivaí river basin, and for this area, there are only available pedological maps at regional scales, and the more detailed ones are available only for some municipalities in the region. Therefore, it is necessary the methodological development of mapping techniques that can contribute to the spatialization of the soils of the region. Based on the soil-relief relationship, digital soil mapping was accomplished from the integration of topographic attributes performed by cross tabulation and logistic regressions methods. The attributes selected to generate the predictive models were clinography, topographic position index, terrain roughness index, wetness index (modified) and plan curvature. They were generated by a digital terrain model with spatial resolution of 20 meters and two elevation models: 30 and 90 meters SRTM. For presenting an extensive fluvial plain with occurrence of Fluvents (Fluvisols), Aquents (Gleysols), and Histosols it was decided to first delimit this compartment, separating the study area into northern and southern sectors. For the generation of the three predictive models from cross tabulation, two classes of mapping units were discretized for each topographic attribute: UM-01 representing the Oxisols and UM-02 representing the Ultisols. For the three logistic regressions models were inserted 1.200 control points along sixteen reference areas (eight for each sector). The results of the six predictions presented in a general way a higher distribution of the UM-01 in the northern sector while the UM-02 was more expressive in the southern sector. The comparison of the UM areas made between the three predicted models (20, 30 and 90 meters) that presented lower rates of variation (as standard deviation), was performed by the logistic regression method, in detriment of the three models predicted by cross tabulation. The variation was also smaller in the analysis between the two models predicted from the base of the 20-meter digital terrain model. For quality verification, based on the most detailed pre-existing mapping, the models that presented the best Kappa indexes were those generated by 20 meters cross tabulation and 20 meters logistic regressions, with the worst classification being the model predicted by 90-meter cross tabulation. The two SRTM elevation models only presented better quality indexes, in relation to the digital terrain model, when they were compared with the smaller scale of detail pre-existing mapping, being justified by the higher spatial resolution. The topographic position index was the attribute that presented the best individual quality indexes in relation to the most detailed pre-existing mapping.

**Key-words:** Digital Soil Mapping. Topographic Attributes. Cross Tabulation. Logistic Regressions. Topographic Position Index. Northwest of the State of Paraná.

## LISTA DE FIGURAS, GRÁFICOS E FOTOGRAFIAS

FIGURA 1 – PASSAGEM LATERAL DE LATOSSOLOS PARA ARGISSOLOS CARACTERÍSTICA NO NOROESTE DO PARANÁ.....	24
FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DO BAIXO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVAÍ.....	26
FIGURA 3 – ASPECTOS DO MEIO FÍSICO.....	27
FIGURA 4 – CLASSES DE SOLOS (1º NÍVEL CATEGÓRICO).....	31
FIGURA 5 – DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS PEDOLÓGICOS DA REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ.....	34
FIGURA 6 – REGISTROS DE EROSÕES NA DÉCADA DE 60 DO SÉC. XX NO NOROESTE DO PARANÁ (MUNICÍPIOS DE COLORADO, NOVA LONDRINA E UMUARAMA).....	35
FIGURA 7 – TOPOSSEQUÊNCIA COM PASSAGEM LATERAL LATOSSOLO- ARGISSOLO EM CIDADE GAÚCHA – PR.....	47
FIGURA 8 – TOPOSSEQUÊNCIA DO PLATÔ DE TAMBOARA.....	48
FIGURA 9 – TOPOSSEQUÊNCIA REPRESENTATIVA DOS SISTEMAS PEDOLÓGICOS DESENVOLVIDAS À MARGEM DIREITA (SETOR NORTE) DO RIO IVAÍ.....	49
FIGURA 10 – TOPOSSEQUÊNCIA REPRESENTATIVA DOS SISTEMAS MORFOPEDOLÓGICOS DESENVOLVIDAS À MARGEM ESQUERDA (SETOR SUL) DO RIO IVAÍ.....	50
FIGURA 11 – DENSIDADE DOS CANAIS DE DRENAGEM DE 1ª ORDEM.....	51
FIGURA 12 – OS QUATRO FATORES DE INTEGRAÇÃO EM UM MAPA.....	52
FIGURA 13 – PEDOMETRIA COMO UMA CIÊNCIA INTERDISCIPLINAR ONDE CIÊNCIA DO SOLO, ESTATÍSTICA APLICADA E GEOINFORMAÇÃO SE INTERCEPTAM.....	54
FIGURA 14 – POSSIBILIDADES DE INTERFACE ENTRE O MAPEAMENTO CONVENCIONAL E O DIGITAL – MODELO SCORPAN.....	55
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DE UM MAPEAMENTO DIGITAL DO SOLO.....	57
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PROVENIENTES DE UM MDT.....	59
FIGURA 17 – FLUXOGRAMA METODOLÓGICO SIMPLIFICADO.....	65
FIGURA 18 – MÉTODO DA JANELA DE NOVE NODOS.....	69

FIGURA 19 – JANELA DE VIZINHANÇA 3X3 .....	70
FIGURA 20 – MÉTODO D-INFINITO PARA CÁLCULO DA DIREÇÃO DE FLUXO .....	71
FIGURA 21 – O ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA (IPT).....	73
FIGURA 22 – RELAÇÃO ENTRE O VALOR DO IPT COM O TAMANHO DO RAIO ADOTADO .....	74
FIGURA 23 – DIFERENÇAS ENTRE O TAMANHO DO RAIO DE ANÁLISE DE VIZINHANÇA DO IPT.....	75
FIGURA 24 – COMPARAÇÃO ENTRE O ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE E O ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE MODIFICADO .....	78
FIGURA 25 – TABULAÇÃO CRUZADA COM DUAS CÉLULAS MATRICIAIS .....	83
FIGURA 26 – GENERALIZAÇÃO DE IMAGEM E REMOÇÃO DE RUÍDOS .....	91
FIGURA 27 – MÉTODO DE IMPLANTAÇÃO DE SONDAGENS EM TOPOSSEQUÊNCIA .....	93
FIGURA 28 – DISTRIBUIÇÃO DE PSEUDOAMOSTRAS EM TOPOSSEQUÊNCIA SIMULADA .....	96
FIGURA 29 – ESTABELECIMENTO DE PSEUDOAMOSTRAS - CURVAS DE NÍVEL E CLINOGRAFIA .....	97
FIGURA 30 – ESTABELECIMENTO DE PSEUDOAMOSTRAS POR COR E FEIÇÕES EROSIVAS .....	98
FIGURA 31 – DADOS PEDOLÓGICOS (UNIDADES DE MAPEAMENTO E PONTOS DE CONTROLE).....	107
FIGURA 32 – ÁREAS DE REFERÊNCIA .....	111
FIGURA 33 – ÁREAS DE REFERÊNCIA DO SETOR NORTE (MAPEAMENTO DE FASOLO).....	112
FIGURA 34 – ÁREAS DE REFERÊNCIA DO SETOR SUL (MAPEAMENTO DE FASOLO).....	112
FIGURA 35 – PERFIS DE ANÁLISE HIPSOMÉTRICA .....	115
FIGURA 36 – PERFIS DE ANÁLISE CLINOGRÁFICA .....	116
FIGURA 37 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS USADOS NA COMPARTIMENTAÇÃO DOS SOLOS DE PLANÍCIE FLUVIAL .....	117
FIGURA 38 – SETORIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	117
FIGURA 39 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS (MDT 20) .....	119
FIGURA 40 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS (MDE 30) .....	120
FIGURA 41 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS (MDE 90) .....	121

FIGURA 42 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR TC – MDT 20..	124
FIGURA 43 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR TC – MDE 30..	125
FIGURA 44 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR TC – MDE 90..	127
FIGURA 45 – PREDIÇÃO DAS UM POR TC – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DIGITAIS (AR_N01) .....	129
FIGURA 46 – PREDIÇÃO DAS UM POR TC – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DIGITAIS (AR_S06).....	130
FIGURA 47 – DIFERENÇAS ENTRE OS MODELOS (GENERALIZAÇÃO DOS MDE) .....	131
FIGURA 48 – IMAGEM DE SATÉLITE E RUÍDOS VISÍVEIS PELA CLINOGRAFIA - MDE 30 METROS .....	132
FIGURA 49 – INFLUÊNCIA DOS RUÍDOS NO M30 DOS MAPEAMENTOS PREDITIVOS POR TC .....	133
FIGURA 50 – COMPARAÇÃO ENTRE OS LIMITES DAS UM – TC (M20, M30 E M90) .....	134
FIGURA 51 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR RL – MDT 20..	135
FIGURA 52 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR RL – MDE 30..	136
FIGURA 53 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR RL – MDE 90..	137
FIGURA 54 – PREDIÇÃO DAS UM POR RL – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DIGITAIS (AR_N01) .....	140
FIGURA 55 – PREDIÇÃO DAS UM POR RL – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DIGITAIS (AR_S06).....	141
FIGURA 56 – COMPARAÇÃO ENTRE OS LIMITES DAS UM – RL (M20, M30 E M90) .....	142
FIGURA 57 – INCERTEZAS GERADAS PARA O MDT DE 20M.....	150
FIGURA 58 – INCERTEZAS GERADAS PARA O MDE DE 30M.....	151
FIGURA 59 – INCERTEZAS GERADAS PARA O MDE DE 90M.....	152
FIGURA 60 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO E MAP. DE FASOLO (M20).....	173
FIGURA 61 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO E MAP. DE FASOLO (M30).....	174
FIGURA 62 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO E MAP. DE FASOLO (M90).....	176
FIGURA 63 – ACERTOS E ERROS RL (M20) – AR NORTE.....	177

FIGURA 64 – ACERTOS E ERROS RL (M20) – AR SUL .....	177
FIGURA 65 – ACERTOS E ERROS RL (M20) – AR.....	179
FIGURA 66 – ACERTOS E ERROS RL (M30) – AR.....	180
FIGURA 67 – ACERTOS E ERROS RL (M90) – AR.....	181
GRÁFICO 1 – PROPORÇÃO DE ÁREA - MAPEAMENTOS DE FASOLO.....	110
GRÁFICO 2 – PROPORÇÃO DE ÁREA - MAPEAMENTOS DA EMBRAPA.....	111
GRÁFICO 3 – PROPORÇÃO DE ÁREA (AR) - MAPEAMENTOS DE FASOLO.....	113
GRÁFICO 4 – PROPORÇÃO DE ÁREA (AR) - MAPEAMENTOS DA EMBRAPA .....	114
GRÁFICO 5 – PROPORÇÃO DAS ÁREAS – M20, M30 E M90 (TC).....	128
GRÁFICO 6 – PROPORÇÃO DAS ÁREAS – M20, M30 E M90 (RL).....	138
GRÁFICO 7 – VARIAÇÃO (BOXPLOT) - CLINOGRAFIA .....	144
GRÁFICO 8 – VARIAÇÃO (BOXPLOT) - ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA.....	145
GRÁFICO 9 – VARIAÇÃO (BOXPLOT) - ÍNDICE DE RUGOSIDADE DO TERRENO	146
GRÁFICO 10 – VARIAÇÃO (BOXPLOT) - ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE (MODIFICADO).....	147
GRÁFICO 11 – VARIAÇÃO (BOXPLOT) - PLANO DE CURVATURA.....	148
GRÁFICO 12 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO PELA INTEGRAÇÃO DOS MODELOS PREDITIVOS.....	154
GRÁFICO 13 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS PREDITIVOS PELA INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS TC E RL .....	155
GRÁFICO 15 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS AT DISCRETIZADOS (FASOLO).....	162
GRÁFICO 15 – MÉDIA ARITMÉTICA E DESVIO PADRÃO – ÍNDICE KAPPA ENTRE OS MODELOS DE PREDIÇÃO (M20-M30, M20-M90 E M30-M90).....	165
GRÁFICO 16 – VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE POR SETORES E TOTAL - PONTOS DE CONTROLE.....	170
GRÁFICO 17 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE ENTRE AS PREDIÇÕES .....	170
GRÁFICO 19 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS MODELOS PREDITOS (ÁREA DE ESTUDO).....	171
GRÁFICO 19 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES - FASOLO E EMBRAPA .....	182

GRÁFICO 20 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES (MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE MODELOS) - FASOLO E EMBRAPA.....	183
GRÁFICO 21 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES (MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO) - FASOLO E EMBRAPA.....	184
GRÁFICO 22 – DP E COEF. DE VARIAÇÃO DO ÍNDICE KAPPA – MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO .....	185
GRÁFICO 23 – DP E COEF. DE VARIAÇÃO DO ÍNDICE KAPPA – MAPEAMENTOS PREEXISTENTES .....	186
FOTOGRAFIA 1 – PANORÂMICA DA EROSÃO - ZONA RURAL DE PARANAÍ ...	36
FOTOGRAFIA 2 – EROSÃO NA ZONA RURAL DE LOANDA .....	37
FOTOGRAFIA 3 – VERTENTES REPRESENTATIVAS DAS MARGENS DIREITA E ESQUERDA DO RIO IVAÍ.....	50

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 1 – PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE OS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS.....	40
QUADRO 2 – CRITÉRIOS ADOTADOS NA PADRONIZAÇÃO DOS DADOS CARTOGRÁFICOS.....	66
QUADRO 3 – DISCRETIZAÇÃO DOS VALORES CONTÍNUOS DO IPT.....	75
QUADRO 4 – UNIDADES DE MAPEAMENTO.....	81
QUADRO 5 – TABULAÇÃO CRUZADA ENTRE AT X E AT Y.....	83
QUADRO 6 – PARTE DA MATRIZ DE PONTOS AMOSTRADOS E TABULADOS - ANÁLISE DAS RL.....	86
QUADRO 7 – INCERTEZAS: PUREZA TEÓRICA, ENTROPIA DE SHANNON E ÍNDICE DE CONFUSÃO.....	87
QUADRO 8 – TC (ITM E ITU) –COMPARTIMENTO DE SOLOS DE PLANÍCIE FLUVIAL.....	89
QUADRO 9 – VALORES DAS ÁREAS MÍNIMAS MAPEÁVEIS PARA OS MODELOS	90
QUADRO 10 – EXEMPLO DE UMA ESTRUTURA DE MATRIZ DE ERROS.....	102
QUADRO 11 – MATRIZ DE ERROS HIPOTÉTICA.....	104
QUADRO 12 – QUALIDADE DE CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O ÍNDICE KAPPA ...	105
QUADRO 13 – DESCRIÇÕES ORIGINAIS, CONVERSÃO PARA O SIBICS E UNIDADE DE MAPEAMENTO.....	107
QUADRO 14 – MAPEAMENTO EMBRAPA CLASSES NO 3ºNÍVEL E UNIDADE DE MAPEAMENTO.....	109
QUADRO 15 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDT 20 (TC) COM MAPA DE FASOLO.....	157
QUADRO 16 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 30 (TC) COM MAPA DE FASOLO.....	158
QUADRO 17 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 90 (TC) COM MAPA DE FASOLO.....	158
QUADRO 18 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDT 20 (TC) COM MAPA DA EMBRAPA.....	159
QUADRO 19 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 30 (TC) COM MAPA DA EMBRAPA.....	159

QUADRO 20 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 90 (TC) COM MAPA DA EMBRAPA.....	160
QUADRO 21 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS AT DISCRETIZADOS (M20) .	161
QUADRO 22 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS AT DISCRETIZADOS (M30) .	161
QUADRO 23 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS AT DISCRETIZADOS (M90) .	161
QUADRO 24 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDT 20 (RL) COM MAPA DE FASOLO.....	166
QUADRO 25 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 30 (RL) COM MAPA DE FASOLO.....	166
QUADRO 26 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 90 (RL) COM MAPA DE FASOLO.....	166
QUADRO 27 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDT 20 (RL) COM MAPA DA EMBRAPA.....	167
QUADRO 28 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 30 (RL) COM MAPA DA EMBRAPA.....	167
QUADRO 29 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 90 (RL) COM MAPA DA EMBRAPA.....	168
TABELA 1 – CÁLCULO DE ÁREA DO MEIO FÍSICO.....	28
TABELA 2 – CÁLCULO DE ÁREA – SOLOS.....	31
TABELA 3 – DISCRETIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS.....	84
TABELA 4 – DISCRETIZAÇÃO DAS CLASSES DOS SOLOS (PLANÍCIE FLUVIAL) ..	89
TABELA 5 – VALOR DE ÁREA (AR) .....	92
TABELA 6 – VALORES DE ÁREA DAS UM EM RELAÇÃO AOS DOIS SETORES PARA OS MAPEAMENTOS PREEXISTENTES .....	109
TABELA 7 – VALORES TOTAIS DAS UM - MAPEAMENTOS PREEXISTENTES .....	110
TABELA 8 – VALOR DE ÁREA (AR) - MAPEAMENTOS DE FASOLO.....	113
TABELA 9 – VALOR DE ÁREA (AR) - MAPEAMENTOS DE EMBRAPA.....	114
TABELA 10 – VALORES DE ÁREAS – SOLOS DE PLANALTO E PLANÍCIE FLUVIAL .....	116
TABELA 11 – SETORES DA AE (VALORES DAS ÁREAS E QUANTIDADE DE PIXELS POR MODELO).....	118

TABELA 12 – VALORES CONTÍNUOS DOS AT PARA OS TRÊS MODELOS DIGITAIS .....	122
TABELA 13 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M20 (TC) .....	124
TABELA 14 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M30 (TC) .....	126
TABELA 15 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M90 (TC) .....	127
TABELA 16 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M20 (RL) .....	136
TABELA 17 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M30 (RL) .....	137
TABELA 18 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M90 (RL) .....	138
TABELA 19 – PONTOS DE CONTROLE (CLINOGRAFIA) .....	143
TABELA 20 – PONTOS DE CONTROLE (ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA).....	145
TABELA 21 – PONTOS DE CONTROLE (ÍNDICE DE RUGOSIDADE DO TERRENO) .....	146
TABELA 22 – PONTOS DE CONTROLE (ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE MODIFICADO) .....	147
TABELA 23 – PONTOS DE CONTROLE (PLANO DE CURVATURA).....	148
TABELA 24 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO PELA INTEGRAÇÃO DOS MODELOS PREDITIVOS.....	153
TABELA 25 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS PREDITIVOS PELA INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS TC E RL .....	155
TABELA 26 - CONCORDÂNCIA ENTRE TABULAÇÃO CRUZADA E REGRESSÕES LOGÍSTICAS .....	156
TABELA 27 – COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE QUALIDADE DOS MODELOS PARA OS AT.....	163
TABELA 28 – COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE QUALIDADE DOS AT PARA OS MODELOS .....	164
TABELA 29 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS AT ENTRE OS MODELOS PREDITIVOS.....	165
TABELA 30 – VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE POR VALIDAÇÃO CRUZADA E VALIDAÇÃO .....	169
TABELA 31 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS MODELOS PREDITOS (ÁREA DE ESTUDO).....	171
TABELA 32 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES.....	182
TABELA 33 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES (MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE MODELOS).....	183

TABELA 34 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES (MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO) .....	184
TABELA 35 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA – MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO.....	185
TABELA 36 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA – MODELOS PREDITIVOS.....	186

## LISTA DE SIGLAS

<b>AC</b>	- Área de contribuição
<b>ACM</b>	- Área de contribuição modificada
<b>AE</b>	- Área de estudo
<b>AG</b>	- Acurácia geral
<b>AM</b>	- Acurácia do mapeador
<b>AU</b>	- Acurácia do usuário
<b>AMM</b>	- Área mínima mapeável
<b>AR</b>	- Área de referência
<b>AT</b>	- Atributo topográfico
<b>CLN</b>	- Clinografia
<b>CV</b>	- Coeficiente de variação
<b>DP</b>	- Desvio padrão
<b>HPM</b>	- Hipsometria
<b>IPT</b>	- Índice de posição topográfica
<b>IRG</b>	- Índice de rugosidade do terreno
<b>ITU</b>	- Índice topográfico de umidade
<b>ITM</b>	- Índice topográfico de umidade modificado
<b>K</b>	- Kappa (índice)
<b>L</b>	- Latossolo
<b>LV</b>	- Latossolo Vermelho
<b>MA</b>	- Média aritmética
<b>MDE</b>	- Modelo Digital de Elevação
<b>MDS</b>	- Mapeamento Digital de Solos
<b>MDT</b>	- Modelo Digital do Terreno
<b>OC</b>	- Observações de campo
<b>P</b>	- Argissolo
<b>PC</b>	- Ponto de controle
<b>PLA</b>	- Plano de curvatura
<b>PV</b>	- Argissolo Vermelho
<b>RL</b>	- Regressão Logística
<b>SP</b>	- Sistema Pedológico
<b>TC</b>	- Tabulação cruzada
<b>TP</b>	- Trabalho preexistente
<b>UM</b>	- Unidade de mapeamento
<b>VA</b>	- Variância
<b>VQ</b>	- Verificação de qualidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>APRESENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>26</b>
2.1	CLASSES DE SOLOS E SISTEMAS PEDOLÓGICOS.....	31
2.2	PROCESSOS EROSIVOS NO NOROESTE DO PARANÁ .....	35
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>38</b>
2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS E SUAS RELAÇÕES COM O RELEVO .....	38
2.2	PASSAGEM LATERAL LATOSSOLO-ARGISSOLO.....	43
2.2.1	Os sistemas pedológicos do noroeste do Paraná .....	48
2.3	MAPEAMENTOS PEDOLÓGICOS PREDITIVOS.....	52
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>65</b>
4.1	ORGANIZAÇÃO DA BASE DE DADOS CARTOGRÁFICOS E GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO.....	66
4.1.1	Definição do tamanho do pixel.....	66
4.2	MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO.....	67
4.3	ELABORAÇÃO DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS .....	68
4.3.1	Hipsometria (HPM) .....	71
4.3.2	Clinografia (CLN) .....	72
4.3.3	Índice de posição topográfica (IPT) .....	73
4.3.4	Índice de rugosidade do terreno (IRG).....	75
4.3.5	Índice topográfico de umidade modificado (ITM).....	76
4.3.6	Plano de curvatura (PLA).....	79
4.4	PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO DE SOLOS .....	80
4.4.1	Integração dos atributos topográficos.....	80
4.4.2	Setorização da área de estudo.....	87
4.4.3	Aplicação da área mínima mapeável.....	90
4.5	SELEÇÃO DE ÁREAS DE REFERÊNCIA.....	91
4.6	MAPEAMENTOS PREEXISTENTES E PONTOS DE CONTROLE .....	92
4.6.1	Métodos de observação de campo .....	92
4.6.2	Trabalhos preexistentes .....	94
4.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA – MEDIDAS DESCRITIVAS.....	99
4.8	COMPARAÇÕES ENTRE INFORMAÇÕES ESPACIAIS (VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE).....	100

4.8.1	Matriz de erros, Acurácia geral, do mapeador e do usuário .....	101
4.8.2	Índice Kappa.....	103
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>106</b>
5.1	COMPILAÇÃO DOS DADOS PEDOLÓGICOS .....	106
5.2	SETORIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	115
5.3	CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS .....	118
5.4	PREDIÇÃO DOS SOLOS POR TABULAÇÃO CRUZADA.....	123
5.5	PREDIÇÃO DOS SOLOS POR REGRESSÕES LOGÍSTICAS .....	135
5.6	ANÁLISE DE ESTATÍSTICA DESCRITIVA: MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO E MODELOS PREDITIVOS.....	153
5.7	VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE (ACURÁCIA) DOS MAPEAMENTOS .....	156
5.7.1	Acurácia das predições por tabulação cruzada .....	157
5.7.2	Acurácia das predições por regressões logísticas .....	165
5.7.3	Análise comparativa entre os modelos gerados pelos métodos de integração e entre os mapeamentos preexistentes.....	171
5.7.4	Análise estatística descritiva do índice Kappa entre os modelos preditos e os mapeamentos preexistentes.....	184
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>188</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>191</b>
	<b>APÊNDICE A – QUADRO SÍNTESE DAS PRINCIPAIS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>205</b>
	<b>APÊNDICE B – HISTOGRAMAS DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS .....</b>	<b>207</b>
	<b>APÊNDICE C – ILUSTRAÇÕES DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS DISCRETIZADOS PARA OS MODELOS M20, M30 E M90 .....</b>	<b>212</b>
	<b>APÊNDICE D – DADOS LEVANTADOS (OBSERVAÇÕES DE CAMPO) .....</b>	<b>215</b>
	<b>ANEXO A – DESCRIÇÃO DOS ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS DOS PERFIS DE SOLOS DOS TRABALHOS PREEXISTENTES .....</b>	<b>223</b>
	<b>ANEXO B – MAPA DE SOLOS NO MUNICÍPIO DE RONDON (FASOLO) ...</b>	<b>228</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O solo enquanto componente fundamental dos ecossistemas terrestres é o principal substrato utilizado para o crescimento e disseminação das plantas. Ele exerce multiplicidade de funções ambientais tais como: regulação da distribuição, armazenamento, escoamento e infiltração da água da chuva e de irrigação; armazenamento e ciclagem de nutrientes para as plantas e outros elementos; ação filtrante e protetora da qualidade da água (LIMA *et al.*, 2007).

Por apresentarem informações sobre esse recurso natural e sua distribuição na paisagem, os mapeamentos pedológicos são fundamentais para auxiliar no manejo sustentável das terras ou até mesmo em zoneamentos urbanos. Porém, apesar da relevância e da demanda, existe grande carência de informações e de levantamentos mais detalhados sobre os solos no mundo, sobretudo no Brasil (DALMOLIN; TEN CATEN, 2015).

O objetivo dos mapeamentos de solos não é gerar somente o mapa, pois este não é um fim. Na prática, é permitir que inferências mais numerosas, úteis e acuradas para determinado propósito sejam feitas e que de outra forma não seriam possíveis. Os levantamentos de solos, bem como os produtos a serem gerados, devem levar em consideração as necessidades do usuário, pois, tão importante quanto a acurácia das propriedades do solo representadas no mapa, é o atendimento às demandas de informações, para que seu uso seja baseado em decisões acertadas quanto ao gerenciamento dos recursos naturais (TEN CATEN, 2008).

Grande parte dos mapas de solos são publicados em escalas de pouco detalhe, pois para se produzir um mapa detalhado precisa-se de bastante tempo para execução e recursos de campo (equipamentos de coleta, envio de amostras para laboratório, entre outros), o que os tornam extremamente onerosos. Deste modo, pode-se empregar a pedometria que é um método de modelagem quantitativa que permite, por meio do mapeamento digital de solos (MDS), aprimorar cartograficamente a distribuição dos solos envolvendo acurácia e incertezas nas suas predições (HARTEMINK *et al.*, 2008; TEN CATEN; QUOOS, 2009; ZINCK *et al.*, 2016).

Esses mapeamentos digitais se baseiam na integração de parâmetros geomorfométricos denominados atributos topográficos que são calculados diretamente de modelos geomorfométricos e, quando combinados, geram unidades de mapeamento (UM) dizendo deste modo a ocorrência de determinadas classes (ou atributos) de solos na paisagem (MOORE *et al.*, 1993; McBRATNEY *et al.*, 2000; McBRATNEY *et al.*, 2003; HARTEMINK *et al.*, 2008; SILVEIRA *et al.*, 2012; SILVEIRA *et al.*, 2013; NOWATZKI, 2013; NOWATZKI *et al.*, 2014).

O mapeamento digital de solos também auxilia na definição de unidades pedológicas homogêneas e tem mostrado grande potencial para a predição de solos. Esse método de levantamentos representa uma evolução no entendimento das relações pedologia-geomorfologia e, conseqüentemente, mostra-se como uma ferramenta importante para identificar e mapear áreas com mesmas características pedológicas, tanto em relação a classes como de propriedades do solo (SIRTOLI *et al.*, 2008a; SIRTOLI *et al.*, 2008b; DALMOLIN; TEN CATEN, 2015).

Assim, para Lagacherie e Voltz (2000) uma das possibilidades do MDS é utilizar a modelagem preditiva para extrapolar os limites das classes de solos mapeadas digitalmente para áreas adjacentes e não mapeadas, no caso daquelas com o mesmo padrão geomorfológico e geológico, resultando em ganho de informações geradas previamente em áreas de referência.

Nessas áreas onde não há um mapeamento pedológico, o manejo e a conservação do solo pode ser prejudicado, uma vez que o solo pode ser degradado pelo uso inadequado e intensivo, causando a redução de sua fertilidade natural, a diminuição da matéria orgânica e, sobretudo, a erosão. Nesta última condição, o desempenho de suas funções básicas fica severamente prejudicado, acarretando interferências negativas no equilíbrio ambiental, diminuindo drasticamente a qualidade de vida nos ecossistemas, principalmente naqueles que sofrem mais diretamente com a interferência humana (LIMA *et al.*, 2007; SANTOS; WESTPHALEN, 2014).

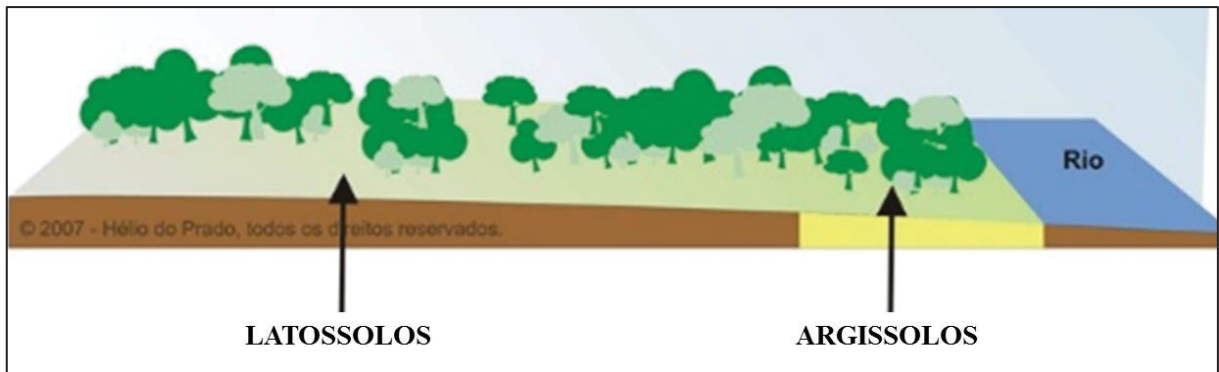
Aliado às condições de uso da terra, impostas pela nova forma de ocupação humana na região noroeste do estado do Paraná, os processos erosivos se intensificaram em função das características físico-naturais dos solos, principalmente pela influência litológica do Grupo Caiuá na sua textura. Inserido no Terceiro Planalto Paranaense, esse grupo apresenta um conjunto de rochas sedimentares de deposição eólica do período Cretáceo que recobrem a região noroeste (FERNANDES; COIMBRA, 1994; GASPARETTO *et al.*, 2001).

Nakashima (1999) caracterizou geomorfologicamente a região com relevos uniformes e suaves, com planaltos escalonados, inclinados levemente em direção ao vale do rio Paraná. Os solos são predominantemente espessos, em geral com textura variando de arenosa a média/argilosa, o que lhe confere elevada suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos.

Nakashima (*op. cit*) ainda destaca que as porções na vertente onde há a transição de Latossolos para Argissolos (FIGURA 1) são os locais com maior probabilidade de ocorrência da intensificação desses processos erosivos. Por essa razão, a confecção de mapas pedológicos

com maior detalhamento é de extrema importância para auxiliar nas técnicas de manejo e conservação dos solos dessa região do estado.

FIGURA 1 – PASSAGEM LATERAL DE LATOSSOLOS PARA ARGISSOLOS CARACTERÍSTICA NO NOROESTE DO PARANÁ



FONTE: Adaptado de PRADO (2017)

A região noroeste também possui uma extensa planície fluvial, associada aos rios Ivaí e também do Paraná (mais à jusante). Essa planície refere-se às porções do vale fluvial constituídas de sedimentos aluviais que circundam o curso de água e são periodicamente inundadas pela dinâmica da rede de drenagem, permanecendo o nível freático próximo da superfície do solo grande parte do ano. Nesses ambientes podem ser encontradas classes de solos como Gleissolos, Organossolos e ainda Neossolos Flúvicos (NAKASHIMA, 1999; IBGE, 2009; CHRISTOFOLETTI, 2011).

Após essa contextualização e presumindo a relação existente entre os solos e o relevo (que é necessária para a realização dos mapeamentos digitais de solos) a hipótese formulada para esta pesquisa foi a de que é possível aventar-se que com a cartografia pedológica preditiva, com base na integração de atributos topográficos, pode-se identificar a proporção e os limites da passagem lateral de Latossolos para Argissolos em relevos suaves a suavemente ondulados da região noroeste do estado do Paraná.

Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa foi propor a elaboração de modelos preditivos através do desenvolvimento metodológico de técnicas de mapeamentos capazes de contribuir para a espacialização de duas unidades de mapeamento (predominância de Latossolos e de Argissolos respectivamente) localizados no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Ivaí, elaborados a partir da integração de atributos topográficos por dois métodos distintos.

Para alcançar o objetivo proposto neste estudo, alguns objetivos específicos foram estipulados, tais como:

- a) Encontrar valores discretos para os atributos topográficos afim de representar a distribuição das unidades de mapeamento de Latossolos e Argissolos;
- b) Delimitar compartimento de solos da planície fluvial da área de estudo;
- c) Integrar os atributos topográficos por meio dos métodos de Tabulação Cruzada e Regressões Logísticas para delimitação das unidades de mapeamento em áreas de referência;
- d) Extrapolar as informações das áreas de referência para áreas adjacentes não mapeadas;
- e) Comparar os mapas preditivos com os mapas de solos preexistentes que abrangem a área de estudo.

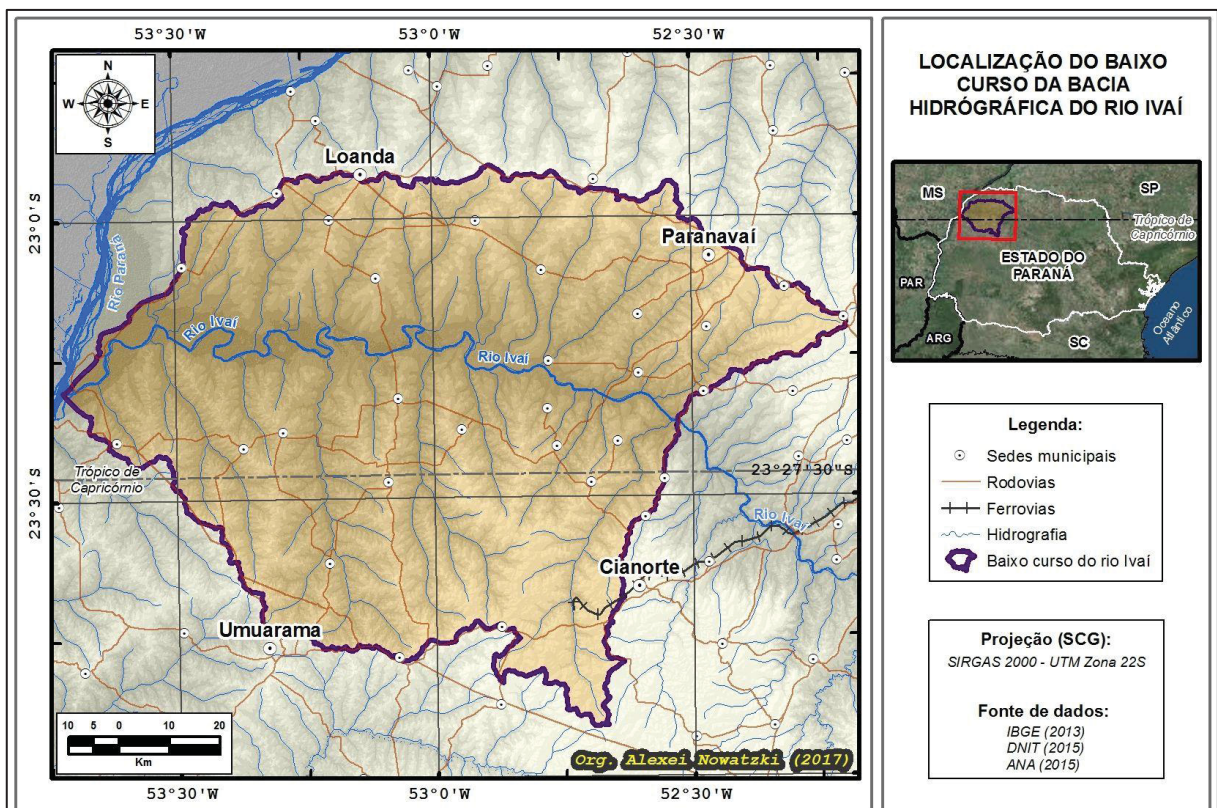
O trabalho foi dividido nos seguintes capítulos principais: Introdução, apresentação e caracterização da área de estudo, revisão de literatura, materiais e métodos, resultados e discussão e conclusões.

## 2 APRESENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde ao baixo curso da bacia hidrográfica do rio Ivaí, com extensão de aproximadamente 9.600 km<sup>2</sup>, conforme ilustrado na FIGURA 2. Ela foi selecionada por se localizar na região noroeste do estado do Paraná e por se constituir em área piloto de pesquisas desenvolvidas pelo Laboratório de Biogeografia e Solos da UFPR, algumas, inclusive, já concluídas, com destaque para Couto (2015), Fumiya (2017) e Mangueira (2017).

Esta área se localiza na mesorregião geográfica noroeste paranaense, conforme descrito em IBGE (2017). Essa mesorregião se divide nas microrregiões geográficas: Paranavaí, Umuarama e Cianorte. A mais recente divisão regional do Brasil (IBGE, 2017) estabelece uma divisão em regiões geográficas imediatas e intermediárias, sendo a área de estudo enquadrada na região intermediária de Maringá e nas imediatas: Maringá, Paranavaí, Loanda, Umuarama e Cianorte.

FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DO BAIXO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVAÍ

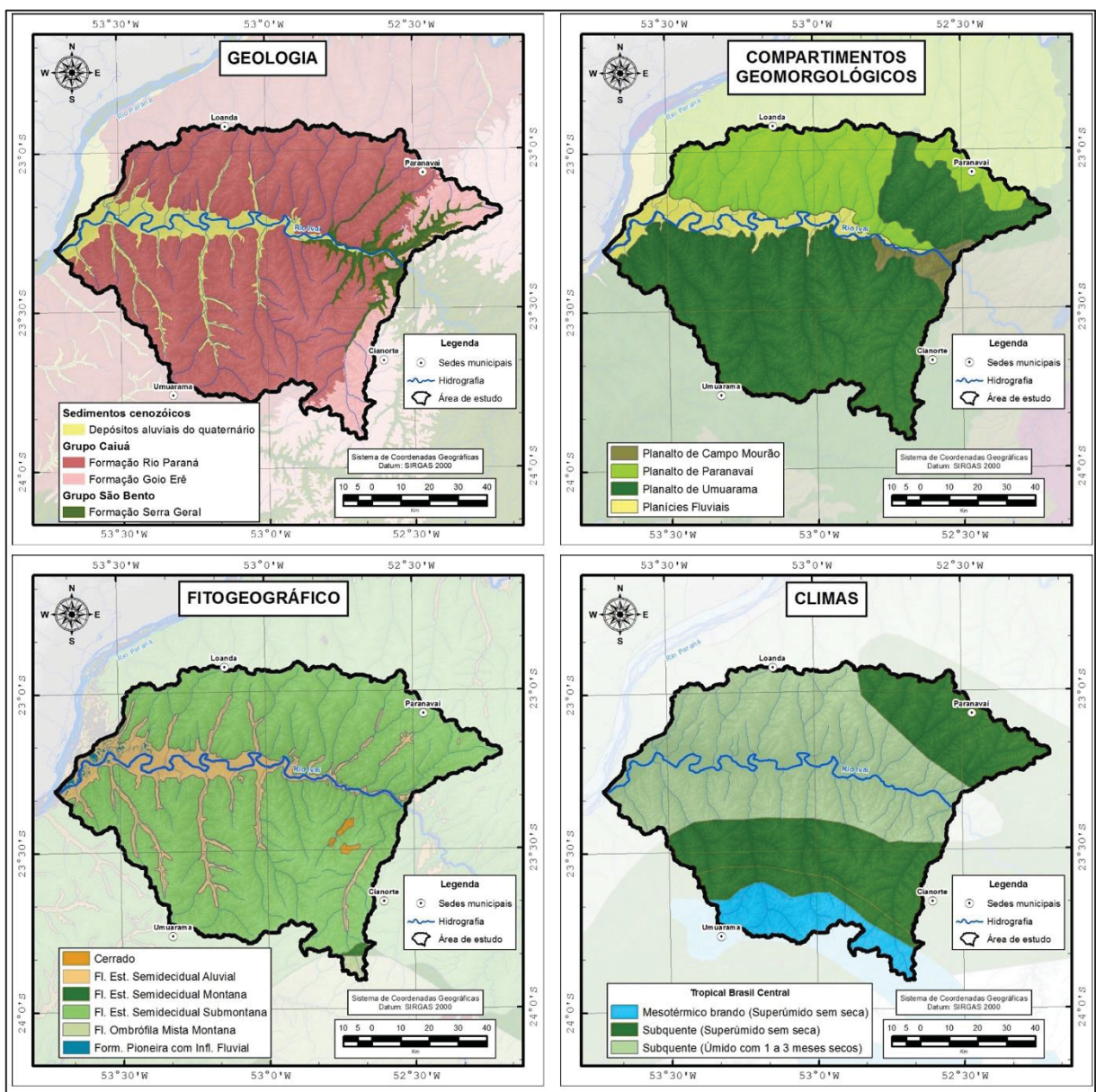


A bacia do rio Ivaí é a segunda maior do estado e apresenta uso e cobertura das terras diversificado, porém eminentemente agrícola – com o plantio extensivo de soja, milho e cana de açúcar – e pecuária. Segundo Santos *et al.* (2013), a rápida ocupação da bacia, a partir da

década de 1940, promoveu intensa retirada da vegetação original, as substituindo por campos agrícolas, de tal maneira que atualmente restam menos de 9% de sua cobertura florestal original, o que alterou profundamente o comportamento do escoamento hídrico de superfície e subsuperfície.

A caracterização da área de estudo foi desenvolvida sob o viés do meio físico, apresentando aspectos de geologia, compartimentos geomorfológicos, fitogeográfico e clima (FIGURA 3 e TABELA 1).

FIGURA 3 – ASPECTOS DO MEIO FÍSICO



FONTE: Adaptado de FERNANDES *et al.*, (2012); SANTOS *et al.*, (2006); ITCG (2009); IBGE (2002)

TABELA 1 – CÁLCULO DE ÁREA DO MEIO FÍSICO

Classe		Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>CONVENÇÕES GEOLÓGICAS</b>			
Sedimentos cenozoicos (depósitos aluviais do Quaternário)		986,22	10,27
Grupo Caiuá	Formação Rio Paraná	7.216,15	75,16
	Formação Goio Erê	851,30	8,87
Grupo São Bento	Formação Serra Geral	547,67	5,70
<i>TOTAL</i>		<i>9.601,34</i>	<i>100,00</i>
<b>COMPARTIMENTOS GEOMORFOLÓGICOS</b>			
Planalto de Campo Mourão		238,58	2,48
Planalto de Paranavaí		2.579,66	26,87
Planalto de Umuarama		5.998,17	62,47
Planícies Fluviais		784,93	8,18
<i>TOTAL</i>		<i>9.601,34</i>	<i>100,00</i>
<b>FITOGEOGRÁFICO</b>			
Cerrado		39,15	0,41
Floresta Estacional Semidecidual Aluvial		1.228,55	12,80
Floresta Estacional Semidecidual Montana		28,13	0,29
Floresta Estacional Semidecidual Submontana		8.213,25	85,54
Floresta Ombófila Mista Montana		53,26	0,55
Formações pioneiras de influência fluvial - Várzeas do rio Paraná		39,00	0,41
<i>TOTAL</i>		<i>9.601,34</i>	<i>100,00</i>
<b>CLASSES CLIMÁTICAS</b>			
Mesotérmico brando (Superúmido sem seca)		873,95	9,10
Subquente (Úmido com 1 a 3 meses secos)		5.068,24	52,79
Subquente (Superúmido sem seca)		3.659,16	38,11
<i>TOTAL</i>		<i>9.601,34</i>	<i>100,00</i>

FONTE: FERNANDES *et al.*, (2012); SANTOS *et al.*, (2006); ITCG (2009); IBGE (2002)

As características geológicas estão divididas em três classes: Sedimentos cenozoicos, Grupo Caiuá (Mesozóico) e Grupo São Bento (Mesozóico). A primeira representa os locais parcialmente recobertos pela deposição de sedimentos inconsolidados oriundos da erosão de materiais de litologias mais antigas intemperizadas. O processo formador é o hidráulico-deposicional (por sistemas fluviais), condicionado às calhas de drenagem dos rios e planícies de inundação. A formação destes depósitos iniciou no período Quaternário e continua ocorrendo devido ao avanço do intemperismo, erosão e retrabalhamento dos sedimentos anteriormente formados. Os depósitos de terraço mais antigos passam, com o avanço do processo erosivo, a constituir paleoterraços (MINEROPAR, 2001).

O Grupo Caiuá<sup>1</sup> apresenta um conjunto de rochas sedimentares (arenitos) do período Cretáceo que recobrem a região noroeste do Paraná. Este grupo ocupa a maior extensão da área de estudo com 84% sendo a maioria representada pela Formação Rio Paraná (75,16%) (FERNANDES; COIMBRA, 1994; GASPARETTO *et al.*, 2001; MINEROPAR, 2001; FERNANDES *et al.*, 2012).

O processo de sedimentação dos arenitos do Grupo Caiuá ocorreu Cretáceo Superior (era Mesozoica) tendo sua origem no surgimento de uma depressão criada por subsidência termomecânica que originou a Bacia Bauru e propiciou processos de sedimentação (FERNANDES; COIMBRA, 1994; FUMIYA *et al.*, 2016).

O Grupo Caiuá é composto por três formações: Goio Erê, Rio Paraná e Santo Anastácio (apenas as duas primeiras formações são encontradas na área de estudo). Os arenitos deste grupo foram depositados em ambiente desértico, geneticamente relacionados, correspondentes a subambientes distintos: zona central de *sand sea* (Formação Rio Paraná), zona de depósitos eólicos periféricos (Formação Goio Erê) e planície de lençóis de areia (Formação Santo Anastácio) (FERNANDES; COIMBRA, 1994).

Por fim, o Grupo São Bento, representado pela Formação Serra Geral se encontra mais a montante da área de estudo (porção leste). Essa formação é constituída por extensos derrames de rochas ígneas, predominando basaltos, de idade jurássica-cretácea (MINEROPAR, 2001).

Inserido no Terceiro Planalto Paranaense (MAACK, 1981), a área de estudo possui duas divisões morfológicas: planícies e planaltos que serão descritos a seguir de acordo com MINEROPAR e UFPR (2006) e SANTOS *et al.* (2006).

A planície fluvial está associada aos depósitos a montante de níveis de base locais e regionais. Corresponde às áreas essencialmente planas, geneticamente geradas por deposição de origem fluvial, onde predominam os processos agradacionais. Na área de estudo, compreende as planícies dos rios Ivaí e também do Paraná em sua porção mais à jusante

A subunidade morfoescultural Planalto de Campo Mourão, apresenta dissecação baixa e classe de declividade predominante menor que 6%. Em relação ao relevo apresenta um gradiente de 260 metros sobre o nível do mar com formas predominantes de topos aplainados, vertentes retilíneas e côncavas na base e vales em calha, modeladas em rochas da Formação Serra Geral.

A subunidade Planalto de Paranaíba, apresenta dissecação baixa com declividade predominante menor que 6%. Apresenta um gradiente de 260 metros com formas

---

<sup>1</sup> A denominação Grupo Caiuá foi proposta por Fernandes e Coimbra (1994), pois a mesma era considerada formação geológica, dentre as demais presentes do Grupo Bauru, conforme descrito em Mineropar (2001).

predominantes de topos aplainados, vertentes convexas e vales em “V” aberto, modeladas em rochas do Grupo Caiuá.

A última subunidade corresponde ao Planalto de Umuarama. Possui dissecação média e também com classes de declividades predominantes menores que 6%. O relevo apresenta um gradiente de 380 metros com formas predominantes são topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em “V”, modeladas em rochas do Grupo Caiuá.

Sobre os aspectos fitogeográficos, a classe mais representativa é a Floresta Estacional Semidecidual. Segundo IBGE (2012) esse tipo florestal ocorre em função do clima estacional que determina semideciduidade da folhagem. Se caracteriza por acentuada seca hiberna e por intensas chuvas de verão; na área de estudo, correlaciona-se a clima sem período seco, porém com inverno bastante frio (temperaturas médias mensais inferiores a 15° C), que determina repouso fisiológico e queda parcial da folhagem.

A classe de maior distribuição é a Floresta Estacional Semidecidual Submontana, com cerca de 85% da área de estudo. Ainda ocorre a subclasse Montana e Aluvial (na planície fluvial dos rios Paraná e Ivaí, associada com a classe Formações pioneiras de influência fluvial - Várzeas do rio Paraná). Cabe destacar que existem pequenas manchas de Cerrado (vegetação xeromorfa) e de Floresta Ombrófila Mista Montana (nas porções mais subtropical da área de estudo).

A caracterização climática foi realizada pelo conceito de Clima Zonal (IBGE, 2002) cujas zonas climáticas são agrupadas por características de temperatura e umidade. A área de estudo se encontra na zona Tropical Brasil Central, subdividida em três classes: Subquente (úmido com 1 a 3 meses secos) em áreas de maior hipsometria; Subquente (superúmido sem seca) nas proximidades das planícies fluviais (menor hipsometria); e Mesotérmico brando (Superúmido sem seca) nas porções mais subtropicais da área de estudo.

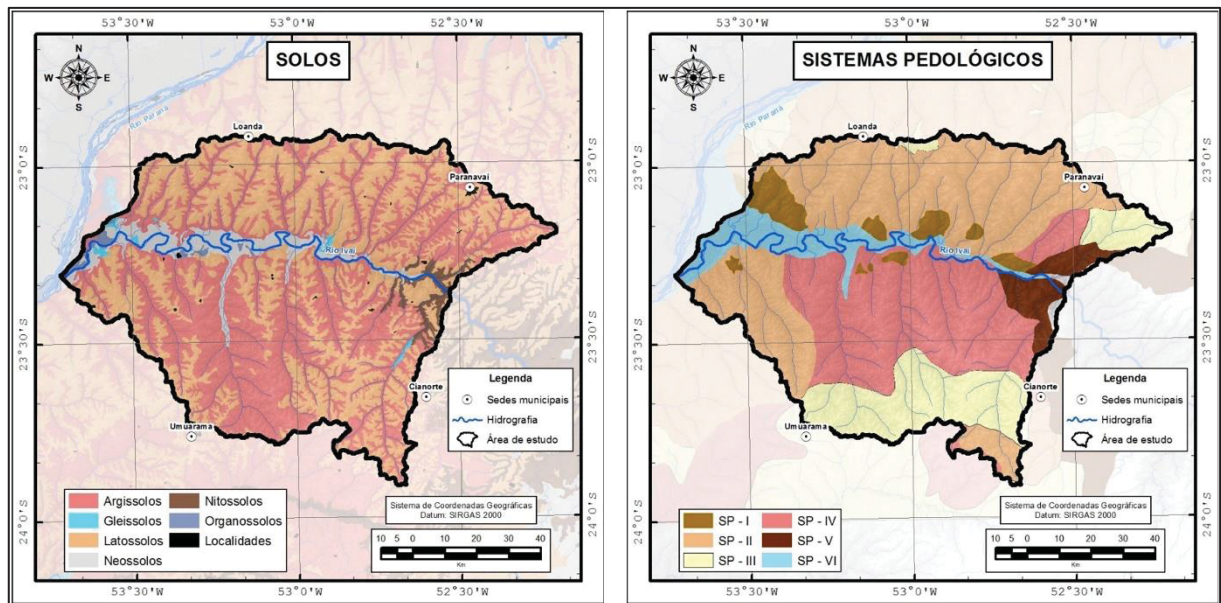
Complementando essa questão climática, Mangueira e Goudard (2016) destacam que entre os anos de 2005 e 2015 os maiores valores acumulados médios pluviométricos mensais são verificados nos meses de outubro (200,7 milímetros), novembro (189,4 mm) e fevereiro (189,2 mm) para o município de Umuarama e, em fevereiro (200,8 mm), janeiro (183,7 mm) e novembro (181,6 mm) em Paranavaí.

A Bacia Hidrográfica do Ivaí possui uma área total de 36.540,0 km<sup>2</sup> cerca de 19% da área do estado. Na região do Baixo Ivaí, há uma predominância de pastagens artificiais e campos naturais, com uma porção de agricultura intensiva à sudeste da região (SEMA, 2013).

## 2.1 CLASSES DE SOLOS E SISTEMAS PEDOLÓGICOS

Conforme o mapeamento pedológico realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2007) na escala 1:250.000, no noroeste do Estado é possível notar a predominância de Latossolos (L) e de Argissolos (P) (FIGURA 4). Para a AE, são encontrados em maior porcentagem de área os Argissolos Vermelhos, com 47%, seguidos de Latossolos Vermelhos, com 43%.

FIGURA 4 – CLASSES DE SOLOS (1º NÍVEL CATEGÓRICO)



FONTE: EMBRAPA (2007) e NAKASHIMA (1999)

Ocorrem também na área de estudo Neossolos Flúvicos (5%) ao longo da planície aluvial do rio Ivaí, assim como Organossolos e Gleissolos (TABELA 2).

TABELA 2 – CÁLCULO DE ÁREA – SOLOS

CLASSE	ÁREA (km <sup>2</sup> )	ÁREA (%)
<b>SOLOS</b>		
Argissolo	4.558,41	47,48
Latossolo	4.181,65	43,55
Neossolo	515,50	5,37
Nitossolo	167,64	1,75
Organossolo	57,73	0,60
Água	49,77	0,52
Gleissolo	44,45	0,46
Localidade	26,19	0,27
<b>Total</b>	<b>9.601,34</b>	<b>100,00</b>

CLASSE	ÁREA (km <sup>2</sup> )	ÁREA (%)
<b>SISTEMA PEDOLÓGICO</b>		
SP-I	442,16	4,61
SP-II	3.676,04	38,29
SP-III	1.556,70	16,21
SP-IV	2.754,83	28,69
SP-V	446,48	4,65
SP-VI	725,13	7,55
<b>Total</b>	<b>9.601,34</b>	<b>100,00</b>

FONTE: (EMBRAPA, 2007); NAKASHIMA (1999)

Com vários dados de topossequências realizadas ao longo de todo o Noroeste paranaense, Nakashima (1999) chegou ao mapeamento dos principais sistemas pedológicos do noroeste do Paraná, permitindo uma visão da distribuição desses sistemas e suas correlações com o relevo e as feições erosivas.

Para Ruellan e Dosso (1993) sistema pedológico é uma porção da cobertura pedológica que, pelas estruturas e dinâmicas, constitui uma unidade. É, portanto, um volume de solo no qual os horizontes são organizados entre si vertical e lateralmente, sendo descrito, limitado e compreendido segundo suas estruturas (organizações elementares, assembléias, horizontes) e seu funcionamento. A evolução do sistema pedológico depende de fatores externos, tais como, clima, vida, rocha, relevo e de fatores internos, relacionados ao seu autodesenvolvimento.

Conforme Nakashima (1999) o Sistema Pedológico (SP) I é composto por Latossolos vermelhos com textura argilosa; por Argissolos vermelhos com textura média; e por Gleissolos Háplicos aparece principalmente em manchas isoladas próximas das planícies aluviais dos rios Paranapanema e Ivaí.

O Sistema Pedológico-II ocorre em quase todo o divisor principal dos rios Paranapanema-Ivaí e afluentes. Tem predominância de Latossolo Vermelho com textura média; de Argissolo Vermelho com textura média; e Gleissolo Háplico. Ocorre também no setor oeste/sudoeste da área, drenada principalmente pelos afluentes do rio Paraná e setor sul-sudeste, nas proximidades de São Lourenço, ao sul da cidade de Cianorte.

O Sistema-III é constituído por Latossolos Vermelhos, de textura média; Argissolos Vermelhos abruptos, de textura média e Gleissolos que aparecem em áreas de maior densidade de drenagem. O sistema referido ocorre no setor leste da área de estudo, na drenagem do rio Paranapanema, tendo como referência a cidade de Nova Esperança. Em direção Oeste, ocorre em pequenas porções isoladas, representado por pequenas áreas com altitudes

ligeiramente mais elevadas. Ao sul do rio Ivaí, principalmente no interflúvio Ivaí-Goioerê, aparece uma extensa área contínua, tendo como referência a área de Umuarama, Cruzeiro do Oeste.

O Sistema-IV se distribui nos interflúvios e patamares da margem esquerda do rio Ivaí, tendo como referência a Cidade Gaúcha. Se distribui ainda em uma pequena área desse SP na margem direita do rio Ivaí, ao sul de Tamboara. Nesse sistema ocorrem Latossolos vermelhos; Argissolos vermelhos, de textura média; Argissolos vermelhos abrupticos, de textura média e Gleissolos háplicos.

O SP-V ocorre em todo setor leste da área. Nele prevalecem os Latossolos vermelhos, de textura argilosa; Argissolos vermelhos abruptico, de textura média; Argissolos vermelhos, de textura argilosa; e Gleissolos háplicos. Esse sistema representa a área de contato dos grupos Cuiá com o São Bento, onde ocorre o sistema Latossolos vermelhos–Argissolos vermelhos–Gleissolos, com ocorrências de Nitossolos Vermelhos em alguns terços inferiores de vertente.

O último sistema é o SP-VI, composto unicamente de Neossolos Flúvicos com textura variada, que aparecem em todas as planícies de inundação dos rios Paraná e Ivaí.

A partir de todas essas descrições, é possível ver uma síntese das mesmas na FIGURA 5, com informações do substrato geológico, formas de relevo predominantes, sequência de solos (de montante à jusante) e as ilustrações das topossequências representativas para cada sistema pedológico mapeado.

FIGURA 5 – DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS PEDOLÓGICOS DA REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ

DESCRIÇÃO SISTEMAS	ÁREAS		SUBSTRATO GEOLÓGICO	FORMAS DE RELEVO PREDOMINANTES	SEQUÊNCIA DE SOLOS (de Montante à Jusante)	TOPOSEQUÊNCIAS REPRESENTATIVAS
	km <sup>2</sup>	%				
SP I	546	2,20	Arenito Caiuá. Textura fina; coloração arroxeada.	Colinas amplas de topos planos; vertentes longas (1500m-2000m de comprimento), retilíneas, levemente convexadas. Declividade média: 1% a 2%. Vales pouco entalhados.	Latossolo vermelho escuro, eutrófico, orto, textura argilosa - Podzólio vermelho escuro, orto, textura média - Gley pouco húmico.	
SP II	8.349	33,60	Arenito Caiuá. Textura fina; vermelho-arroxeado. Estrutura cruzada, planar de grande porte.	Colinas amplas de topos levemente convexizadas; vertentes longas (1000 - 1500m de comprimento), retilíneas a convexas. Declividades baixas (1% a 2%) no médio e baixo curso dos afluentes dos Rios Paranapanema e Ivaí. Declividade média (5%), próximo a cabeceiras de nascentes.	Latossolo vermelho escuro, distrófico, orto, textura média - Podzólio vermelho amarelo, orto, textura média - Gley pouco húmico.	
SP III	4.431	17,80	Arenito Caiuá. Textura fina a muito fina; vermelho escuro. Estrutura cruzada, plana paralela.	Colinas de tamanho médio, com topos convexizadas; vertentes convexas, ou retilíneas. Extensão de 500m a 1500m de comprimento. Declividade média de 5% a 10%. Relevo fortemente dissecado; vales encaixados em V.	Latossolo vermelho escuro distrófico, orto, textura média - Podzólio vermelho amarelo equivalente eutrófico, abrupto, textura média - Gley pouco húmico, ou Areias Quartzosas.	
SP IV	3.838	15,43	Arenito Caiuá. Textura fina a média; vermelho-arroxeado. Estrutura plana paralela.	Colinas amplas de topos levemente convexizados. Vertentes longas (700m - 1200m de comprimento), levemente convexas; declividades baixas, (1% a 3%) nos médios e baixos cursos dos afluentes dos rios Ivaí e Paranapanema; declividades médias (5% a 7%) no alto curso desses afluentes.	Latossolo vermelho escuro, distrófico, orto, textura média - Podzólio vermelho amarelo, orto, textura média - Podzólio vermelho amarelo, equivalente eutrófico, abrupto, textura média - Gley pouco húmico, ou areias Quartzosas.	
SP V	2.448	9,84	Basalto e Arenito Caiuá (Área de contato).	Colinas médias de topos convexizados; com extensão de 600 a 1000m de comprimento. Declividades médias: 5% a 15%. Relevo fortemente dissecado, e vales entalhados em V.	Latossolo vermelho escuro eutrófico, orto, textura argilosa - Podzólio vermelho amarelo, equivalente eutrófico, abrupto, textura média - terra roxa Estruturada, eutrófica, textura argilosa - Gley pouco húmico.	
SP VI	1.854	7,45	Sedimentos do Quaternário	Planícies e terraços fluviais do sistema hidrográfico: Rios Paraná - Ivaí. Relevo plano com altitude de 230 - 250m. As vertentes das ilhas agradacionais tem declividade de 0% a 1%.	Solos Aluviais, eutróficos, textura argilosa. Solos Hidromórficos: incluem as Areias hidromórficas - Solos orgânicos.	<p>CONVENÇÕES:</p>

FONTE: Adaptado de NAKASIMA (1999) e COUTO (2015)

## 2.2 PROCESSOS EROSIVOS NO NOROESTE DO PARANÁ

A região noroeste do estado do Paraná se distingue por apresentar processos acelerados de erosão hídrica a partir da década de 1950 (FIGURA 6), sobretudo com a presença significativa de ravinas e voçorocas, pois não se teve a preocupação de se respeitar as limitações físicas (geologia, relevo, solos e clima) e ecológicas no processo de ocupação, tanto com a inserção da agricultura quanto na instalação de centros urbanos (CUNHA *et al.*, 1999; CUNHA *et al.*, 2008; WESTPHALEN, 2008; MANGUEIRA *et al.*, 2013; TERASSI *et al.*, 2014; SANTOS; WESTPHALEN, 2014; MANGUERIA; GOUDARD, 2016).

FIGURA 6 – REGISTROS DE EROSÕES NA DÉCADA DE 60 DO SÉC. XX NO NOROESTE DO PARANÁ (MUNICÍPIOS DE COLORADO, NOVA LONDRINA E UMUARAMA)



FONTE: SANTOS e WESTPHALEN (2014)

Santos *et al.* (1999) constataram que na bacia hidrográfica do rio Ivaí cerca de 90% do total da área apresenta alto potencial de perda de solo. Para tanto, consideraram o fator topográfico, o fator erodibilidade e o uso e manejo do solo como principais responsáveis por uma maior ou menor degradação dos solos (MANOSSO, 2006).

Mangueira e Goudard (2016) afirmam que as chuvas contribuem tanto nos processos de formação e transformação dos solos, como também atuam removendo seus constituintes, em constante relação de formação/remoção, em que os processos erosivos são naturais. Do ponto de vista da evolução das feições erosivas, ocorrem avanços significativos coincidindo com os anos de ocorrência de concentração de eventos meteorológicos extremos. Nos municípios de Umuarama e Paranavaí, é notada uma sazonalidade das condições favoráveis ao desenvolvimento desses processos, visto que as chuvas são concentradas, sobretudo, nos meses de primavera e verão (WESTPHALEN, 2008; MANGUERIA; GOUDARD, 2016).

Esses processos erosivos acelerados ocorrem em função das suas características físico-naturais, principalmente pela influência litológica do Grupo Caiuá na textura dos solos. O desmatamento causou uma exposição da camada superficial do solo que apresenta textura arenosa, com teores de argila inferiores a 15%, altamente susceptível à erosão hídrica. O uso

inadequado dos solos do grupo Caiuá e as consequências do processo erosivo nas áreas de pastagens, de plantio de cafés ou lavouras anuais – sem a conservação adequada pela falta de práticas conservacionistas de solo – são relatadas desde o primeiro mapeamento preliminar dos solos do noroeste do Paraná, realizado na década de 70 do séc. XX (FIDALSKI, 1997; CUNHA *et al.*, 1999; CUNHA *et al.*, 2008; TERASSI *et al.*, 2014).

As regiões de climas tropicais, com estações alternadas e bem definidas (uma seca e outra chuvosa) e de substrato geológico sedimentar, apresentam frequentemente as sequências laterais de solos Latossolo-Argissolo ao longo das vertentes. No noroeste do Paraná, os solos são espessos nos longos divisores aplainados de vertentes de baixa declividade, onde predominam os solos com horizonte B latossólico (Bw). Já nos divisores estreitos, com o aumento da declividade nos terços médios/inferiores das vertentes passam a predominar os solos com horizonte B textural (Bt) que são bastante suscetíveis a processos erosivos (VIDAL-TORRADO *et al.*, 1999; NAKASHIMA, 1999; SANTOS; CASTRO, 2006; COUTO; 2015).

Na FOTOGRAFIA 1, nota-se um processo de erosão intensificada na zona rural de Paranaíba (BR-376, km 93), na qual a voçoroca se localiza nos terços inferiores das vertentes, com evolução para o terço médio, local onde há a transição lateral Latossolo-Argissolo.

FOTOGRAFIA 1 – PANORÂMICA DA EROSÃO - ZONA RURAL DE PARANAÍBA



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS) – 2012

Além desses solos sofrerem com a erosão e o empobrecimento da fertilidade, as políticas econômicas contribuem para o êxodo rural e esvaziamento de muitas cidades da região, o que, desde 1975 (por conta das geadas e redução do plantio de café), tem levado ao declínio econômico acentuado. Atualmente, procuram-se alternativas para retomar o desenvolvimento econômico da região, buscando-se formas adequadas de produção agrícola e, principalmente, técnicas de manejo e conservação dos solos (GASPARETTO *et al.*, 2001).

Nakashima (1999) destaca que os processos erosivos são agressivos nos terços inferiores das vertentes, onde os Argissolos se localizam, e as erosões desenvolvidas nessa área

evoluem em direção à montante (predominância dos Latossolos). Essa dinâmica foi possível de ser notada na zona rural do município de Loanda, conforme ilustra a FOTOGRAFIA 2.

FOTOGRAFIA 2 – EROSÃO NA ZONA RURAL DE LOANDA



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS) – 2012

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem por finalidade trazer uma revisão bibliográfica de obras que englobam a temática de mapeamentos pedológicos preditivos. Primeiramente, abordou-se a classificação dos solos e a existência da relação entre solo e relevo, pois essa é considerada a premissa básica para qualquer mapeamento preliminar de solos. Posteriormente, foi feita uma revisão sobre trabalhos que destacam a passagem lateral Latossolo-Argissolo, que ocorre no noroeste do estado do Paraná. O último item deste capítulo, por sua vez, foi destinado ao histórico dos mapeamentos pedológicos preditivos, os quais são entendidos como uma inovação que ocorre atualmente no âmbito da Pedologia e dos mapeamentos de solos. Destacaram-se tanto os trabalhos pioneiros quanto os trabalhos mais recentes, nas quais apresentam novas técnicas de mapeamentos por meio de sistemas de informações geográficas. No Apêndice A está contido um quadro síntese com as principais referências bibliográficas deste capítulo.

#### 2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS E SUAS RELAÇÕES COM O RELEVO

A relevância do fator relevo na gênese dos solos é destacada desde os trabalhos pioneiros de pedologia do russo Vasilli V. Dockuchaev, no séc. XIX. Ele já vinculava a origem dos solos à ação do relevo, atrelada aos demais fatores de formação, sendo eles o material de origem, o clima, os organismos vivos e o tempo cronológico (ESPINDOLA, 2008).

Inúmeras são as definições adotadas para se conceituar o solo. Dentre eles, a clássica do manual norte-americano *Soil Survey Manual* (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América), que determina que os solos podem ser entendidos como

uma coleção de corpos naturais que ocupam porções da superfície da Terra, que sustentam plantas e que têm propriedades definidas ao efeito integrado do clima e organismos, atuando sobre o material de origem; este efeito é condicionado pelo relevo durante períodos de tempo (SOIL SURVEY STAFF, 1993, p8).

Em sua mais recente versão, a definição de solos desse manual se tornou mais completa, abrangendo até mesmo questões pedogenéticas. Assim sendo, os solos são

corpos naturais compostos de sólidos (minerais e matéria orgânica), líquidos e gases, que ocorrem na superfície terrestre, ocupa espaço e caracteriza-se por um ou ambos das seguintes características: horizontes ou camadas, que se distinguem do material parental como resultado de adições, perdas, transferências e transformações de energia e matéria e a capacidade de suportar plantas enraizadas em um ambiente natural (SOIL SCIENCE DIVISION STAFF, 2017, p8).

Nesse mesmo sentido, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) da EMBRAPA, define os solos como

uma coleção de corpos naturais, constituído de partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza, onde ocorrem e, eventualmente terem sido modificados por interferências antrópicas (EMBRAPA, 2018, p.32)

Lepsch (2002; 2011) entende que o solo é uma massa natural que compõe a superfície da Terra, que suporta ou é capaz de suportar plantas. É também uma coleção de corpos naturais que contém matéria viva e é resultante da ação do clima e da biosfera sobre a rocha, cuja transformação em solo se realiza durante certo tempo e é influenciada pelo tipo de relevo. A partir das diferenças entre os solos, pedólogos começaram a se preocupar em como classificá-los de modo sistemático.

O processo de classificação de solos foi sempre motivado pelas necessidades que se iam se revelando, com a realização de levantamentos em escalas médias e pequenas, em que concorriam classes de categorias hierárquicas mais elevadas. O enfoque principal sempre esteve dirigido ao nível hierárquico de grandes grupos de solos, aliado ao exercício da criatividade tentativa no que corresponde ao nível de subgrupo (EMBRAPA, 2018).

A partir da década de 50 do séc. XX, os pedólogos estadunidenses fizeram diversas modificações (adaptações) no sistema de classificação formulado por Baldwin, Kellogg e Thorp (1938) *apud* IBGE (2015), modificado posteriormente por Thorp e Smith (1949) *apud* IBGE (2015), sendo que na década de 70 esses autores publicaram um documento referencial intitulado *Soil Taxonomy*.

No Brasil, a classificação de solos tem sido matéria de interesse, essencialmente motivada pela necessidade decorrente de levantamentos pedológicos, os quais, por sua natureza, constituem gênero de trabalho indutor de classificação de solos (IBGE, 2015).

Os conceitos centrais do antigo sistema estadunidense formam a base da atual classificação brasileira, cuja esquematização atual descende de modificações de critérios, alteração de conceitos, criação de classes novas, desmembramento de algumas classes originais e formalização de reconhecimento de subclasses de natureza transicional ou intermediárias (EMBRAPA, 2018).

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) é uma prioridade nacional compartilhada com várias instituições de ensino e pesquisa no Brasil, desde as primeiras tentativas de organização, a partir da década de 1970, conhecidas como aproximações

sucessivas, buscando definir um sistema hierárquico, multicategórico e aberto, que permita a inclusão de novas classes, e que torne possível a classificação de todos os solos existentes no Território Nacional (EMBRAPA, 2018). A hierarquia do SiBCS se encontra ordenada na seguinte maneira: Ordem, Subordem, Grande Grupo, Subgrupo, Família e Série.

Existem grandes diferenças nos enfoques dos sistemas de classificação dos solos do Brasil (EMBRAPA, 2018), dos Estados Unidos (SOIL SCIENCE DIVISION STAFF, 2017) e Internacional (WRB/FAO, 2015), conforme o QUADRO 1.

QUADRO 1 – PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE OS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

<b>Crítérios</b>	<b>SiBCS (EMBRAPA, 2018)</b>	<b>Estados Unidos (SOIL SCIENCE DIVISION STAFF, 2017)</b>	<b>Sistema Internacional (WRB/FAO, 2015)</b>
Hierarquia	Descendente (da ordem em direção a série)	Ascendente (da série em direção a ordem)	Descendente (do primeiro para o segundo nível)
Primeiro nível (ordem)	Presença ou ausência dos horizontes diagnósticos de superfície e de sub superfície	Presença ou ausência dos horizontes diagnósticos de superfície e de sub superfície, ocorrência ou não do regime hídrico arídico.	Diferenciados com base nos processos pedogenéticos
Número de classes de solos no primeiro nível	13	12	12
Segundo nível (subordem)	Atuação dos processos pedogenéticos	Tipos de regime hídrico, e de horizontes diagnósticos	Prefixos e sufixos relacionados com o manejo
Terceiro nível (ordem)	Condições químicas pedológicas; tipo e arranjo dos horizontes sub superficiais	Condições químicas pedológicas, ocorrência ou não dos horizontes diagnósticos	Não contempla
Quarto nível (subgrupo)	Solos típicos ou intermediários	Solos típicos ou intermediários	Não contempla
Quinto nível (família)	Atualmente não contempla	Textura, mineralogia e regime de temperatura	Não contempla
Sexto nível (série)	Atualmente não contempla	Solos pedogeneticamente idênticos	Não contempla

Fonte: PRADO (2017)

Dentre as inúmeras definições e classificações de solos existentes, em praticamente todas são consideradas os fatores que levam os solos a se desenvolverem e se tornarem uma camada distinta na litosfera, a exemplo de solos rasos desenvolvidos em condições de declives acentuados, ou solos hidromórficos em fundo de vales. A publicação da obra “Fatores de Formação do Solo” de Hans Jenny, na década de 40 do século XX, equacionou o solo (S) como

função de seus fatores de formação, que ficou conhecido como CLORPT (Equação 1) (JENNY, 1994):

$$S = f(cl, o, r, p, t, \dots) \quad (1)$$

onde:

cl = clima  
o = organismos  
r = relevo  
p = material de origem  
t = tempo  
... = fatores não determinados

Diversos autores assumem que o relevo influencia nos processos pedogenéticos, uma vez que a topografia é responsável por regular o escoamento superficial das águas pluviais, pois controla a quantidade de água que infiltra numa rocha ou saprólito. Tanto a quantidade de água como também o tempo de sua permanência no terreno influenciam na liberação e eliminação dos compostos solubilizados pelas reações químicas do intemperismo. Estas reações ocorrem mais intensamente nas porções das vertentes onde há mais infiltração, seguida de lixiviação dos produtos solúveis (TOLEDO *et al.*, 2000; LEPSCH, 2011).

As vertentes são o principal objeto de estudo da Geomorfologia e atua como uma das categorias para o entendimento da fisiologia da paisagem. O conceito de vertente foi consagrado por Dylik (1968, *apud* CASSETI, 2005), sendo genericamente compreendida como “toda superfície terrestre inclinada, muito extensa ou distintamente limitada, subordinada às leis gerais da gravidade”. Seria, portanto, uma forma tridimensional que foi modelada através dos processos atuantes no presente ou no passado, representando a conexão dinâmica entre o interflúvio e o fundo do vale.

Caseti (2005) frisa ainda que o relevo é um dos fatores mais importantes no condicionamento da erosão, pois o modelado terrestre é constituído, em sua maior parte, por vertentes. Aliado a essa informação, Coelho (2010) assume que as diferentes classes de solos em diferentes posições do relevo remontam à ideia de que os processos de sua formação também são diferentes para cada segmento de vertente. Frequentemente, a porção superior da vertente se caracteriza pela erosão, a porção intermediária se caracteriza pelo transporte, e o sopé pela deposição dos sedimentos. Sendo assim, em porções onde há mais erosão, os solos tendem a ser menos profundos.

Essa segmentação das vertentes pode ser reproduzida através de modelos que enfatizam as interações entre os materiais do solo e sua movimentação, transporte e deposição pela água e gravidade, em superfície e subsuperfície do terreno. Portanto, são considerados

modelos pedogeomórficos, pois relacionam processos geomórficos superficiais aos processos pedológicos subsuperficiais atuais (CAMPOS *et al.*, 2006).

Queiroz Neto (2000; 2010; 2011) também argumenta que existe forte influência da topografia sobre os solos, pois certas propriedades variam ao longo das vertentes, como a granulometria, as bases trocáveis e outras, sendo que esta variação é interpretada como resultado da circulação hídrica. Da mesma forma, Valladares e Hott (2008) ressaltam que as formas do relevo têm grande impacto sobre os solos por meio dos movimentos da água e de sedimentos, juntamente ainda com outros fatores, como a rocha-mãe.

McBratney *et al.* (2000) apontam que o comportamento de diversos atributos do solo é controlado pelos componentes da paisagem, sobretudo os geomorfométricos como altitude (hipsometria), declividade e curvatura (plano e perfil) do terreno, os quais influenciam processos pedogenéticos.

Espindola (2008) ressalta que essa relação solo e relevo foi representada pelo conceito de catena, proposto por Geoffrey Milne em 1935, colocando o solo como “um elo de uma corrente” de uma sucessão topográfica. Milne evidenciou, já naquela época, a diferenciação lateral que era expressa em termos de sucessão de classes de solos de acordo com a variação topográfica. Entretanto, não eram estudadas nem as passagens laterais entre os horizontes dos solos, nem a organização lateral da cobertura pedológica.

O conceito de catena seria, portanto, a repetição de certas unidades de solo em algumas posições específicas de vertentes de numa determinada paisagem, mostrando intrínseca relação entre as classes de solo e o relevo, ou seja, a pedogênese e a morfogênese (ESPÍNDOLA, 2008; ÁVILA, 2009).

Todavia, a partir da década de 70, com trabalhos de René Boulet, Gérard Bocquier, dentre outros, começou-se a considerar a concepção de catena – puramente topográfica em sua origem – como insuficiente, sendo necessário incorporar dinâmicas de vertente na análise para a compreensão da gênese dos solos.

Neste contexto, surgiram inicialmente na França, trabalhos com o método baseado na investigação ao longo das vertentes por meio de topossequências, denominado de “análise estrutural da cobertura pedológica”, na qual procura-se entender o solo como um *continuum* que recobre toda a extensão das encostas e não como um indivíduo representado apenas por perfis verticais. Esses trabalhos trouxeram muitos resultados novos e mostraram que a análise detalhada da organização lateral é muito importante para compreender a gênese e dinâmica das coberturas pedológicas (BOULET *et al.*, 1982; FERNANDES BARROS, 1985; CASTRO,

1989; SANTOS, 2000b; ESPÍNDOLA, 2008; ÁVILA, 2009; QUEIROZ NETO, 2000; 2010; 2011).

Atualmente, a análise estrutural da cobertura pedológica é utilizada também na diagnose e na prognose de problemas ambientais relacionados à degradação dos solos, como o desenvolvimento de processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) e a compactação de solos agricultáveis, assim como é um método bastante utilizado em diversos mapeamentos pedológicos (SANTOS, 2000b).

Ippoliti *et al.* (2005) ressaltam que essas relações entre os solos e o relevo têm sido, por longo tempo, a base do mapeamento de solos. Atualmente, a análise digital do terreno introduz algumas vantagens em relação ao método tradicional para a separação de unidades de mapeamento. Em geral, os métodos que organizam a superfície de acordo com modelos do terreno têm mostrado potencial para melhorar a predição de ocorrência das classes de solos, visto que a posição na paisagem influencia os processos de formação e os atributos pedológicos.

Contudo, Prates *et al.* (2012) advertem que mesmo que se encontre modelos de representação dos solos na paisagem, os mesmos podem não ser suficientes para sua delimitação, pois se sabe que a ocorrência dos solos é produto de um conjunto de fatores os quais, atuando sistematicamente, favorecem o desenvolvimento de determinados solos.

Entretanto, Crivelenti (2009) destaca que há constante tentativa na formulação de modelos para compartimentar a paisagem de forma a refletir a sua dinâmica interna e suas interações. Dentre essas interações, podem-se citar modelos que visam compreender a associação do solo com as formas do relevo.

Os Latossolos são exemplos nítidos dessa relação entre solo e relevo. Eles ocorrem em superfícies mais planas (ou até ligeiramente onduladas) e bem drenadas. Isso acontece porque o relevo influencia na formação do solo, fundamentalmente, pela sua interferência na dinâmica da água e nos processos de erosão e sedimentação (SALOMÃO, 1994; SANTOS; CASTRO, 2006).

Ávila (2009) argumenta que em áreas com relevo mais acidentado, grande parte das águas de chuva é perdida por escoamentos superficiais, favorecendo a erosão e retardando a pedogênese, formando nestes casos solos menos profundos.

## 2.2 PASSAGEM LATERAL LATOSSOLO-ARGISSOLO

Latossolos são solos profundos - geralmente com mais de 2 metros de espessura -, bastante intemperizados - bem desenvolvidos e bastante alterados em relação à rocha -, além

de serem porosos, permeáveis, com boa drenagem (não têm excesso de água). Na paisagem, esses solos ocupam, normalmente, os topos em relevos mais planos (LEPSCH, 2002; 2011; LIMA *et al.*, 2012, IBGE, 2015).

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, eles são definidos como “solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico” (EMBRAPA, 2018, p.93). Esse horizonte pode aparecer imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, exceto hístico.

Assim, um horizonte B latossólico compreende

um horizonte mineral subsuperficial, cujos constituintes evidenciam avançado estágio de intemperização, explícita pela alteração quase completa dos minerais primários menos resistentes ao intemperismo e/ou de minerais de argila 2:1, seguida de intensa dessilicificação, lixiviação de bases e concentração residual de sesquióxidos, argila do tipo 1:1 e minerais primários resistentes ao intemperismo. Em geral, é constituído por quantidades variáveis de óxidos de ferro e de alumínio, argilominerais do tipo 1:1, quartzo e outros minerais mais resistentes ao intemperismo. (EMBRAPA, 2018, p. 51)

Por conta dessas características, os Latossolos são bastante utilizados na produção rural; embora geralmente sejam de baixa fertilidade, as práticas de adubação e correção do solo, realizadas pelos produtores rurais, os tornam muito produtivos. Além disso, o relevo plano e as características físicas adequadas determinam que os Latossolos apresentem alta estabilidade, baixo risco de erosão e grande capacidade para suportar estradas, construções, entre outros (LEPSCH, 2011; LIMA *et al.*, 2012).

Os Argissolos são solos que apresentam acúmulo de argila no horizonte B, ou seja, o horizonte mais superficial do solo possui quantidade maior de areia e/ou silte que o horizonte subsuperficial (horizonte B). Além disso, apresentam reduzida capacidade de reter nutrientes para as plantas no horizonte A. Por terem essa mudança textural (podendo ser abrupta) entre os horizontes, são solos bastante susceptíveis à erosão, principalmente em relevos mais declivosos (VIDAL-TORRADO *et al.*, 1999; LIMA *et al.*, 2012; IBGE, 2015).

Para o SiBCS, eles são definidos como “solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico” (EMBRAPA, 2018, p.85). O horizonte B textural (Bt) encontra-se imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, exceto o hístico.

Portanto, um horizonte B textural é definido como

um horizonte mineral subsuperficial com textura franco arenosa ou mais fina, onde houve incremento de argila (fração <0,002mm), orientada ou não, desde que não exclusivamente por descontinuidade de material originário, resultante de acumulação

ou concentração absoluta ou relativa decorrente de processos de iluviação e/ou formação *in situ* e/ou herdada do material de origem e/ou infiltração de argila ou argila mais silte, com ou sem matéria orgânica e/ou destruição de argila no horizonte A e/ou perda de argila no horizonte A por erosão diferencial. O conteúdo de argila do horizonte B textural é maior que o do horizonte A ou E e pode, ou não, ser maior que o do horizonte C. (EMBRAPA, 2018, p. 49).

De acordo com Vidal-Torrado *et al.* (1999), os processos considerados mais importantes e que levam à formação do horizonte Bt e do consequente gradiente textural dos Argissolos são: a argiluviação, que é resultante da migração das argilas da camada superficial; a ferrólise, mecanismo de destruição das argilas dos horizontes superficiais por hidromorfismo temporário; o adensamento, menos conhecido que os dois processos citados, resultante de deformações plásticas, causado por ciclos de umedecimento e secamento, frequentemente associado à argiluviação; além de outros menos conhecidos, como a herança litológica (litodependência), o coluvionamento e também há a elutriação.

No Brasil, há consenso no sentido de associar a gênese dos Latossolos ao intemperismo *in situ* das rochas subjacentes; enquanto para os Argissolos ainda existem divergências quanto à sua origem e evolução. Recentes pesquisas sugerem gênese posterior à dos Latossolos, a partir de processos de transformação lateral dos horizontes característicos dos Latossolos, ou seja, um Bw se transformando em Bt (FERNANDES BARROS, 1985; CASTRO, 1989; VIDAL-TORRADO *et al.*, 1999; SANTOS, 2000a).

Trabalhos como os de Salomão (1994) e de Santos (1995, 2000a) associam a distribuição dos Argissolos ao relevo dissecado, com maior densidade e grau de entalhe da rede de drenagem e maior declive em detrimento dos Latossolos, que se localizam a montante nos declives inferiores e com topos mais planos.

A partir dessas características, Vidal-Torrado *et al.* (1999) ressaltam a existência de um componente adicional de grande importância, que é a instalação de fluxos hídricos laterais, em decorrência de novas condições hidrológicas. Estes fluxos seriam produzidos pelo rebaixamento do relevo em consequência do aprofundamento do nível de base, pelo menos desde que se instalaram os climas tropicais úmidos com estação seca definida, durante o Quaternário.

Em relação ao comportamento físico e hídrico, o aparecimento do horizonte B textural (Bt), característico dos Argissolos, modifica as dinâmicas hídricas e a drenagem passa de vertical e profunda nos Latossolos, localizados a montante, para lateral e subsuperficial quando aparece o horizonte Bt a jusante. A camada arenosa pouco resistente que constitui o horizonte E, acima do Bt, é mais suscetível à erosão linear (ravinas e voçorocas) e à erosão laminar; o

lençol suspenso acima do Bt também se manifesta por fenômenos de *piping*, todavia, mais superficiais que os provocados pelo lençol profundo (SALOMÃO, 1994; SANTOS, 1995; VIDAL-TORRADO *et al.*, 1999; SANTOS, 2000a; SANTOS; CASTRO, 2006)<sup>2</sup>.

No noroeste do estado do Paraná, encontra-se justamente essa passagem lateral de Latossolos para Argissolos, originados de rochas areníticas e climas tropicais (NAKASHIMA, 1999; CUNHA *et al.*, 1999; CUNHA *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2011). O solo nessa região varia em função do relevo, ou seja, nas porções mais altas e planas da paisagem, por exemplo, é comum se encontrar Latossolos. Com o aumento da declividade, pode-se encontrar Argissolos e, enfim, próximo à rede de drenagem, pode-se encontrar ainda Neossolos Quartzarênicos e também Gleissolos (SILVA *et al.*, 2011).

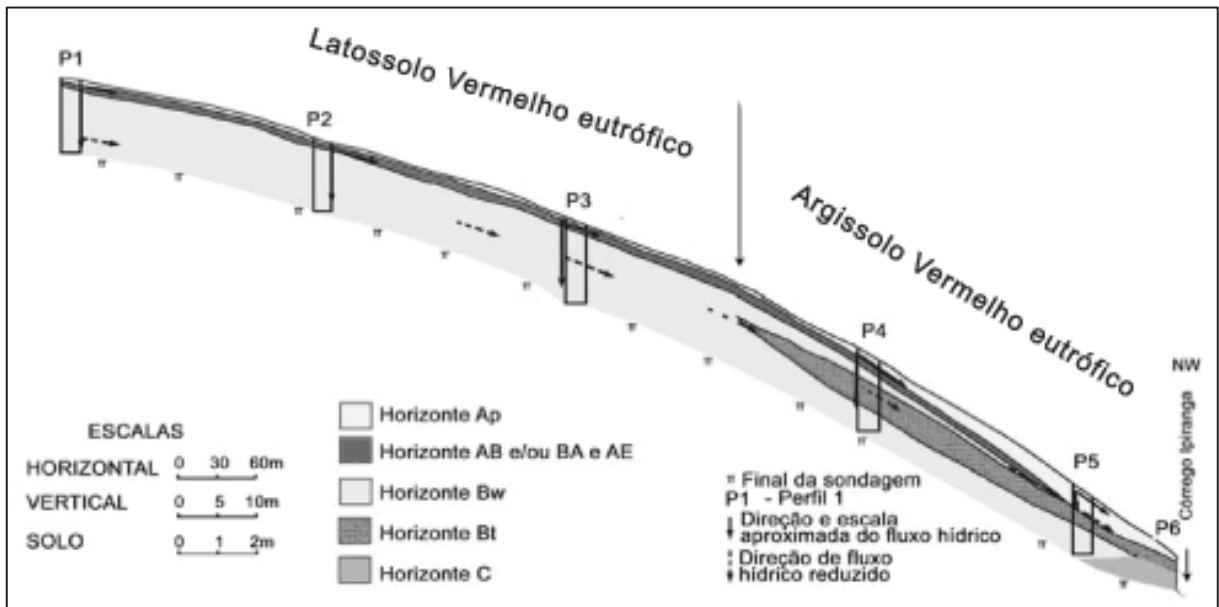
Conforme destacam Santos e Castro (2006) no que se refere aos Argissolos, quaisquer que sejam o relevo e o substrato rochoso, as rupturas de declive marcam com frequência, o aparecimento desses solos. A partir dessas rupturas, pode ocorrer uma transformação do horizonte Bw em Bt, pois com o aumento de energia da drenagem interna lateral acima do Bt, o que promoveria a instalação de fluxos superficiais erosivos pelo escoamento concentrado das águas pluviais, conduzindo à remoção continuada de matéria que aumentaria progressivamente o rebaixamento altimétrico nessa posição da vertente. Esta é uma feição do relevo capaz de ser identificada através de cartas topográficas (curvas de nível) e conseqüentemente nos modelos digitais do terreno, o que pode ser usada nos mapeamentos preditivos.

Ao analisar o comportamento hídrico de cobertura pedológica Latossolo Vermelho eutrófico - Argissolo Vermelho eutrófico, para estudos de prevenção e contenção dos processos erosivos no município de Cidade Gaúcha, noroeste do estado do Paraná (FIGURA 7), Cunha *et al.* (2008) mostraram que os horizontes superficiais exibem ao longo do tempo alternância de condições de umidade, ora mais úmidos, ora mais secos, devido à distribuição e à intensidade das chuvas.

---

<sup>2</sup> Cabe destacar que os Argissolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, ou seja, nem todos os Argissolos são constituídos por horizontes E (EMBRAPA, 2018).

FIGURA 7 – TOPOSSEQUÊNCIA COM PASSAGEM LATERAL LATOSSOLO-ARGISSOLO EM CIDADE GAÚCHA – PR

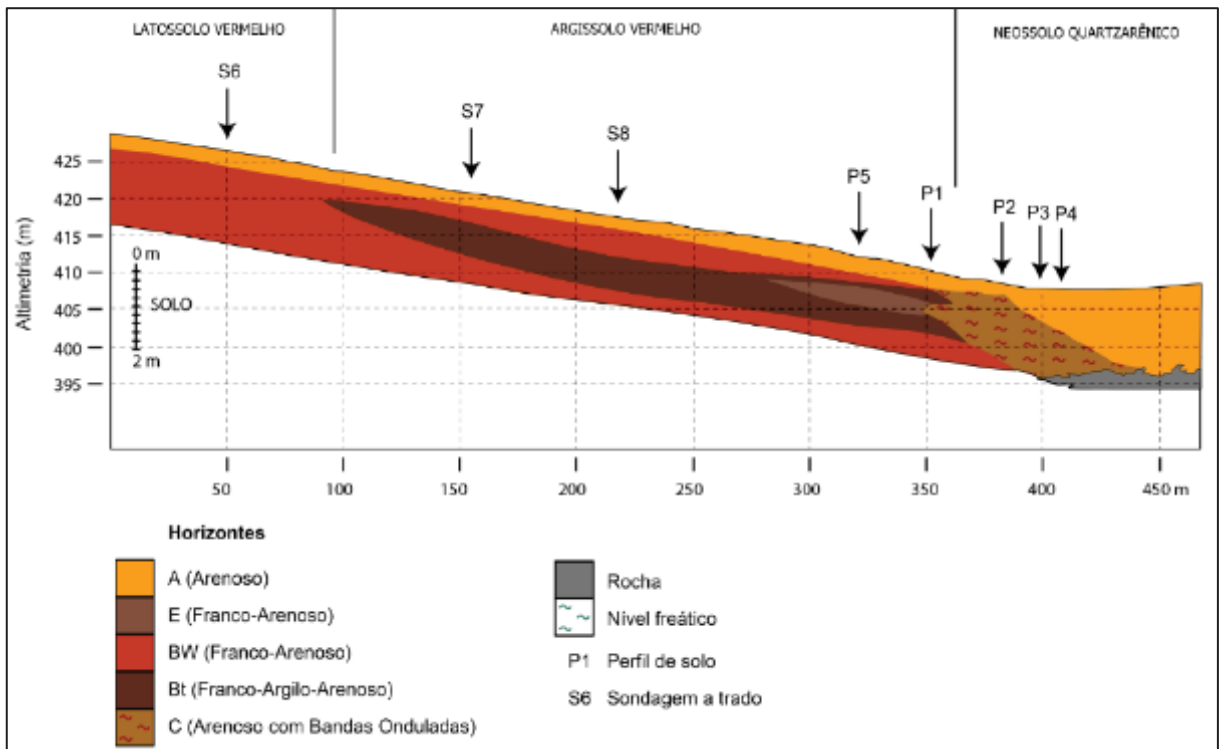


FONTE: CUNHA *et al.* (2008)

Esses autores notaram que em profundidade, no horizonte Bw, as condições hídricas dependem da movimentação da água vertical e lateral, não respondendo, portanto, diretamente às variações atmosféricas como na superfície. Na cobertura argissólica, o bloqueio da drenagem vertical ocorre no topo do Bt, gerando acima (horizonte AE) uma zona mais constantemente úmida. Por causa desse fator, as dinâmicas desses solos podem contribuir para a evolução morfopedológica atual da vertente, bem como para compreender em que medida e por que condicionam e dão início à instalação dos processos erosivos laminares.

Em uma topossequência no município de Tamboara, Terassi *et al.* (2014) apresentaram a variação da estabilidade dos agregados ao longo de uma vertente característica da região noroeste do Paraná (FIGURA 8). Eles concluíram que os Latossolos Vermelhos apresentam a melhor agregação e a maior resistência à erosão em detrimento a Argissolos e Neossolos. A descontinuidade textural entre os horizontes A, E e B textural do Argissolo Vermelho resultou em agregados de diferentes diâmetros, mostrando variação vertical e lateral importante da estabilidade e, conseqüentemente, da vulnerabilidade à erosão. Portanto, a natureza de tais solos associada à falta de técnicas adequadas de manejo explica a desestruturação dos agregados, o que aumenta a suscetibilidade dos solos à erosão hídrica e eólica.

FIGURA 8 – TOPOSEQUÊNCIA DO PLATÔ DE TAMBOARA



FONTE: TERASSI *et al.* (2014)

A partir das características gerais sobre a passagem lateral Latossolos-Argissolos, bem como dos trabalhos apresentados e, por fim, da caracterização pedológica da área de estudo, discorre-se brevemente a seguir sobre os diferentes sistemas pedológicos que ocorrem no noroeste paranaense.

### 2.2.1 Os sistemas pedológicos do noroeste do Paraná

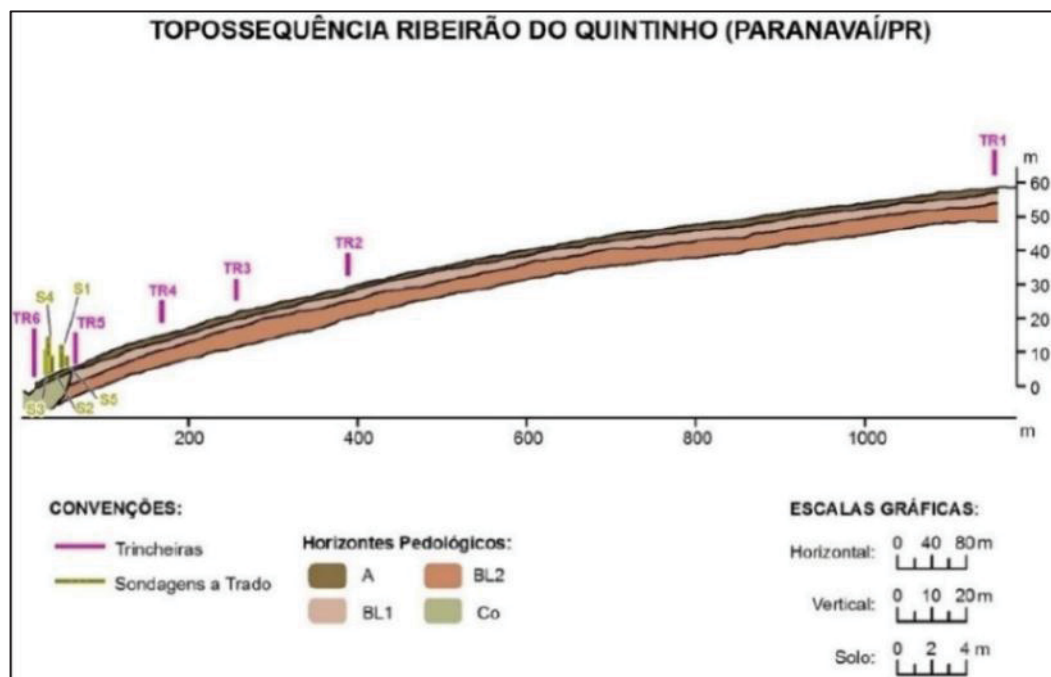
Conforme já exposto anteriormente, sobre as rochas areníticas do Grupo Caiuá na região noroeste do Paraná ocorrem sequências laterais de Latossolos-Argissolos. Essas duas classes de solos possuem ampla distribuição tanto em território nacional quanto paranaense. Os Latossolos ocupam no Brasil aproximadamente 30% da área tanto do Brasil quanto do Paraná, enquanto que os Argissolos representam 25% da sua área no Brasil e 15% no Paraná aproximadamente (LIMA *et al.*, 2012; EMBRAPA, 2018).

No noroeste paranaense os Latossolos se encontram frequentemente associados a relevo plano e com menor densidade de drenagem, enquanto os Argissolos estão associados a relevo ondulado com maiores declives e maior densidade de drenagem relevo desta região ser

uniforme e suave, com planaltos escalonados, inclinados levemente em direção ao vale do rio Paraná (NAKASHIMA, 1999; GASPARETTO *et al.*, 2001).

A partir do rio Ivaí, Nakashima (1999) identificou dois grandes setores caracterizado por ele de coberturas pedológicas das margens direita e esquerda. Na margem direita do rio Ivaí ocorre cobertura latossólica com suaves declividades do topo da vertente à base. Conforme ilustra a FIGURA 9 é possível observar uma topossequência que representa as vertentes na margem direita do rio Ivaí.

FIGURA 9 – TOPOSSEQUÊNCIA REPRESENTATIVA DOS SISTEMAS PEDOLÓGICOS DESENVOLVIDAS À MARGEM DIREITA (SETOR NORTE) DO RIO IVAÍ

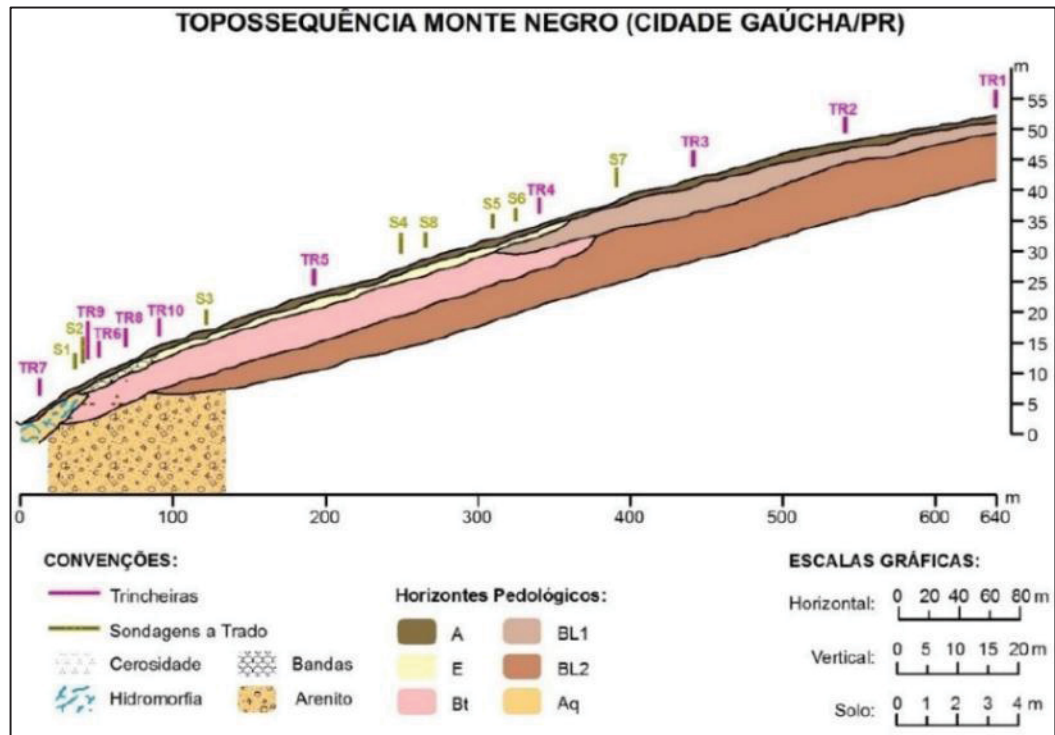


FONTE: NAKASHIMA (1999) e COUTO (2015)

LEGENDA: A simbologia “BL” (B Latossólico) representa o horizonte “BW”

Em contrapartida, na margem esquerda do rio Ivaí ocorrem rupturas de declives que são indícios de passagem lateral dos Latossolos-Argissolos. Comumente as rupturas se dão por um suave degrau, ocorrendo frequentemente no setor médio da vertente, marcando com frequência o aparecimento dos Argissolos (FIGURA 10).

FIGURA 10 – TOPOSSEQUÊNCIA REPRESENTATIVA DOS SISTEMAS MORFOPEDOLÓGICOS DESENVOLVIDAS À MARGEM ESQUERDA (SETOR SUL) DO RIO IVAÍ



FONTE: NAKASIMA (1999) e COUTO (2015)

LEGENDA: A simbologia “BL” (B Latossólico) representa o horizonte “BW” e “AQ” representa as areias quartzosas (Neossolos quartzarênicos)

A partir da FOTOGRAFIA 3 é possível fazer uma comparação entre esses dois setores da área de estudo. Nota-se as diferenças entre o tamanho das rampas e a declividade das mesmas. As fotografias correspondem aos municípios de Terra Rica-PR (setor norte) e Cruzeiro do Oeste (setor sul).

FOTOGRAFIA 3 – VERTENTES REPRESENTATIVAS DAS MARGENS DIREITA E ESQUERDA DO RIO IVAÍ

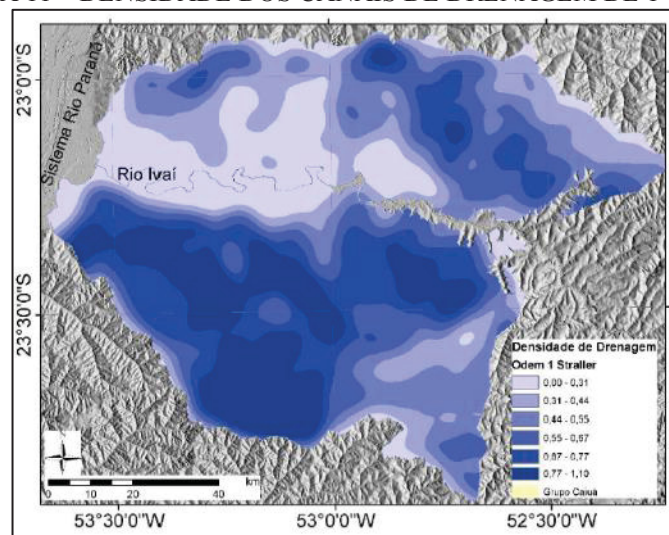


FONTE: Laboratório de Biogeografia e Solos (LABS) – 2015

A partir dessas evidências morfológicas relatadas anteriormente, Couto (2015) realizou uma espacialização da densidade de drenagem dos canais de 1ª ordem de (STRAHLER, 1952) conforme ilustra a FIGURA 11. Couto *et al.* (2018) destacam que a maior densidade desses canais indica uma retomada erosiva recente, já que representam os segmentos mais jovens da rede hidrográfica.

A análise da densidade de drenagem de 1ª ordem evidencia ainda a relação existente entre as características da hidrografia com a distribuição dos solos. Na margem direita do rio Ivaí, onde há predominância de Latossolos, a densidade de drenagem é menor que na esquerda, onde os Argissolos ocorrem com mais frequência na paisagem. Ainda é importante destacar que nessa margem do rio, os processos erosivos são mais acelerados, corroborando com os apontamentos de Nakashima (1999).

FIGURA 11 – DENSIDADE DOS CANAIS DE DRENAGEM DE 1ª ORDEM



FONTE: COUTO (2015)

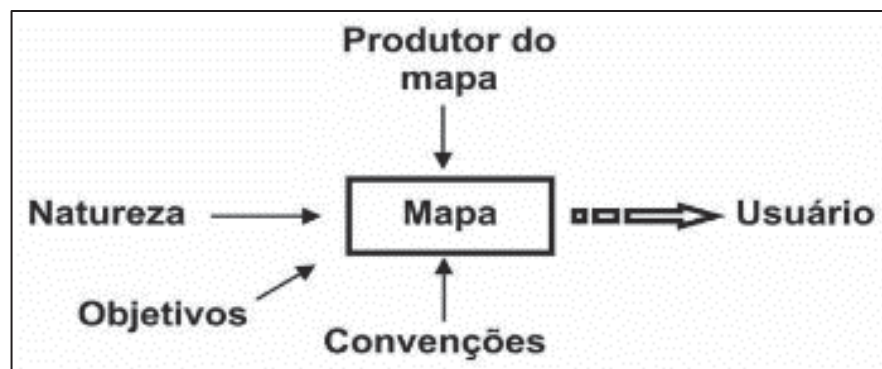
Após o conhecimento sobre os dois setores mencionados, Nakashima (1999) destaca que ocorrem na região do noroeste do Paraná seis compartimentos morfopedológicos, chamados por ele de sistemas pedológicos<sup>3</sup>, delimitados através da análise estrutural da cobertura pedológica (entendimento sobre dinâmica de água nas vertentes, transformações pedológicas e correlações com feições erosivas). Essa delimitação permitiu uma visão da distribuição desses seis sistemas e suas correlações com o relevo do noroeste e as feições erosivas.

<sup>3</sup> Uma breve caracterização desses seis sistemas está contida no item de caracterização da área de estudo, no capítulo de Materiais e Métodos.

### 2.3 MAPEAMENTOS PEDOLÓGICOS PREDITIVOS

Um mapa de solos é definido por Ten Caten (2008) como um documento bidimensional apresentado em papel ou outras formas, e representa a simplificação da organização espacial do solo nos ambientes naturais. O mapa disponível aos usuários é o resultado de quatro fatores (FIGURA 12): produtor do mapa; natureza; objetivos e convenções.

FIGURA 12 – OS QUATRO FATORES DE INTEGRAÇÃO EM UM MAPA



FONTE: LEGROS (2005) e TEN CATEN (2008)

No contexto da Pedologia, o mapa é uma transposição das características naturais relacionadas à geografia dos solos, sendo este um modelo reduzido, com simplificações de acordo com os seus objetivos. O produtor do mapa, nesse caso, o pedólogo, por meio de seus conhecimentos e experiência, utiliza-se das convenções para a representação cartográfica do solo. Dessa maneira, o mapa de solos é resultado de um procedimento verdadeiramente científico, resultado também de diversas observações em campo, já que o mapa se inicia no campo e deve retornar a ele na fase de validação e comprovação das hipóteses a respeito da relação solo-relevo (LEGROS, 2005; TEN CATEN, 2008).

Os métodos convencionais de levantamentos, caracterizações e mapeamentos de solos são por sua natureza qualitativos e com isso sofreram inúmeras críticas de diversos pesquisadores. Não obstante, esses levantamentos pedológicos convencionais são a forma mais comum de mapeamento e, em muitos casos, a única maneira pela qual as relações solo-relevo são documentadas. Os mapeamentos tradicionais são importante fonte de informações sobre a distribuição e caracterização dos solos e a maioria é elaborada a partir da observação no campo e do estabelecimento de relações entre os solos e as características gerais do relevo, como forma de vertente ou sua clinografia (TESKE, *et al.*, 2015).

Conforme destacam McBratney *et al.* (2003) e Silva *et al.* (2013), no mapeamento pedológico, tradicionalmente, são realizadas avaliações prévias da área a ser mapeada por fotointerpretação ou por outras técnicas que permitem determinar a sua fisiografia, com auxílio de outros dados do meio físico-biótico disponíveis, com intenso apoio de atividades de caracterização e coleta de solos em campo e de dados analíticos de laboratório. Esses autores ressaltam que os mapeamentos tradicionais sempre tiveram pequeno apoio de técnicas digitais, especialmente na sua representação cartográfica, seja pelo fato de não existir tecnologia disponível para tais procedimentos, ou mesmo pela indisponibilidade de ferramentas computacionais.

Estudos recentes têm mudado a abordagem tradicional de estudo dos recursos naturais, adotando modelos quantitativos, técnicas de predição espacial, determinação de precisão e de incertezas de atributos e integração de dados em sistema de informações geográficas (SIGs) (BRATNEY *et al.*, 2000; BÖNISCH, 2004, DALMOLIN; TEN CATEN, 2015).

De acordo com Warren (1990) *apud* Lohmann (2011) a predição tem um papel importante no método científico, pois quando um cientista descobre um padrão num conjunto de observações e consegue desenvolver uma hipótese, útil para explicar esse padrão, ela tem implicações preditivas para as observações futuras. As implicações podem ser testadas com dados novos ou independentes e se os dados novos estiverem de acordo com as predições, esse teste dará subsídio para a validação da hipótese. No método científico a predição é um mecanismo para testar as explicações.

Modelos quantitativos, usados em levantamentos pedológicos e que auxiliam na delimitação e na distribuição espacial dos solos, são categorizados em um ramo da ciência do solo conhecido como Pedometria<sup>4</sup> (WEBSTER, 1994; McBRATNEY *et al.*, 2000).

Samuel-Rosa (2013) relata que o termo tenta cobrir duas ideias principais: a primeira delas está relacionada à parte da mensuração (*metron*), sendo restrita aos métodos quantitativos matemáticos e estatísticos. A segunda delas está relacionada à parte do solo (*pedos*), correspondendo à disciplina da ciência do solo chamada Pedologia.

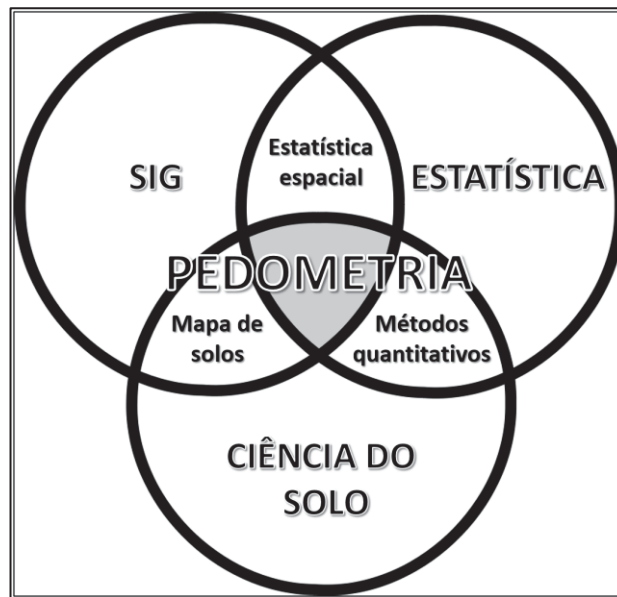
A Pedometria descreve o estudo quantitativo da variação do solo e pode ser entendida como a “aplicação de métodos matemáticos e estatísticos para a modelagem quantitativa dos solos, com o objetivo de analisar sua distribuição, propriedades e comportamentos” (SAMUEL-ROSA, 2013, p.3).

---

<sup>4</sup> Segundo Webster (1994), o conceito de Pedometria é formalmente definido como um neologismo derivado dos termos de origem grega *pedon* (solo) e *metron* (medida).

Esse ramo da Pedologia reúne muitos campos científicos do conhecimento, desde a geoestatística até a microbiologia do solo (HENGL, 2003). Seu domínio pode ser melhor definido pela interdisciplinaridade, envolvendo ciência do solo, estatística-matemática aplicada e ciência da geoinformação, no caso dos SIG's (FIGURA 13). Portanto, a Pedometria está relacionada à abordagem quantitativa, à qualidade das informações do solo no que se trata a sua variabilidade, à incerteza e confiabilidade (BURROUGHS *et al.*, 1994).

FIGURA 13 – PEDOMETRIA COMO UMA CIÊNCIA INTERDISCIPLINAR ONDE CIÊNCIA DO SOLO, ESTATÍSTICA APLICADA E GEOINFORMAÇÃO SE INTERCEPTAM



FONTE: Adaptado de HENGL (2003)

Segundo Bui (2004), a base teórica da Pedometria está relacionada aos fatores de formação de Jenny (Equação 1) - principalmente o relevo. Porém, alguns impasses começaram a se manifestar, sobretudo em relação a espacialidade dos dados pedológicos e dos fatores de formação. Avanços em teorias matemáticas, métodos estatísticos, sistemas remotos de aquisição de dados e informática, têm possibilitado o crescimento da Pedometria, ao ponto de McBratney *et al.* (2003) proporem uma nova abordagem para a equação de Jenny, levando em conta, portanto, a componente espacial. Segundo esses autores, as classes e atributos<sup>5</sup> do solo podem ser preditos a partir da equação chamada de SCORPAN (Equação 2), que é um acrônimo composto pelas primeiras letras de sete fatores interferindo no processo de predição:

$$Sc = f(s, c, o, r, p, a, n) \quad (2)$$

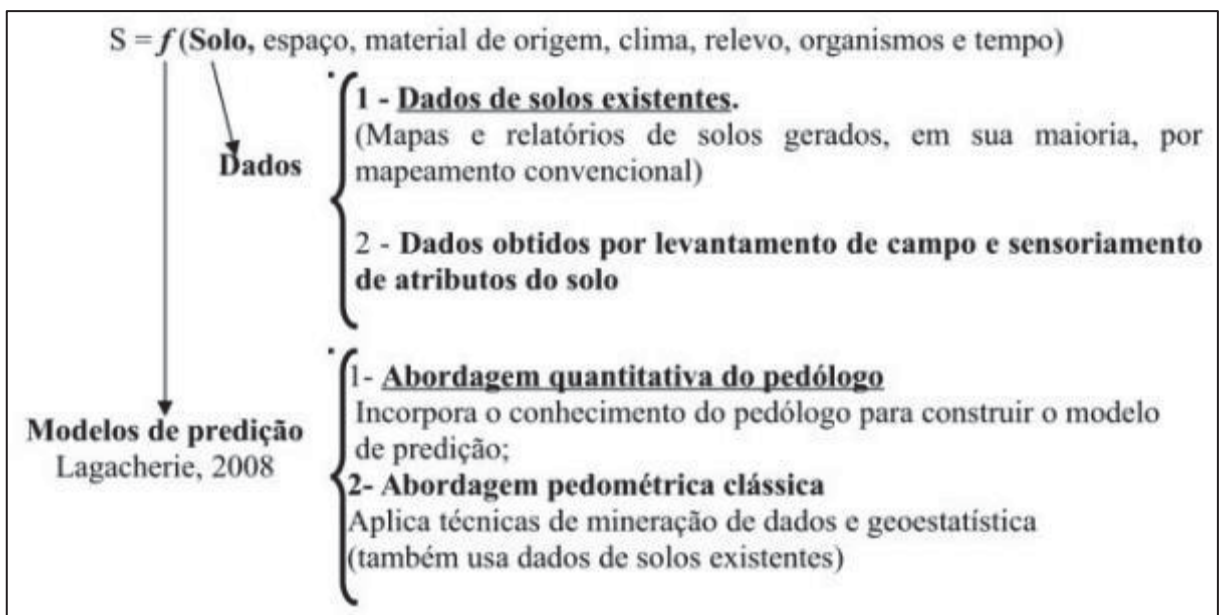
<sup>5</sup> Para McBratney (2003) é possível prever tanto a classe do solo (Sc) quanto algum atributo em específico, sendo usada, portanto, a sigla "Sa" para representá-lo.

onde:

Sc = classe do solo  
 f = modelos de predição  
 s = próprio solo  
 c = clima  
 o = organismos  
 r = relevo  
 p = material de origem  
 a = tempo  
 n = localização geográfica

Uma maneira de se visualizar a forma pela qual a interface entre o mapeamento convencional e o digital pode ser feita é através da contextualização no modelo SCORPAN (FIGURA 14). O conhecimento pode ser obtido através do uso direto dos dados de solos existentes e/ou diretamente com os pedólogos que desenvolveram atividades em uma determinada área de interesse (LAGACHERIE, 2008; CEDDIA, 2013).

FIGURA 14 – POSSIBILIDADES DE INTERFACE ENTRE O MAPEAMENTO CONVENCIONAL E O DIGITAL – MODELO SCORPAN



FONTE: CEDDIA (2013)

Dalmolin e Ten Caten, (2015) realçam que o objetivo da Pedometria é conseguir uma melhor compreensão do solo como um elemento do meio físico que varia ao longo de diferentes escalas no espaço e no tempo. Esse entendimento é importante tanto para a melhoria do manejo e para nosso conhecimento científico do solo e os sistemas (agrônômicos, ecológicos e hidrológicos) do qual o solo faz parte.

A partir do âmbito da Pedometria, surge o conceito de Mapeamento Digital de Solos (MDS). Dalmolin e Ten Caten, (2015) dissertam que

um importante tópicos de pesquisa da Pedometria é o desenvolvimento de modelos e ferramentas para verificar a variação espaço-temporal dos solos podendo ser aplicadas para integrar o mapeamento convencional do solo. Assim, o pedólogo passa a dispor de novas ferramentas as quais irão lhe possibilitar uma maior compreensão das relações solo-paisagem, além de lhe possibilitar um maior rendimento no mapeamento devido à capacidade de extrapolação dos modelos automatizados em ambiente de geoprocessamento criando-se nesse caso o conceito de MDS. Logo, verifica-se que a Pedologia passa por um processo de mudança de paradigma, onde que anteriormente, processos totalmente baseados no conhecimento tácito e em uma abordagem quantitativa, associam-se a metodologias e ferramentas baseadas em critérios quantitativos. O desafio para a Pedologia está na integração dessas abordagens, complementares, para a geração de informação espacial em solos (DALMOLIN; TEN CATEN, 2015, p.4).

McBratney *et al.* (2003) e Lagacherie (2008) entendem que o MDS é a criação de sistemas de informação espacial do solo e sua população de dados por modelos numéricos. Esses modelos inferem variações espaciais e temporais de classes, atributos (material orgânico, material mineral, atividade da fração argila, saturação por bases, etc.) e propriedades pedológicas (características morfológicas do solo como cor, textura, estrutura, consistência, etc.) a partir de observações de campo e variáveis do meio físico correlacionadas.

Para Ceddia (2013), o MDS surge no contexto de um período do tempo em que dispomos de várias ferramentas digitais e também do amadurecimento de pesquisas que tentam atingir os seguintes objetivos: produzir mapas acurados com menor intensidade de trabalho de campo, de tempo e de custo; melhor representação da variabilidade espacial; e apresentar o modelo de predição de forma que seja possível sua reprodução e avaliação por outros pesquisadores.

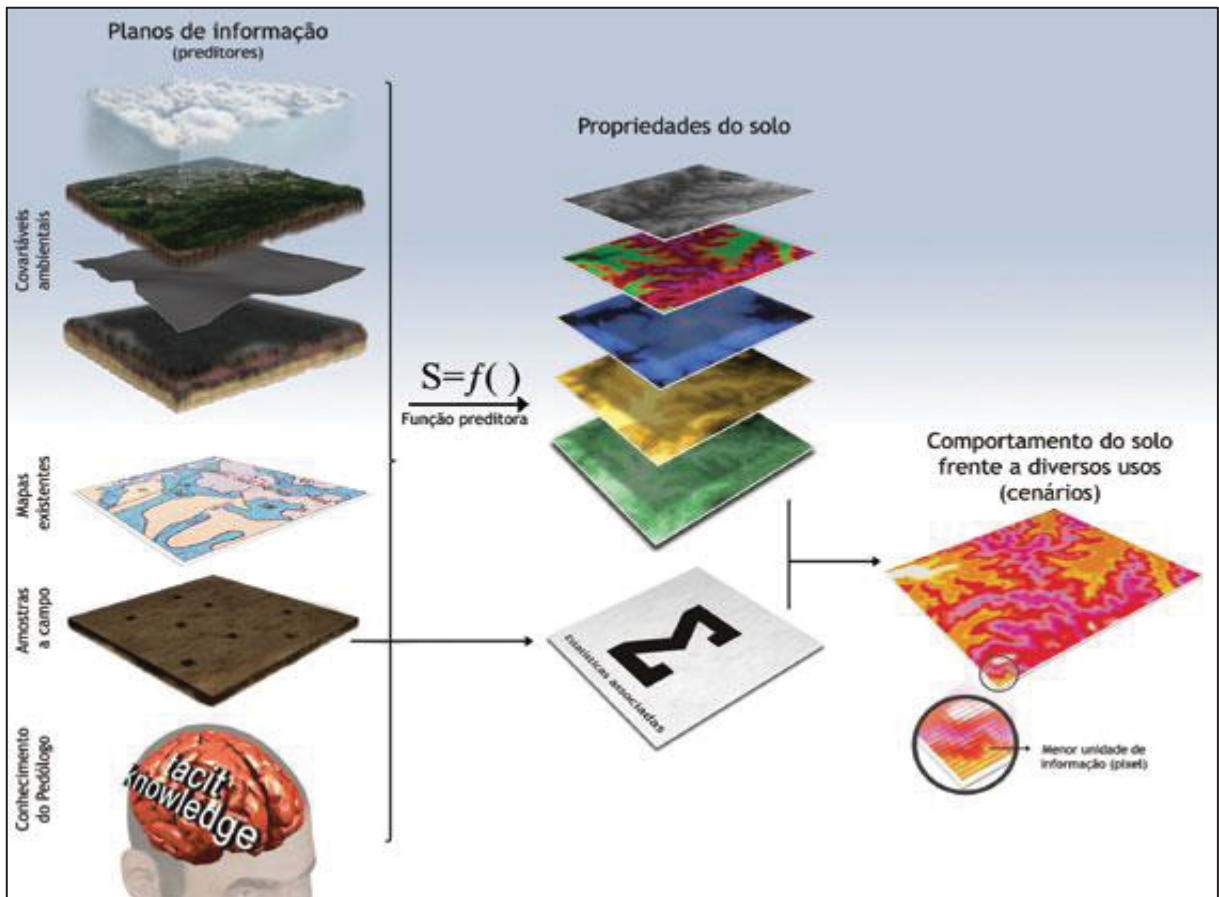
As técnicas do Mapeamento Digital de Solos, da mesma forma que as técnicas tradicionais, consistem no estabelecimento de relações do solo com a paisagem; porém, de maneira mais quantitativa em relação aos mapeamentos tradicionais. Para isso, utilizam-se modelos numéricos ou estatísticos para inferir as variações espaciais dos solos, a partir de mapas já existentes, de observações em campo ou de variáveis ambientais correlacionadas (TESKE, *et al.*, 2015).

Ceddia (2013) destaca que durante a geração dos mapas digitais, o pedólogo segue etapas similares ao mapeamento convencional. Os digitais se diferenciam na aplicação de ferramentas estatísticas e algoritmos matemáticos que visam automatizar e otimizar o procedimento amostral na explicitação do modelo de predição e sua estimativa de erro.

Esse autor ainda coloca que as etapas gerais do MDS são as seguintes: explorar e identificar de forma eficiente as relações entre as covariáveis ambientais (preditoras) e a variável a ser predita (classe ou atributo do solo); incorporar explicitamente, na forma de

equações ou regra de classificação, as relações entre as variáveis predictoras e atributos ou classes de solos; aplicar o modelo de predição e avaliar a acurácia do modelo através de campanhas de campo (validação); e por fim, a geração do mapa final e relatórios (FIGURA 15).

FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DE UM MAPEAMENTO DIGITAL DO SOLO



FONTE: TEN CATEN e QUOOS (2009)

Os mapeamentos digitais apresentam algumas vantagens em relação ao método tradicional para a separação de unidades de mapeamento pois são considerados alternativas rápidas e econômicas que podem ser aplicadas para a quantificação e classificação do relevo, permitindo a definição automática ou semi-automática das unidades de mapeamento (IPPOLITI *et al.*, 2005).

Um aspecto importante sobre aplicação do MDS é que o modelo de predição em si é na verdade um processo automático de classificação. Esse processo automatizado acelera sensivelmente a geração de mapas, sobretudo quando se trata de grandes áreas (CEDDIA, 2013).

A partir desses MDS, é possível realizar mapeamentos pedológicos em escalas de semidetalhe ou detalhe, mediante o estabelecimento de modelos de distribuição de solos na

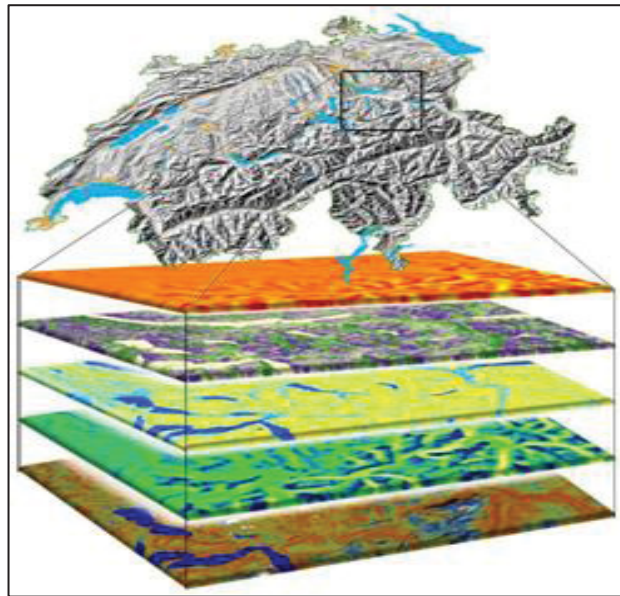
paisagem por meio de relações pedomorfológicas (LACERDA; BARBOSA, 2012). Por se basearem no desenvolvimento de modelos numéricos ou estatísticos a partir de relações entre variáveis geomorfológicas e pedológicas - os quais são aplicados a bancos de dados geográficos -, esses mapeamentos também podem ser chamados de preliminares ou preditivos (McBRATNEY *et al.*, 2000; HARTEMINK *et al.*, 2008; TEN CATEN *et al.*, 2011).

O mapeamento digital dos solos tem experimentado um rápido desenvolvimento de métodos novos e econômicos (pela atual acessibilidade de dados espaciais), devido, principalmente à crescente disponibilidade de mapas auxiliares, ou preliminares. Nessa perspectiva, dois grupos principais têm tido um papel importante na predição dos solos: a) as imagens de sensoriamento remoto orbital e b) os atributos do terreno derivados de modelos digitais de elevação (MDE) e dos modelos digitais do terreno (MDT) (DOBOS *et al.*, 2000, SIRTOLI, 2008; SILVEIRA, 2010).

Nesse sentido, a partir da inserção de técnicas computacionais nos estudos ambientais, por meio do Geoprocessamento e do SIG, a Pedologia pôde se beneficiar com a criação de uma grande quantidade de dados digitais e ferramentas computacionais, como aqueles fornecidos pelos modelos digitais (McBRATNEY *et al.*, 2003).

Segundo Coelho e Giasson (2010), o Mapeamento Digital de Solos se baseia na geração de sistemas de informações que permitem estabelecer relações matemáticas entre variáveis ambientais (atributos topográficos) e classes de solos e, assim, predizer a distribuição espacial dessas classes com significativa semelhança aos mapas gerados por meios convencionais. Com os MDS, é possível estabelecer diversas relações entre os atributos topográficos (AT) provenientes de um MDT (FIGURA 16) com os compartimentos pedológicos de forma a aplicá-las no mapeamento preliminar de solos.

FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PROVENIENTES DE UM MDT



FONTE: WSL (2013)

A parametrização da morfologia do relevo por meio de SIG é o processo de extração de atributos quantitativos da topografia de um MDT (HENGL, 2003). Esse processo pode ser designado de diversas maneiras: análise do terreno (*terrain analysis*), geomorfologia quantitativa (*quantitative geomorphology*) ou modelagem digital do terreno (*digital terrain modelling*). A geomorfometria (*geomorphometry*) descreve de forma quantitativa as formas da superfície da Terra por meio de equações aplicadas a modelos numéricos de representação altimétrica. A partir dos MDTs é que se derivam os atributos topográficos (MUÑOZ, 2009; SILVEIRA, 2010).

Os atributos derivados de MDT são denominados, portanto, como atributos topográficos, atributos do terreno (ou de relevo); também são identificados na literatura como variáveis geomorfométricas ou morfométricas. Esses atributos podem ser parametrizados a partir de variáveis, tais como hipsometria, clinografia, aspecto, plano e perfil de curvatura, área contribuição, índice topográfico de umidade, índice de capacidade de transporte de sedimentos, entre outros (MOORE *et al.*, 1993; WILSON; GALLANT, 2000; McBRATNEY *et al.*, 2003; IPPOLITI *et al.*, 2005; CHAGAS, 2006; SIRTOLI, 2008; MUÑOZ, 2009; TEN CATEN *et al.*, 2009; TEN CATEN *et al.*, 2010; SILVEIRA, 2010; SAMUEL-ROSA, 2012, SAMUEL-ROSA, 2016).

Esses atributos também podem ser utilizados como variáveis auxiliares na predição espacial dos padrões solo-relevo e contribuem para o aperfeiçoamento no mapeamento não só de classes, mas também de algumas propriedades do solo, como espessura de horizontes,

elementos na solução do solo, textura, cor, umidade, entre outras (SHARY *et al.*, 2002, PINHEIRO *et al.*, 2012).

O uso de MDTs na compreensão e identificação da distribuição dos solos contribui, como importante ferramenta, para delimitação de unidades preliminares de mapeamento dos solos, utilizadas no suporte aos trabalhos de levantamentos de solos na fase de campo e como apoio à cartografia pedológica. Sua importância está relacionada à necessidade de introduzir na pesquisa cartográfica dos solos elementos que possam auxiliar os procedimentos básicos de delimitação das unidades, permitindo a redução da subjetividade nessa tarefa (NANNI e ROCHA, 1997).

A grande vantagem do mapeamento digital de solos apontada por Coelho (2010) é a possibilidade de utilizar a modelagem para extrapolar os limites para áreas adjacentes ao mapa utilizado como referência, partindo da premissa de que são áreas de mesma fisiografia, resultando em ganho de informações para áreas que não tinham informação alguma de classes de solos.

Conforme destaca Lagacherie *et al.* (2001), o método da Área de Referência (AR) é fundamentado na hipótese de que a região subjacente a uma área de referência inclua todas, ou a maioria das classes de solos da área. Isto significa que esta região deve possuir um número finito de classes de solos distintas ou em associações, de modo que a maior parte delas possa ser encontrada dentro da área de referência. Neste mesmo sentido, Hudson (1992) coloca que pode ser realizado um agrupamento de solos por meio da identificação de características resultantes do cruzamento dos atributos do relevo, pois se pressupõe que na região com características semelhantes onde há configuração de relevo semelhante, os solos que ali ocorrem também são similares.

Essa extrapolação é possível uma vez que a utilização das relações solo-relevo se refere à aplicação das formas do relevo para predizer as variações transversais do solo na paisagem, pois: (a) dentro de uma unidade solo-relevo ocorre interação entre os cinco fatores de formação em diferentes magnitudes, resultando em diferentes tipos de solos; (b) os solos dentro de uma mesma unidade solo-paisagem são mais similares quando comparados a solos em outras unidades; (c) áreas com as formas do relevo semelhantes, também apresentaram associação de solos com características similares; (d) áreas adjacentes de diferentes unidades solo paisagem apresentam relações espaciais; (e) uma vez que as quantidades de solos e as unidades de paisagem são determinadas na área, o tipo de solo pode ser inferido pela identificação das unidades solo-paisagem (HUDSON, 1992; FELIX DA SILVA, 2016).

Em relação ao uso de dados primários por meio do uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) pode-se citar os modelos oriundos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Porém, esses modelos digitais podem apresentar erros, atribuídos a ruídos na aquisição e transferência dos dados, e à geometria da órbita. Desse modo, a avaliação da qualidade de modelos de elevação é uma importante fase no Mapeamento Digital de Solos, em razão da relação direta entre a variabilidade dos atributos do terreno e a pedogênese condicionada pelo fluxo das águas, temperatura, vegetação e remoção e deposição de material (JARVIS *et al.*, 2004; PINHEIRO *et al.*, 2012).

É crescente a demanda por modelos de elevação e atributos morfométricos derivados para representação contínua do terreno em formato digital, largamente usada em análise da paisagem e em outras aplicações. No entanto, pouca atenção tem sido empregada na padronização dos procedimentos para obtenção e avaliação da qualidade na representação das variáveis morfométricas derivadas bem como os métodos de integração entre as variáveis (SHARY *et al.*, 2002, PINHEIRO *et al.*, 2012).

Para estabelecer as relações quantitativas entre os atributos do modelo, diversos métodos têm sido desenvolvidos, considerando dados digitais e modelos de estatística clássica, geoestatística ou a combinação das duas, evidenciando a relação da paisagem e das classes pedológicas. A escolha e a aplicação da técnica dependem da finalidade, resolução e configuração da pesquisa e o uso final das informações geradas. Esses aspectos também determinarão a precisão do modelo. Portanto, uma técnica ou método não pode ser aplicado a qualquer situação sem a prévia consideração das necessidades específicas do levantamento e da adequação dos pressupostos inerentes à própria metodologia (McBRATNEY *et al.*, 2000; LIMA *et al.*, 2013).

Lima *et al.* (2013) apontam que existem diversas técnicas comuns em mapeamento digital de solo (integração de variáveis geomorfométricas por modelos de predição<sup>6</sup>), dentre elas: Geoestatística, Regressão Linear Múltipla, Regressão Logística, Pesos de Evidência, Árvore de Decisão/Classificação, Redes Neurais e Lógica Fuzzy, entre outras.

Uma dessas outras técnicas de integração de atributos topográficos utilizada em mapeamentos preliminares de solos é o de álgebra de mapas (álgebra de campos, ou ainda tabulação cruzada) e pode ser visto como uma extensão da álgebra tradicional, com um conjunto

---

<sup>6</sup> Conforme destaca Ten Caten *et al.* (2009) esses modelos de predição se enquadram na função preditora “*f*” presente na equação 2 (SCORPAN).

de operadores, onde as variáveis manipuladas são campos geográficos (BERRY, 1993; TOMLIN, 1994).

O termo álgebra de mapas foi consagrado pelo livro *Geographic Information System and Cartographic Modeling* (TOMLIN, 1990). Este autor apresentou os mapas como elementos que associam um valor quantitativo (escalar, ordinal, cardinal ou intervalar) ou qualitativo (nominal) para cada local de uma área de estudo. Neste método ainda é possível realizar operações matemáticas entre esses elementos de acordo com o conhecimento tácito do pesquisador na tomada de decisões (TOMLIN 1990, 1994).

Diversos trabalhos envolvendo a espacialização de classes de solos no estado do Paraná foram realizados aplicando o método da álgebra de mapas, dentre eles podemos citar Silveira (2010), Silveira *et al.* (2012), Nowatzki e Santos (2014), Oliveira *et al.* (2015; 2017) e Nowatzki *et al.* (2017; 2018).

Uma outra técnica estatística que tem sido aplicada, mesmo que ainda de forma incipiente no mapeamento pedológico preditivo é o de regressão logística múltipla multinomial. Essa técnica tem como objetivo produzir, a partir de um conjunto de observações, um modelo que permita a predição de valores tomados por uma variável categórica<sup>7</sup>, a partir de uma série de variáveis explicativas<sup>8</sup> (MOURÃO-JUNIOR, 2007).

Esse modelo foi avaliado e gerado resultados satisfatórios na espacialização das classes de solos em trabalhos como Bailey *et al.* (2003), Hengl *et al.* (2007), Figueiredo *et al.* (2008), Giasson *et al.* (2008), Debella-Gilo e Etzelmuller (2009), Kempen *et al.* (2009), Ten Caten *et al.* (2011) e Souza (2013), Souza *et al.* (2016) e Nascimento *et al.* (2017).

No Brasil, constatou-se o uso de RLM em estudos de mapeamentos de solos semidetalhados realizados por Giasson *et al.* (2006; 2008) e Figueiredo *et al.* (2008). Percebe-se, portanto, que o número de trabalhos é pequeno e existe ainda uma grande lacuna no conhecimento para a aplicação dessas técnicas de modelagem linear generalizada (TEN CATEN, 2011).

Por ser utilizada mais que uma variável explicativa<sup>9</sup>, o modelo é considerado múltiplo e, pelo fato de poder predizer mais que duas classes, é considerado multinomial (ou politômico);

---

<sup>7</sup> Variável categórica compreende uma variável estatística qualitativa cuja categoria identifique o agrupamento da classe (ou de grupo). No caso dos MDS essas variáveis podem ser entendidas como variável resposta ou ainda variável dependente, tendo em vista que o resultado final deste tipo de mapeamento são classes ou atributos de solo.

<sup>8</sup> Variável explicativa (independente) pode ser entendido como aquela usada como preditora e potencial variável de explicação da variável categórica.

<sup>9</sup> Modelos de regressão que utilizam apenas uma variável explicativa são conhecidos como regressões simples.

logo, o modelo é denominado de regressão logística múltipla multinomial, que é uma generalização do modelo logístico simples (COELHO; GIASSON, 2010; TEN CATEN, 2011b).

Ten Caten *et al.* (2011) assumem que os MDS trabalham na perspectiva de prever ou extrapolar as informações a respeito da distribuição espacial do solo e para casos em que o resultado de uma inferência pode ser dado sob muitas categorias ou politômica (classes de solo), uma alternativa é trabalhar com modelos logísticos.

No caso das regressões logísticas múltiplas podem ser aplicadas em casos quando o resultado da inferência pode ocorrer sob muitas categorias, sendo a melhor alternativa a de trabalhar com a probabilidade de ocorrência de cada uma das categorias. Essas regressões permitem avaliar essa probabilidade de uma variável, considerando os valores das diversas variáveis independentes que podem ser qualitativas ou quantitativas, categóricas ou contínuas (HENGL et al., 2007; COELHO, 2010; LIMA *et al.*, 2013).

Nesse mesmo sentido, as regressões logísticas não têm qualquer exigência para sua aplicação no que diz respeito à distribuição das variáveis explicativas, não havendo necessidade de ter distribuição normal, correlação linear, medidas em mesma escala ou homogeneidade de variância. As variáveis explicativas podem ser, ainda, uma mistura de dados contínuos, discretos ou binários, como os atributos topográficos (CHATTERJEE; HADI, 2006; TEN CATEN *et al.*, 2011).

Alguns autores expõem as desvantagens apresentadas pelas regressões logísticas como sensibilidade à proporção relativa entre classes de solos no conjunto de treinamento dos modelos (TEN CATEN *et al.*, 2011b) e uma relativa complexidade para a interpretação dos parâmetros estatísticos dos modelos logísticos gerados (KEMPEN *et al.*, 2009).

Após realizada a etapa de predição pedológica, para que qualquer mapa digital produzido tenha confiabilidade, sua validação em campo é necessária, identificando-se e coletando-se o solo de forma a representar corretamente suas unidades de mapeamento. Por permitirem a sistematização das observações, a exemplo da densidade de amostragem e assim poderem ser associados à escala do mapeamento, transectos de pontos de amostragem, também usados na execução de levantamentos de solos tradicionais, podem ser aplicados para validação dos mapeamentos preditivos (SILVA *et al.*, 2013).

Assim como o levantamento pedológico, o MDS faz uso de informações coletadas em campo ou disponíveis em pontos de observação de solos oriundos de mapeamentos pedológicos preexistentes. Essas informações são utilizadas para ajustar o modelo quantitativo pois contém variáveis relativas às condições da distribuição dos solos do local. Por fim, o modelo ajustado

é empregado para prever propriedades do solo ou classes de solos para o restante da área (LAGACHERIE, 2008).

Lagacherie (2008) adverte ainda que um conjunto de dados cartográficos e topográficos de qualidade é um fator chave para efetivar o MDS preciso e avaliar a qualidade dos seus resultados. Por fim, ele conclui argumentando que a disponibilidade desses dados tem sido um fator limitante que pode severamente frear os avanços dos mapeamentos digitais de solos.

Desse modo, Ceddia (2013) aponta que como qualquer método, o MDS também tem desvantagens ou críticas, tais como: não disseminar protocolo de condução dos trabalhos de mapeamento digital; exigir de demasiado conhecimento de estatística e domínio de software; basicamente, a maioria dos modelos de predição gerados serem predominantemente dependentes de poucas covariáveis, sobretudo derivadas do relevo e de imagens de satélite; a limitação na disponibilidade de covariáveis em mesma resolução espacial implicar que os algoritmos classificadores apresentem menor capacidade de discretização de classes de solos em mapas mais detalhados.

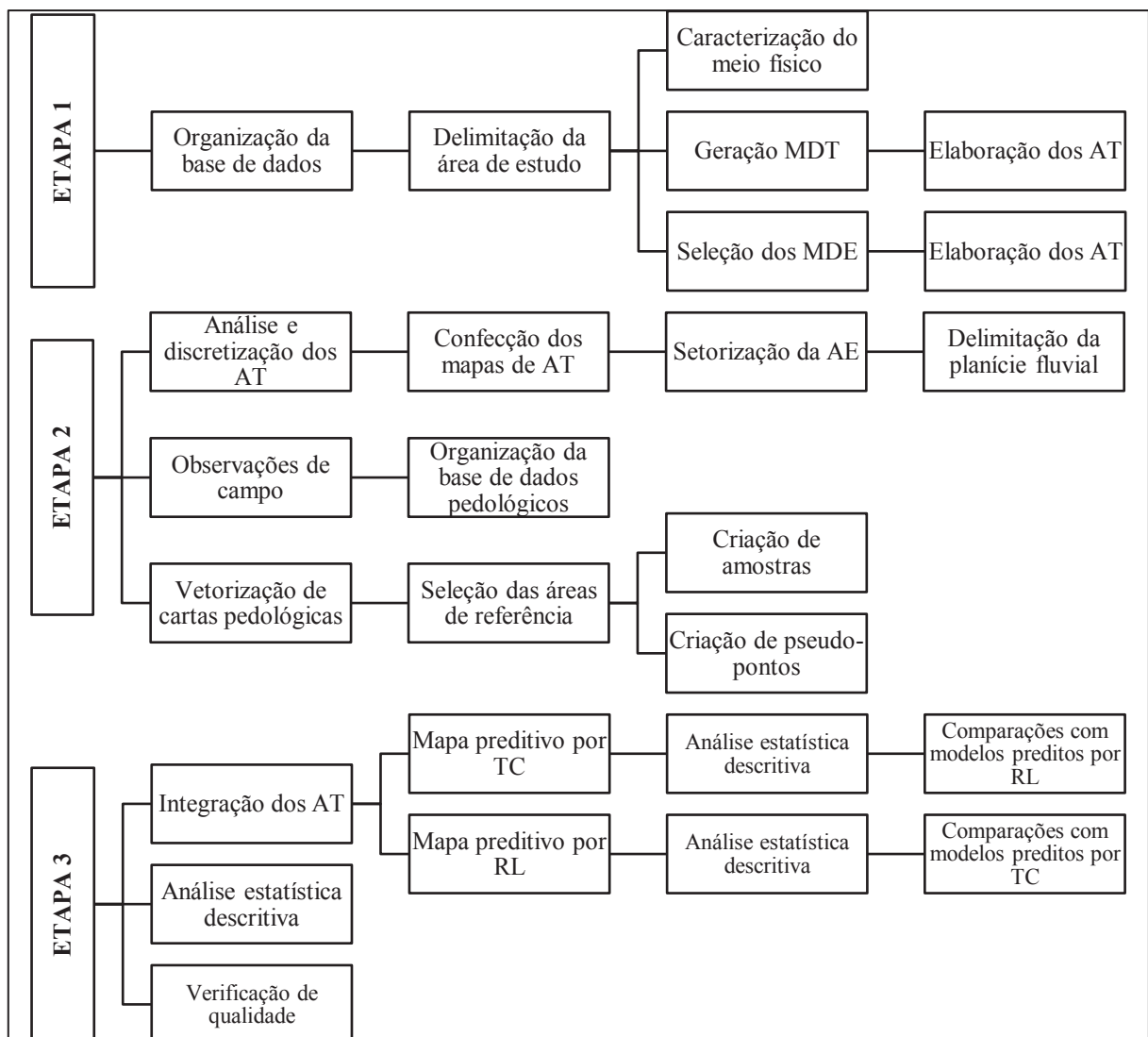
Dentro da perspectiva de todos os trabalhos citados neste capítulo, pretendeu-se tomar as suas análises, experiências e considerações acerca dos métodos escolhidos que são utilizados nos mapeamentos digitais de solos, a fim de que os métodos escolhidos para a realização do mapeamento proposto nesta pesquisa fossem coerentes e que pudesse chegar em resultados satisfatórios de acordo com os objetivos propostos.

O capítulo seguinte se refere ao detalhamento dos métodos utilizados nesta pesquisa, levando em consideração a organização da base de dados, geração dos modelos digitais, elaboração e integração de atributos topográficos e comparações com mapas preexistentes.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para cumprir com todos os objetivos propostos neste trabalho, os procedimentos metodológicos foram divididos em três etapas principais, conforme ilustra o fluxograma da FIGURA 17. No Apêndice A também está contido um quadro síntese com as principais referências bibliográficas deste capítulo.

FIGURA 17 – FLUXOGRAMA METODOLÓGICO SIMPLIFICADO



A primeira etapa consistiu na organização dos dados imprescindíveis para gerar o MDT e a elaboração dos atributos topográficos; a segunda se caracterizou pelas análises dos atributos, bem como pela organização dos dados pedológicos usados nas discretizações dos AT. A etapa final compreendeu as integrações dos AT necessários para o mapeamento preditivo final de solos.

#### 4.1 ORGANIZAÇÃO DA BASE DE DADOS CARTOGRÁFICOS E GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO

A base de dados planialtimétricos utilizadas neste trabalho foram disponibilizadas pelo Instituto de Terras Cartografia e Geociências (ITCG) na escala 1:50.000 e os referentes a hidrografia, pelo Instituto das Águas do Paraná. Essas bases passaram por análises de erros e correção no Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias (LAGEO) da UFPR. A organização desses dados foi realizada conforme o Sistema Geodésico de Referência vigente, o SIRGAS 2000 (QUADRO 2).

QUADRO 2 – CRITÉRIOS ADOTADOS NA PADRONIZAÇÃO DOS DADOS CARTOGRÁFICOS.

ELEMENTOS CARTOGRÁFICOS	CRITÉRIOS
Limite espacial	Baixo curso da bacia hidrográfica do rio Ivaí
Projeção cartográfica	Sistema Universal Transversa de Mercator
Fuso	22 - Sul - Meridiano Central: 51°
<i>Datum</i> horizontal	SIRGAS 2000
<i>Datum</i> vertical	Imbituba – SC

A partir da base de dados levantada, o Modelo Digital do Terreno (MDT) foi gerado através do *software* ArcGIS 10.3, desenvolvido pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), com a ferramenta *Topo to Raster* disponível no módulo *Spatial Analyst Tools*. Essa ferramenta se baseia no método de interpolação denominado Topogrid proposto por Hutchinson (1989).

Esse método foi projetado a partir do programa ANUDEM (*Australian National University Digital Elevation Model*) (HUTCHINSON, 1989), baseado em um algoritmo determinístico (drenagem forçada) que possibilita criar um modelo que simule um livre escoamento superficial, estabelecendo, portanto, modelos topográficos hidrologicamente consistentes (SILVA *et al.*, 2017).

##### 4.1.1 Definição do tamanho do pixel

A etapa de definição da resolução horizontal (tamanho do pixel) do MDT foi pautada nas contribuições de Hengl (2006) sob duas perspectivas: cartográfica, considerando a escala original da base de dados, e topográfica, considerando as características morfométricas locais e a complexidade do terreno (formas do relevo).

Assim sendo, a resolução ideal do MDT foi calculada pela relação entre a área de estudo (AE) e as curvas de nível, através da Equação (3), proposta por Hengl (2006):

$$p \leq \frac{A}{2 \cdot \sum l} \quad (3)$$

onde:

$p$  = tamanho do pixel

$A$  = área total

$\sum l$  = ao somatório do comprimento das curvas de nível da delimitação da AE

Aplicando essa equação para a AE<sup>10</sup>, chegou-se no valor de 144,05 como a resolução máxima para a geração do MDT (tamanho máximo do pixel), ou seja, o maior valor tolerável de acordo com as características do terreno em questão.

Com a finalidade de precisar a adoção do tamanho do pixel em função das porções do terreno que apresentam maior rugosidade, Hengl (2006), por meio do mesmo cálculo, recomenda que seja realizado um recorte que represente 5% da área total (Equação 4), sendo este recorte representativo da área de estudo ao conter a maior concentração de curvas de nível.

$$p \geq \frac{A(5\%)}{2 \cdot \sum l(5\%)} \quad (4)$$

Após a realização desse cálculo, foi constatado que a maior resolução espacial possível (tamanho máximo do pixel) seria de  $p \geq 17,97$  metros.

Silveira (2015) sugere que, considerando o relevo, a escolha para o tamanho do pixel deve ser feita entre os resultados das resoluções máxima (maior valor tolerável) e mínima (menor valor tolerável). Assim sendo, para o MDT desta tese foi escolhido o tamanho de célula matricial (*raster* ou *grid*) de 20x20 metros (MDT 20, ou M20), pois está entre a resolução máxima (144,0 m) e a mínima (17,9 m), além do fato de 20 metros ser o valor da equidistância das curvas de nível da base de dados.

## 4.2 MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Para a aplicação dos Modelos Digitais de Elevação (MDE), levou-se em consideração a diferença conceitual dos mesmos para os MDTs. De acordo com El-Sheimy *et al.* (2005) e

---

<sup>10</sup> Os valores desse cálculo para a área de estudo são de  $A = 9.601.338.979,11 \text{ m}^2$  e 33326890,65 metros para o  $\sum l$ . Assim sendo,  $2 \cdot \sum l = 66.653.781,30 \text{ m}$ . Logo, ao efetuar a Equação (3), chegou-se ao resultado de 144,05 metros como valor máximo ideal para o tamanho do pixel.

Silveira e Silveira (2016b) os MDTs se referem aos valores altimétricos do terreno desconsiderando quaisquer objetos na superfície (como árvores ou construções). Já os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) se referem aos valores altimétricos contemplando também objetos existentes na superfície.

Os dois MDEs selecionados para este trabalho foram cedidos pelo Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias (LAGEO) da UFPR e compreendem:

a) MDE SRTM90 (MDE 90, ou M90), banda C, versão 4, criado por diversos pós-processamentos (como MDEs auxiliares e técnicas de interpolação) tendo como referência as versões prévias dos dados SRTM e disponibilizado pelo *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI) dos Estados Unidos da América. Sua resolução espacial é de aproximadamente 90 metros.

b) MDE SRTM30<sup>11</sup> (MDE 30, ou M30), banda C, versão 1, que contempla as mesmas características de aquisição do SRTM90-v2, mas possui resolução de 1 arco de segundo (aproximadamente 30 metros, na área de estudo).

#### 4.3 ELABORAÇÃO DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

As diferentes variáveis passíveis de extração automática em SIG podem dar suporte à classificação multivariada da paisagem, fornecendo segmentação da mesma em ambientes topográficos homogêneos. A geração e difusão de algoritmos para mapeamento automático de atributos topográficos representa uma necessidade estratégica para a operacionalização de análises digitais adequadas às relações entre fatores topográficos diversos (VALERIANO; CARVALHO JUNIOR, 2003).

Os mecanismos principais de atuação na dinâmica do relevo dizem respeito à distribuição dos processos hidrológicos e erosivos do solo. Assumindo o desenvolvimento de solos como resposta a estes efeitos, é possível relacionar atributos pedológicos a variáveis topográficas (MOORE *et al.*, 1993; VALERIANO; CARVALHO JUNIOR, 2003).

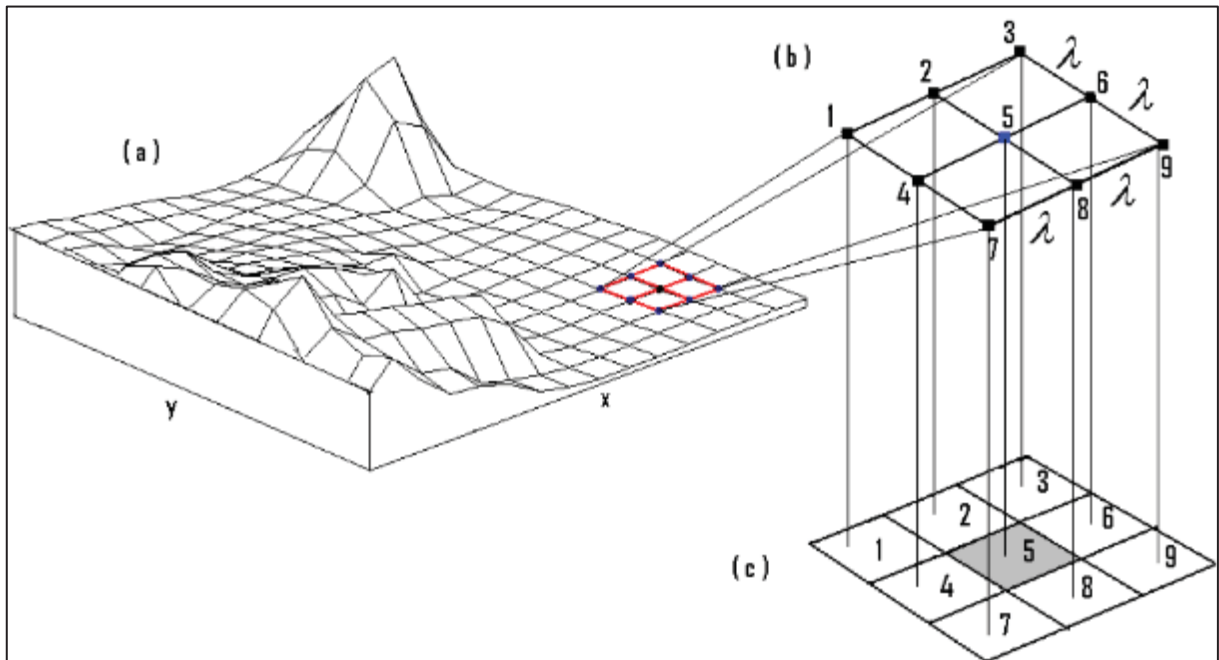
Para a elaboração dos atributos topográficos (AT), foram utilizados os *softwares* ArcGIS™ 10.3 e o SAGA GIS™ 5.0.0 (*System for Automated Geoscientific Analyses*) que foi desenvolvido no departamento de Geografia Física da Universidade de Göttingen na Alemanha.

---

<sup>11</sup> Até o final de 2014 essa versão era disponibilizada apenas para o território estadunidense, sendo vendida comercialmente para as demais regiões do planeta. Desde então esses dados foram liberados gratuitamente para o restante do mundo e disponibilizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS).

As operações usadas para elaborar os atributos topográficos foram executadas por meio de uma janela com nove nodos, conforme ilustra a FIGURA 18. Esse método consiste em calcular os parâmetros de uma célula central e seus vizinhos em uma janela de oito células que se deslocam 3x3, cujo objetivo dessa operação é obter o cálculo dos atributos topográficos (McBRATNEY *et al.*, 2003; SILVEIRA, 2010; NOWATZKI; SANTOS, 2014).

FIGURA 18 – MÉTODO DA JANELA DE NOVE NODOS



FONTE: SILVEIRA (2010)

LEGENDA: (a) Grade regular da superfície do solo; (b) Janela com nove nodos; (c) Janela com nove pixels.

Assim, é executada uma varredura com essa janela, sobre o conjunto total de dados (FIGURA 18-a) que representam a área estudada. Observa-se na FIGURA 18-b que a largura, ou espaçamento, da grade é de  $\lambda$  metros e na FIGURA 18-c é ilustrada a representação da grade na forma matricial, isto é, cada ponto da grade é transformado em um pixel. Cada pixel possui valor correspondente à elevação do ponto e uma largura de  $\lambda$  metros (SILVEIRA, 2010). Deste modo os atributos topográficos primários e secundários puderam ser definidos usando um pixel de resolução de 20 metros.

Partindo dessas informações, calculou-se os atributos topográficos primários, ou seja, aqueles derivados diretamente do modelo do terreno (MDT), como hipsometria, declividade, perfil e plano de curvatura. Esses foram calculados a partir de uma janela móvel 3x3 pixels (FIGURA 19), cujos algoritmos contemplam a análise de vizinhança (WILSON; GALLANT, 2000; McBRATNEY *et al.*, 2003; SILVEIRA 2010; NOWATZKI, 2013; SILVEIRA 2015).

FIGURA 19 – JANELA DE VIZINHANÇA 3X3

$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$
$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$

Os atributos topográficos secundários são as variáveis que envolvem a combinação de variáveis primárias (geralmente índices geomorfométricos), como o Índice de Corrente de Máximo Fluxo, o Índice de Umidade e o Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos (MOORE *et al.*, 1993, McBRATNEY *et al.*, 2003; SILVEIRA *et al.*, 2013, NOWATZKI; SANTOS, 2014).

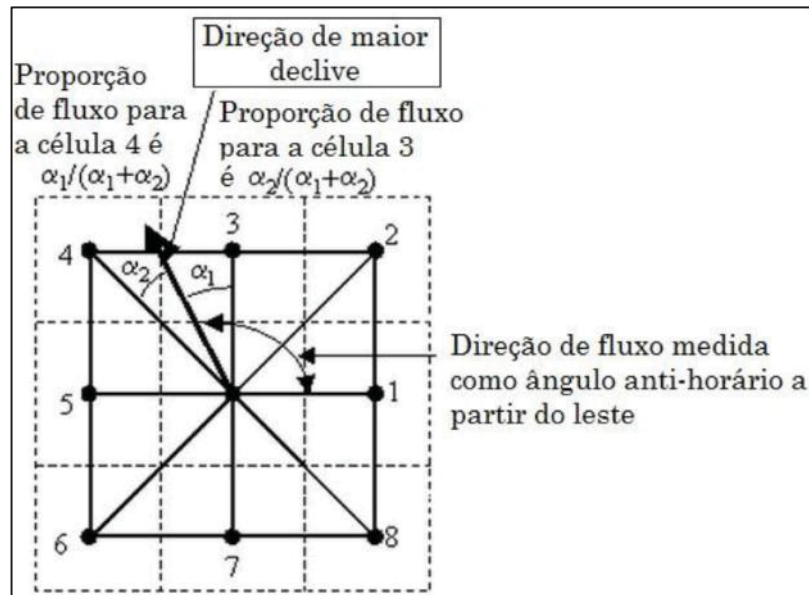
Para a elaboração desses atributos, levou-se em conta o conceito de área de contribuição (AC) (MOORE *et al.*, 1993, McBRATNEY *et al.*, 2003; RAMOS *et al.*, 2003; SILVEIRA *et al.*, 2013, NOWATZKI; SANTOS, 2014; SILVEIRA, 2015). Silveira (2015) destaca que a área de contribuição<sup>12</sup> é obtida pela contribuição do fluxo à montante de cada pixel somado às contribuições do entorno mais elevado, conforme ângulo da direção de fluxo. Assim, o fluxo de cada um dos pixels drena para algum de seus vizinhos, tendo esse valor somado ao seu. Portanto, pixels com acumulação de fluxo igual a zero são geralmente os localizados nos divisores de água.

Para o desenvolvimento deste trabalho, a AC foi quantificada pelo método denominado D-infinito, ( $D_\infty$  ou *Deterministic Infinity*) (FIGURA 20), que se apoia no algoritmo proposto por Tarboton (1997). A ferramenta utilizada no SAGA foi a *flow accumulation (top-down)*, na qual permite você escolher o método manualmente<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Pode aparecer na literatura pelo termo “acumulação de fluxo” (SILVEIRA, 2015), tendo em vista que essa acumulação é a assinatura recebida pelo pixel com o número de pixels que fluem para esta.

<sup>13</sup> A partir do SAGA é possível escolher na ferramenta *flow accumulation* os seguintes métodos: *Deterministic 8 (D8)*, *Rho 8*, *Braunschweiger Reliefmodell*, *Deterministic Infinity ( $D_\infty$ )*, *Multiple Flow Direction*, *Triangular Multiple Flow Direction* e *Multiple Flow Direction based on Maximum Downslope Gradient*.

FIGURA 20 – MÉTODO D-INFINITO PARA CÁLCULO DA DIREÇÃO DE FLUXO



FONTE: SILVEIRA (2015)

Nesse método, o ângulo de direção do fluxo é determinado como a direção mais íngreme considerando as oito facetas triangulares contado no sentido horário a partir do leste, formadas em uma janela de 3x3 pixels. Esse método permite ângulos contínuos de fluxo e o particionamento da direção entre duas ou mais células vizinhas (TARBOTON, 1997; SILVEIRA, 2015).

Assim sendo, os atributos topográficos selecionados<sup>14</sup> para compor as predições desta tese são as seguintes: hipsometria, clinografia, índice de posição topográfica, índice de rugosidade do terreno, índice topográfico de umidade modificado e plano de curvatura.

#### 4.3.1 Hipsometria (HPM)

A hipsometria (HPM) (*elevation*) é o atributo primário que permite a análise da variação altimétrica do relevo a partir das informações planimétricas e altimétricas presentes (SIRTOLI, 2008; NOWATZKI, 2013).

Esse atributo topográfico também é encontrado na literatura simplesmente com o nome de “elevação”, pois a hipsometria é o MDT propriamente dito (VALERIANO, 2003; SIRTOLI,

<sup>14</sup> Foram gerados outros atributos topográficos como índice de corrente de máximo fluxo, índice de capacidade de transporte de sedimentos, perfil de curvatura, entre outros, mas pelo fato do relevo ser plano ou suavemente ondulado em sua maior parte na área de estudo, esses atributos apresentaram pouca ou nenhuma correlação com as características dos solos presentes nas unidades de mapeamento propostas nesta tese, assim sendo, não foram contempladas nas interpolações.

2008, SILVEIRA, 2010). Assim sendo, essa variável é entendida por Valeriano (2003) como derivação de ordem zero do MDE.

A separação de variáveis discretas (discretização) dos valores hipsométricos levou em conta agrupamentos de curvas de nível, as quais representam a variação da altitude, de acordo com os valores apresentados no histograma das classes.

#### 4.3.2 Clinografia (CLN)

Com o intuito de realizar uma fidedigna predição da distribuição dos solos do noroeste do Paraná, foi utilizado o atributo topográfico primário clinografia<sup>15</sup> (CLN) (*slope*) (MOORE, *et al.*, 1993; NOWATZKI; SANTOS, 2014). Construído a partir da análise das distâncias entre curvas de nível, esse atributo representa, de forma contínua, a inclinação e as formas do relevo (DE BIASI, 1992; SANTOS, 2004; SANTOS 2015).

A clinografia foi determinada por duas diferenças finitas locais do MDT, nas direções x e y da janela 3x3 (FIGURA 19), calculado pelas Equações 5 e 6 (HORN, 1981; SILVEIRA *et al.* 2012; SILVEIRA, 2015).

$$f_x = \frac{[(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)]}{8L} \quad (5)$$

$$f_y = \frac{[(z_1 + 2z_2 + z_3) - (z_7 + 2z_8 + z_9)]}{8L} \quad (6)$$

onde:

$f_x$  = gradiente Leste-Oeste da janela 3x3

$f_y$  = gradiente Norte-Sul da janela 3x3

L = espaçamento da grade regular (20 metros)

A partir desses valores, a clinografia pode ser calculada tanto em graus quanto em porcentagem. A Equação (5) em graus é a seguinte:

$$\beta = \arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (5)$$

onde:

$\beta$  = inclinação local do terreno em graus

$f_x^2$  e  $f_y^2$  = aproximações das diferenças finitas por meio das derivadas parciais  $f_x$  e  $f_y$ , nas direções de x e y.

<sup>15</sup> O termo clinografia pode ser utilizado em alguns trabalhos como sinônimo de declividade. No entanto, Santos (2015) destaca que declividade e aclividade são termos que dependem do ponto de vista do observador. Usa-se declividade para porções da superfície topográfica que desce em relação ao observador, ao contrário de aclividade que representa as porções que sobem em relação ao observador. Dessa maneira pretendeu-se utilizar o termo Clinografia, que define a representação destas variações dos ângulos da superfície.

Para a representação da declividade em porcentagem ( $\alpha$ ), foi aplicada a Equação (6) aos valores em graus de  $\beta$ :

$$\alpha = \tan\beta \cdot (100) \quad (6)$$

#### 4.3.3 Índice de posição topográfica (IPT)

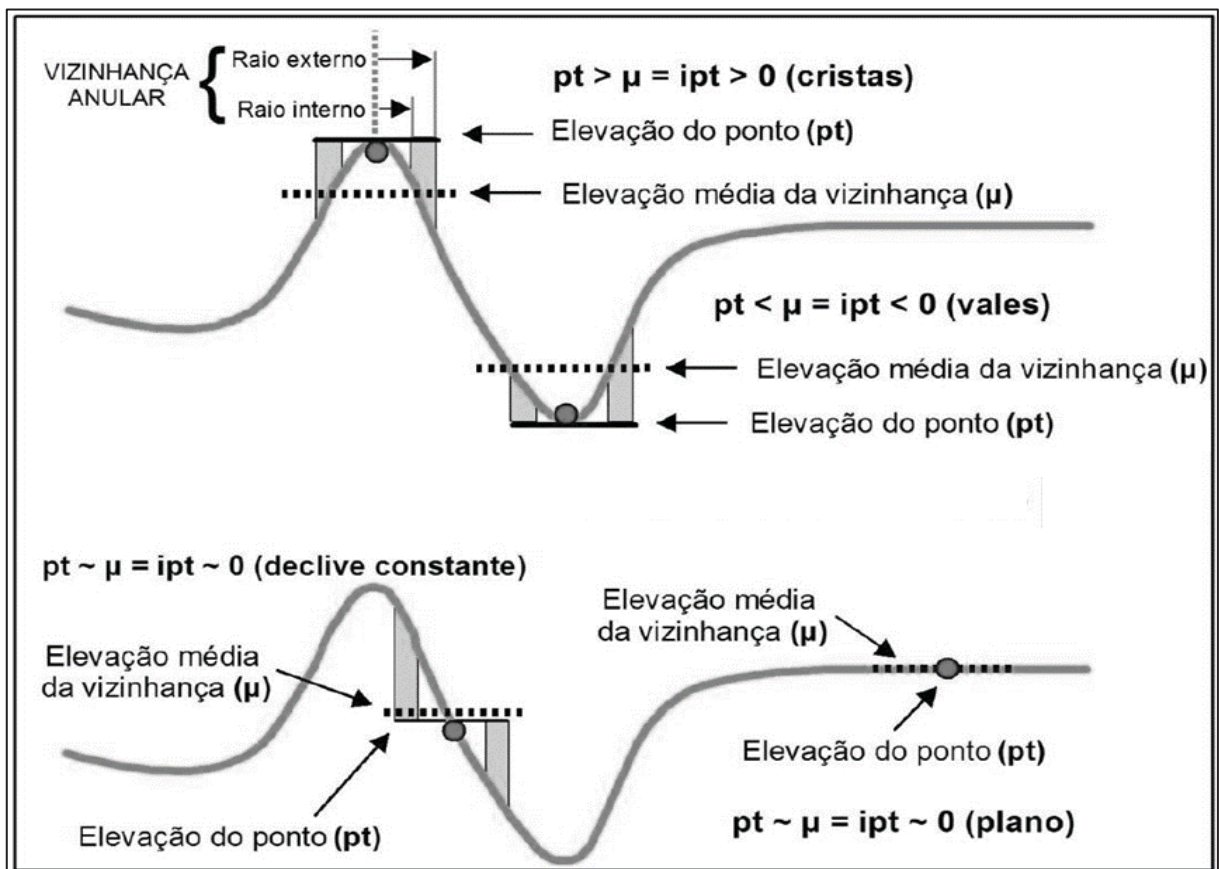
O Índice de Posição Topográfica (IPT) proposto por Weiss (2001) é um atributo topográfico derivado de um algoritmo que mensura a diferença entre a elevação do ponto central e a média da elevação ao seu redor (vizinhança) com um raio predeterminado (R), conforme a Equação (7) e FIGURA 21:

$$IPT = pt - \mu \quad (7)$$

onde:

$pt$  = ponto central  
 $\mu$  = média da elevação.

FIGURA 21 – O ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA (IPT)

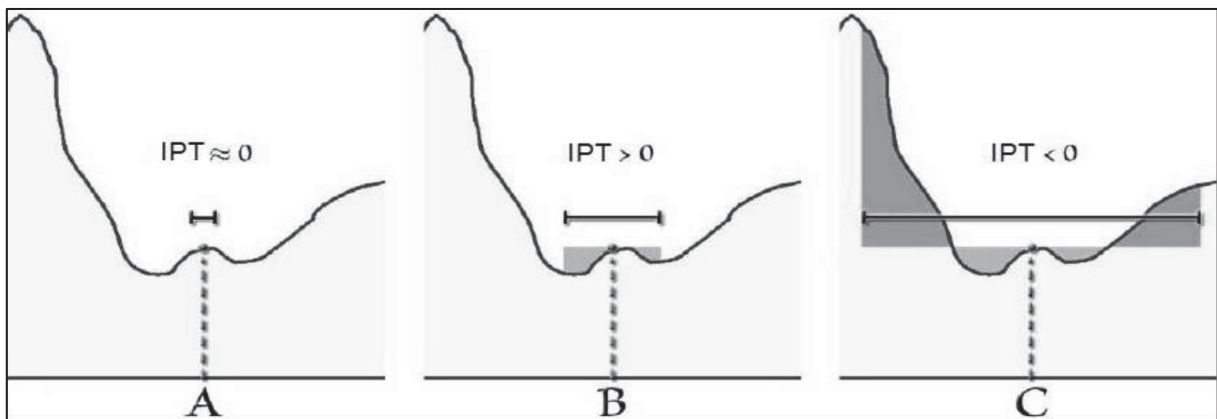


FONTE: Adaptado de SILVEIRA e SILVEIRA (2016)

Para Silveira e Silveira (2014), a análise de vizinhança pode ser feita por uma janela circular (empregada neste trabalho com o valor de  $R= 50$  pixels), anular (proposta original), retangular ou irregular. Esse procedimento metodológico foi realizado a partir da ferramenta *Focal Statistics*, presente também no módulo *Spatial Analyst tools* do software ArcGIS 10.3 (ESRI, 2009).

Silveira (2015) destaca que os valores positivos obtidos pelo IPT representam locais que são mais elevados que a média do seu entorno, caracterizando, em geral, os divisores topográficos. Já os valores negativos representam os locais mais rebaixados em relação à sua vizinhança, caracterizando vales ou depressões. Os valores próximos a zero obtidos pelo IPT representam as superfícies de declive constante. A FIGURA 22 ilustra a diferença entre os valores encontrados no IPT, conforme o tamanho do raio predeterminado.

FIGURA 22 – RELAÇÃO ENTRE O VALOR DO IPT COM O TAMANHO DO RAIO ADOTADO

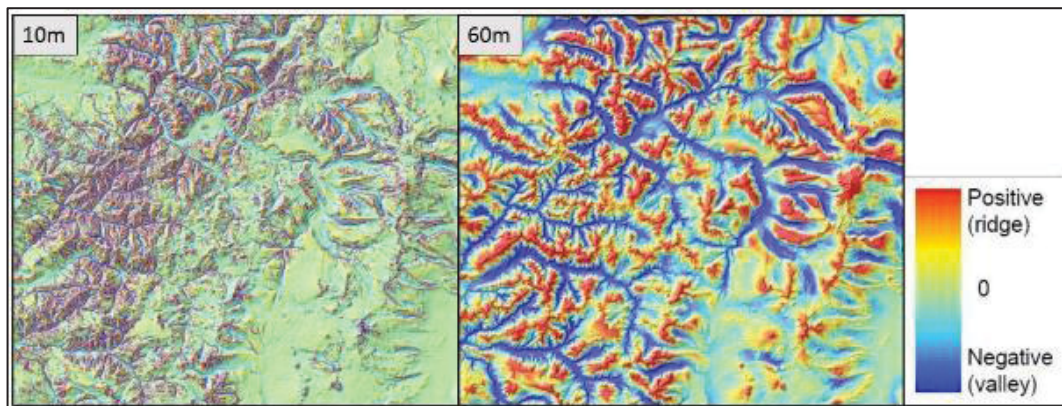


FONTE: WEISS (2001)

Como o IPT é diretamente afetado pelo fator de escala, os valores resultantes do índice (e, conseqüentemente, as classificações derivadas) variam de acordo com os valores de raio adotados. A etapa de definição do raio de análise da vizinhança, portanto, deve estar associada às características físicas da área de estudo e ao nível de detalhe pretendido pelo pesquisador (DE REU *et al.*, 2013; SILVEIRA; SILVEIRA, 2014; SILVEIRA, 2015).

A FIGURA 23 ilustra o quanto o valor de raio pode influenciar no resultado do produto final pois quanto maior o raio de análise de vizinhança, mais generalizado será o produto.

FIGURA 23 – DIFERENÇAS ENTRE O TAMANHO DO RAIO DE ANÁLISE DE VIZINHANÇA DO IPT



FONTE: WEISS (2001)

De acordo com Weiss (2001) e Silveira e Silveira (2014), a discretização dos valores contínuos do IPT para a determinação de classes morfológicas pode ser feita considerando os valores de desvio padrão (DP). É considerado, portanto, a segmentação com valores de IPT de uma única matriz resultante. Dessa forma, propõem-se 6 classes, conforme QUADRO 3.

QUADRO 3 – DISCRETIZAÇÃO DOS VALORES CONTÍNUOS DO IPT

POSIÇÃO TOPOGRÁFICA	PARÂMETROS
Cristas	$>1DP$
Vertentes superiores	$>0,5$ e $\leq 1DP$
Vertentes intermediárias	$> -0,5$ e $< -0,5DP$ ; declividade $< 5$ graus
Áreas planas	$\geq -0,5$ e $\leq -0,5DP$ ; declividade $\geq 5$ graus
Vertentes inferiores	$\geq -1$ e $< 0,5DP$
Vales	$< -1DP$

FONTE: WEISS (2001)

#### 4.3.4 Índice de rugosidade do terreno (IRG)

O índice de rugosidade em ambiente digital foi elaborado pela primeira vez por Hobson (1972, *apud* SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014) e baseia-se no uso da variabilidade declividade para representar as formas de relevo.

Esse índice é obtido a partir da razão entre área superficial (irregularidade da superfície) e a área planar (superfície reduzida ao plano), sendo as informações obtidas por meio de técnicas de levantamento em campo, ou a partir de dados no formato digital. A aplicação desse parâmetro morfométrico permite analisar pontualmente a rugosidade do relevo em uma dada unidade de área e possui relação direta com a declividade do mesmo (RILEY *et*

*al.*, 1999; SAMPAIO, 2008; SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014; FUMIYA *et al.*, 2016; RÓŻYCKA *et al.*, 2016).

Esse índice foi gerado no *software* SAGA 5.0.0 através da ferramenta *Terrain Roughness Index* (índice de rugosidade do terreno, ou IRG) que calcula a diferença média da elevação entre o pixel central e os oito pixels circundantes (FIGURA 19), ou seja, a partir da elevação do pixel central, pela qual o valor do IRG é calculado, subtraem-se os valores da vizinhança.

As diferenças resultantes são multiplicadas por elas mesmos, somadas e elevadas ao quadrado novamente, conforme a Equação (8) (RILEY *et al.*, 1999; RÓŻYCKA *et al.*, 2016).

$$IRG = (\sum(Zc - Zi)^2)^2 \quad (8)$$

onde:

$Zc$  = elevação do pixel central

$Zi$  = elevação de uma das oito células vizinhas ( $i = 1, 2, \dots, 8$ )

Rózycka *et al.* (2016) destacam que o algoritmo computacional do IRG é bastante sensível a diferenças locais de elevação, e portanto, a presença de regiões de declives maiores acaba aumentando o valor médio deste índice.

Assim como no IPT, foi usada a ferramenta *Focal Statistics* para uma melhor representação dos solos a serem preditos neste trabalho (usando um raio de 15 pixels para os três modelos usados neste trabalho). Esta ferramenta faz uma análise da vizinhança do pixel, generalizando os seus valores conforme as características do entorno, buscando assim porções homogêneas a serem representadas.

#### 4.3.5 Índice topográfico de umidade modificado (ITM)

O índice topográfico de umidade (ITU) é usado para caracterizar a distribuição espacial de zonas de saturação superficial e conteúdo de água nas paisagens (MOORE *et al.*, 1993; WILSON; GALLANT (2000); SIEFERT; SANTOS, 2012 SILVEIRA *et al.* 2013; NOWATZKI; SANTOS, 2014; HUNG *et al.* (2017).

Para Moore *et al.* (1993), esse índice tem a potencialidade de demonstrar os efeitos do relevo na localização e extensão das áreas de acumulação de água. Nesse sentido, Silveira (2010) afirma que o ITU tem excelente aplicação para a separação dos solos hidromórficos, que ocorrem em relevo plano, de outras classes de solos que ocorrem em área com relevos mais

ondulados. Sirtoli (2008) destaca que esse índice é definido como uma função da declividade e da área de contribuição por unidade de largura ortogonal à direção do fluxo.

Em estudo pioneiro realizado em uma topossequência no Colorado, Moore *et al.* (1993) verificaram que o índice topográfico de umidade e a clinografia foram os atributos do relevo que mais se correlacionaram com os atributos medidos no solo. Tal índice é obtido conforme a Equação (9), presente em Wilson e Gallant (2000).

$$ITU = \ln \frac{AC}{\tan \beta} \quad (9)$$

onde:

AC = área de contribuição  
 $\beta$  = clinografia

Silveira (2010) destaca que essa equação mostra que o ITU é uma função apenas da declividade e varia com as funções tangentes e logaritmo natural (ln). Assim, esse índice está sujeito à seguinte restrição:  $0^\circ < \beta < 90^\circ$ . Analisando a equação, percebe-se que quando a declividade se aproxima de  $0^\circ$ , o limite dessa função tende para infinito e, quando declividade se aproxima de  $90^\circ$ , o limite tende para zero. O significado físico desse comportamento é que quanto mais plano for o relevo, mais úmido (alto valor de umidade) o solo apresenta. Essa característica do índice de umidade possibilita a identificação de solos hidromórficos (SILVEIRA, 2010).

Entretanto, Böhner e Selige (2006) propuseram uma modificação na área de contribuição. Eles assumiram que existe um limite superior para as áreas de contribuição, ou seja, para cada valor de declividade é determinado uma área de contribuição máxima. Desse modo, valores maiores que esses limites são homogeneizados, principalmente em áreas aplainadas de fundo de vale, cujo o objetivo é minimizar a existência de valores aleatórios e fora do padrão em áreas mais planas (HUNG *et al.*, 2017).

Assim, para melhor representação dos solos hidromórficos da área de estudo, optou-se por usar a ferramenta *SAGA Wetness Index* presente dentro do *software* SAGA 5.0.0, que representa o índice topográfico de umidade modificado (ITM) (BÖHNER; SELIGE, 2006; HUNG *et al.*, 2017). Essa ferramenta usa princípios semelhantes que o ITU, com a diferença que é baseada no cálculo de área de contribuição modificada (ACM). Böhner e Selige (2006) expressam esse índice pela seguinte Equação (10):

$$ITM = \ln \frac{ACM}{\tan \beta} \quad (10)$$

onde:

ACM = área de contribuição modificada  
 $\beta$  = clinografia

Para a realização do cálculo do ITM, Böhner e Selige (2006) apontam que é preciso determinar antes a área de contribuição modificada (ACM), que é caracterizada pela seguinte equação empírica (Equação 11):

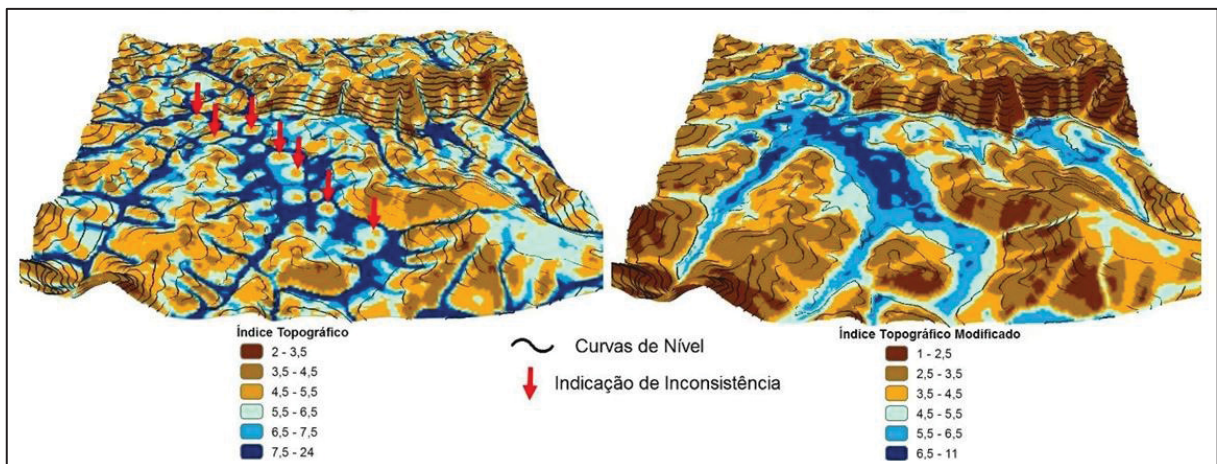
$$ACM = AC_{max} \left( \frac{1}{15} \right)^{\beta \exp(15\beta)} \quad (11)$$

onde:

$AC_{max}$  = área de contribuição máxima para cada valor de declividade.

Tanto no trabalho de Böhner e Selige (2006) quanto no de Hung *et al.* (2017) foi comparado o ITU com o ITM e ambos evidenciam que o ITM representa as áreas planas de forma mais próxima da realidade. Hung *et al.* (2017) destaca que, em áreas de planície fluvial e em alguns locais da rede de drenagem, o ITU apresentou áreas com inconsistências nos vales e zonas ripárias. O autor notou que áreas de planície fluvial não deveriam apresentar superfícies com baixos valores de ITU, uma vez que se tratam de áreas mais planas com as menores declividades e grandes áreas de contribuição à montante. Já para o ITM, Hung *et al.* (2017) observou que este não apresenta os mesmos problemas de inconsistência, pois nota-se que, nas áreas de planície fluvial e nos canais de drenagem, o ITM representou melhor as áreas com maior umidade, sem a presença de discontinuidades e inconsistências (FIGURA 24).

FIGURA 24 – COMPARAÇÃO ENTRE O ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE E O ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE MODIFICADO



FONTE: Adaptado de HUNG *et al.* (2017)

A diferença entre os dois índices é justificada pelo cálculo da área de contribuição modificada, pois a equação utilizada no ITU gera uma representação apropriada para relevos mais acidentados, porém, em áreas muito planas, esse cálculo produz pequenas diferenças de altitude que podem gerar escoamentos fora das características das áreas planas (BÖHNER; SELIGE, 2006; HUNG *et al.*, 2017).

#### 4.3.6 Plano de curvatura (PLA)

O último atributo topográfico utilizado é o Plano de Curvatura (PLA), na qual pode ser usada para identificar áreas de diferentes regimes de umidade, permitindo uma avaliação mais acurada da distribuição dos solos na paisagem pois separa áreas divergentes/convergentes dos fluxos de matéria sobre o terreno quando analisado em projeção horizontal (VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003; SILVEIRA, 2010).

Para o plano<sup>16</sup> de curvatura, denominados na literatura como curvatura horizontal ou curvatura em planta (SILVEIRA, 2015), também foram calculados a partir da vizinhança 3x3, conforme variáveis direcionais de Zevenbergen e Thorne (1987) presentes na Equação 12:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + l \quad (12)$$

sendo que:

$$A = \frac{\left[ \frac{(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)}{4} - \frac{(Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)}{2} + Z_5 \right]}{L^4}$$

$$B = \frac{\left[ \frac{(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)}{4} - \frac{(Z_2 - Z_8)}{2} \right]}{L^3}$$

$$C = \frac{\left[ \frac{(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)}{4} - \frac{(Z_4 - Z_6)}{2} \right]}{L^3}$$

$$D = \frac{\left[ \frac{(Z_4 + Z_6)}{2} - Z_5 \right]}{L^2}$$

$$E = \frac{\left[ \frac{(Z_2 + Z_8)}{2} - Z_5 \right]}{L^2}$$

<sup>16</sup> O perfil de curvatura não foi usado neste trabalho pois não apresentou uma relação direta com as duas unidades de mapeamento em questão.

$$F = \frac{(-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)}{4L^2}$$

$$G = \frac{(-Z_4 + Z_6)}{2L}$$

$$H = \frac{(Z_2 - Z_8)}{2L}$$

onde:

$$l = Z_5$$

L = tamanho do *pixel*

Com base nesse polinômio, o plano de curvatura é calculado conforme a Equação 13:

$$PLA = \left( \frac{H^2D - GHF + G^2E}{G^2 + H^2} \right) \quad (13)$$

Para uma melhor precisão do mapeamento preditivo de solos deste trabalho, foi usada novamente a ferramenta *Focal Statistics*, com um raio circular de 15 *pixels*.

#### 4.4 PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO DE SOLOS

A partir da elaboração dos atributos topográficos, foram utilizados distintos métodos de integração dos mesmos para delimitar as unidades de mapeamento (UM). Este item tem por finalidade explicar a maneira que foram feitas essas integrações de AT, a setorização da área de estudo (planície fluvial e setores norte e sul) e a padronização dos produtos cartográficos por meio da aplicação da área mínima mapeável de acordo com cada um dos modelos preditos.

##### 4.4.1 Integração dos atributos topográficos

A partir da integração de atributos topográficos foram geradas unidades preditivas de solos, que para este trabalho adotou-se o conceito de unidades de mapeamentos (UM) (BUI, 2004; HÖFIG *et al.*, 2014; IBGE, 2015; TESKE *et al.*, 2015). Cada UM retrata a respectiva representação da distribuição dos solos na vertente, ou seja, representa a relação solo - relevo.

Para Bui (2004), a representação cartográfica dessas relações é primeiramente feita pelo delineamento das unidades de mapeamento dos solos. Em seguida, são determinados símbolos (ou códigos) para cada uma das UM's que são descritos em uma legenda com informações de limites, proporções, padrões de paisagem e atributos do solo.

Segundo IBGE (2015), unidades de mapeamento possibilitam a representação dos solos em bases cartográficas ilustrando sua distribuição espacial, extensão e limites, bem como a relação dos solos com o terreno em questão. As UM's podem ser simples, com dominância de apenas uma classe de solo, ou combinadas, com dois ou mais componentes sob a forma de associações, complexos ou grupos indiferenciados.

As características e propriedades dos solos componentes de uma unidade de mapeamento (conjunto de áreas de solos com relações e posições definidas na paisagem) são definidas pelas descrições e conceituações das unidades taxonômicas (classe de solo definida e conceituada segundo os parâmetros de classificação) que a compõem (IBGE, 2015).

Sendo assim, as UM's representam a situação mais homogênea que se consegue individualizar tanto por técnicas tradicionais de levantamentos de solo, quanto pelas de mapeamentos digitais. Os mapas/cartas são, portanto, constituídos por diversas unidades de mapeamento (BUI, 2004; HÖFIG, 2014; IBGE, 2015).

Tendo em vista que a escala de apresentação dos produtos cartográficos (modelos preditivos gerados por TC e RL) é de 1:100.000, e que os trabalhos sobre a distribuição dos solos e sistemas pedológicos do noroeste paranaense supramencionados nesta pesquisa, foram usadas duas unidades de mapeamento: uma unidade para representar os Latossolos (localizados nos terços superiores das vertentes no noroeste paranaense) e outra para os demais solos encontrados nos terços médios e inferiores das vertentes, na qual há predominância de Argissolos, conforme o QUADRO 4.

QUADRO 4 – UNIDADES DE MAPEAMENTO

<b>CÓDIGO DA UNIDADE DE MAPEAMENTO (UM)</b>	<b>UNIDADE SIMPLES (SOLOS PREDOMINANTES)</b>	<b>SOLOS NO 1º NÍVEL CATEGÓRICO (EMBRAPA, 2018)</b>
UM-01	Latossolos	Latossolos
UM-02	Argissolos	Argissolos, Neossolos, Gleissolos e Nitossolos <sup>17</sup>

No segundo nível categórico da EMBRAPA (2018), os Neossolos encontrados na área de estudo são da classe Neossolos Quartzarênicos e aparecem apenas em mapeamentos mais detalhados, como o de Fasolo *et al.* (1988) que se apresenta na escala 1:55.000. Para um modelo

<sup>17</sup> Cabe destacar que ainda podem ocorrer Nitossolos na área de estudo, nas porções onde há incidência de solos desenvolvidos de rochas basálticas (Grupo São Bento – Formação Serra Geral), mapeados tanto por Fasolo *et al.* (1988) quanto por EMBRAPA (2007). O sistema pedológico V de Nakashima (1999) também aponta para a ocorrência desses solos, que ocorrem na área de estudo nos terços inferiores das vertentes, sendo este o seu motivo da inclusão da UM-02.

preditivo requer-se uma investigação aprofundada (atributos topográficos capazes de identificar padrões de distribuição na vertente) de como seria possível realizar a sua espacialização, tendo em vista que este solo ocorre em diferentes porções da paisagem (fundo de vale, nascentes e até mesmo em alguns topos). Os Gleissolos ocorrem apenas nos fundos de vale onde há condições favoráveis para este solo se desenvolver (nível freático próximo da superfície que pode proporcionar o processo pedogenético de gleização).

Assim sendo, para esta pesquisa foram adotadas duas unidades de mapeamento simples que corresponde a um só componente (classe de solo), e deve representar ou ocupar no mínimo 70% da área da unidade (IBGE, 2015). Conforme o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988), para a UM-01 ocorrem apenas Latossolos (100%), e para a UM-02 a ocorrência de Argissolos, dentro da área de estudo, ocupa em torno de 76% e com inclusões de Neossolos Quartzarênicos em torno de apenas 12%, Gleissolos com 10% e Nitossolos com 2%.

#### 4.4.1.1 Tabulação cruzada

Após a elaboração dos atributos topográficos das áreas de estudo, será utilizada a técnica da tabulação cruzada (TC) para a integração das variáveis a partir de superposição de mapas (álgebra de mapas) (TOMLIN, 1994). Esta técnica indica o conjunto de procedimentos de análise espacial em geoprocessamento, cujo resultado traz novos dados a partir de ferramentas aplicadas a um ou mais mapas (SILVEIRA *et al.*, 2012; NOWATZKI; SANTOS, 2014; OLIVEIRA *et al.* 2015).

Conforme aponta Silveira (2010) esse método constitui-se da sobreposição das classes dos atributos topográficos na forma de matrizes (raster), para as quais são executadas operações algébricas em ambiente de SIG. Deste modo, é possível usar o resultado da operação no mapeamento pedológico preditivo de detalhe das áreas de estudo da presente tese.

A partir de informações espaciais no formato matricial, essa metodologia pode ser aplicada pelo *software* ArcGis 10.3 (ferramenta *Raster Calculator*). Somam-se duas ou mais células matriciais (*grid*) de dados a fim de se gerar um agrupamento. Por exemplo: cruzar atributo topográfico “X” com o atributo “Y”, conforme ilustra a FIGURA 25.

FIGURA 25 – TABULAÇÃO CRUZADA COM DUAS CÉLULAS MATRICIAIS

<table border="1"> <tr><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>2</td></tr> </table>	3	2	1	1	2	1	2	3	2	+	<table border="1"> <tr><td>20</td><td>30</td><td>10</td></tr> <tr><td>10</td><td>20</td><td>20</td></tr> <tr><td>10</td><td>30</td><td>30</td></tr> </table>	20	30	10	10	20	20	10	30	30	=	<table border="1"> <tr><td>23</td><td>32</td><td>11</td></tr> <tr><td>11</td><td>22</td><td>21</td></tr> <tr><td>12</td><td>33</td><td>32</td></tr> </table>	23	32	11	11	22	21	12	33	32
3	2	1																													
1	2	1																													
2	3	2																													
20	30	10																													
10	20	20																													
10	30	30																													
23	32	11																													
11	22	21																													
12	33	32																													
GRID A		GRID B		GRID C																											

A partir desse cruzamento é possível notar que a classe 3 do *grid* A combinada (somada) com a classe 20 do *grid* B gera a classe 23 em um novo *grid* (C). Assim, para melhor visualização do processo de integração dos AT, os resultados foram apresentados seguindo a lógica do QUADRO 5.

QUADRO 5 – TABULAÇÃO CRUZADA ENTRE AT X E AT Y

AT	ATRIBUTO TOPOGRÁFICO X			
	Classe	10	20	30
ATRIBUTO TOPOGRÁFICO Y	1	11	21	31
	2	12	22	32
	3	13	23	33

Desse modo, o procedimento final é agrupar as classes que se referem a uma mesma categoria, por exemplo: as classes 11, 12 e 21 se referem ao solo hipotético “A”; 13, 22, 23 e 31 ao solo “B”; e 32 e 33 ao solo “C”.

É pertinente salientar que o processo de discretização das classes deve ser feito com cautela, pois para chamar de classe 1, os valores do atributo em questão se distribuem por meio de uma variação. Por exemplo: o atributo topográfico hipotético “X” varia em seu histograma de 0 a 30. Para tanto pode-se discretizar como: classe 1 = 0 a 10; classe 2 = 11 a 20; e classe 3 = 21 a 30. Deste modo, cabe ao pesquisador tomar as decisões coerentes para a espacialização dos solos propostos, pois a decisão da separação dos valores influenciará diretamente no produto final (mapa preditivo).

Para o mapeamento preditivo da área de estudo foram usados os atributos topográficos: Clinografia, Índice de posição topográfica, Índice de rugosidade, Índice topográfico de umidade (modificado) e Plano de curvatura. A integração dessas informações, através da ferramenta *Raster Calculator*, pode ser feita com quantos *grids* forem necessários.

Para este trabalho optou-se por integrar os cinco atributos em uma mesma matriz de tabulação a partir dos valores discretizados apresentados na TABELA 3. Cabe destacar que cada atributo se distingue um do outro na matriz pela quantidade de casas decimais, ou seja, por exemplo para Clinografia foi usada a lógica de que para a UM-01 o valor seria de 10.000, já para o UM-02, 20.000.

TABELA 3 – DISCRETIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

AT	VALOR LIMITE	VALORES DISCRETOS UM-01	VALORES DISCRETOS UM-02	TC - UM-01	TC - UM-02
<b>MODELO DIGITAL DO RELEVO (20M)</b>					
CLN	10	0,000019073 a 10	10,00000001 a 61,90439224	10000	20000
IPT	-4	-3,999999999 a 53,2717929	-55,73620605 a -4	1000	2000
IRG	11	0,00082112 a 11	11,00000001 a 45,73007202	100	200
ITM	14	2,310771704 a 14	14,00000001 a 22,39475441	10	20
PLA	-0,002	-0,002 a 0,577563405	-0,244610399 a -0,002	1	2
<b>MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (30M)</b>					
CLN	12	0 a 12	12,00000001 a 69,36717987	10000	20000
IPT	-8	-7,999999999 a 56,66235352	-65,27609253 a -8	1000	2000
IRG	14	1,147953272 a 14	14,00000001 a 39,98670578	100	200
ITM	8	2,656983376 a 8	8,00000001 a 13,4373436	10	20
PLA	-0,002	-0,002 a 1,014957309	-0,444444448 a -0,002	1	2
<b>MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (90M)</b>					
CLN	8	0 a 8	8,00000001 a 28,92163467	10000	20000
IPT	-28	-27,999999999 a 103,2887206	-84,01150513 a -28	1000	2000
IRG	28	0,838784576 a 28	28,00000001 a 56,5422287	100	200
ITM	12	5,367575873 a 12	12,00000001 a 14,71565151	10	20
PLA	-0,02	-0,002 a 0,19662416	-0,120456889 a -0,002	1	2

Por fim, as combinações das matrizes que se enquadram para a classe UM-01 foram aquelas que tiveram a combinação 11.111 (*pixels* todos os atributos coincidindo com a UM-01)<sup>18</sup>. As 32 combinações restantes<sup>19</sup> foram consideradas UM-02, pois cada atributo contribuiu para mapear alguma porção diferente da vertente onde possa ser encontrada esta unidade de mapeamento.

#### 4.4.1.2 Regressões logísticas

Como segundo método para a predição de classes de solos, foi escolhido o modelo de regressões logísticas (RL). Através de uma relação linearizada entre covariáveis preditoras e

<sup>18</sup> Seguindo esta mesma lógica, a combinação 22.222 ocorre quando o *pixel* é classificado com todos os atributos topográficos na classe UM-02.

<sup>19</sup> O restante das combinações foram as seguintes: 11.112, 11.121, 11.122, 11.211, 11.212, 11.221, 11.222, 12.111, 12.112, 12.121, 12.122, 12.211, 12.212, 12.221, 12.222, 21.111, 21.112, 21.121, 21.122, 21.211, 21.212, 21.221, 21.222, 22.111, 22.112, 22.121, 22.122, 22.211, 22.212, 22.221 e 22.222.

classes de solos, as regressões logísticas geram um valor de pertinência (probabilidade de ocorrência) para cada classe de solos a ser mapeada (VENABLES, W. N.; RIPLEY, 2002; GIASSON *et al.*, 2006).

Esse valor de probabilidade é posteriormente avaliado entre todas as classes de solos para um mesmo ponto, sendo que entre elas a de maior valor é atribuída à coordenada em análise, gerando-se um mapa de classe de solos.

Para Ten Caten (2011), sua aplicação envolve a função logarítmica (ou *logit*), a qual é definida como a razão entre a probabilidade de o evento ocorrer e a probabilidade de esse evento não ocorrer (*odds* ou razão de chance); ou, ainda, exemplificando com classes de solo, a *logit* é a função logarítmica da razão entre a probabilidade ( $p_i$ ) de um pixel ser membro de uma classe de solo “i” e a probabilidade de que ele não seja ( $1 - p_i$ ). Seu valor pode ser determinado por meio da regressão (Equação 14):

$$\text{logit}_i = \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = a + b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k \quad (14)$$

A equação demonstra como calcular o *logit* de uma categoria predita a partir de um conjunto de variáveis ( $X_{i..k}$ ). O *logit* é, por conseguinte, o logaritmo natural de uma razão entre probabilidades. O valor de “a” indica o intercepto da regressão e os valores de “b” são os coeficientes de cada variável explicativa (CHATTERJEE; HADI, 2006; TEM CATEN *et al.*, 2011), ou seja, todos os valores de “a” e “b” das regressões serão determinados para cada classe de solo a partir de dados experimentais (DEBELLA-GILO e ETZELMULLER, 2009).

Fundamentado nas contribuições de Nascimento *et al.* (2017) para a concretização das regressões logísticas, foi utilizada nesta pesquisa uma interface dentro do *software* QGIS™ versão 2.14.22 com o *software* R™ (que é uma linguagem e também um ambiente de desenvolvimento integrado para cálculos estatísticos e elaboração de gráficos). Dentro do R, usa-se para a regressão logística a função *multinom* do pacote *nnet*. Pela interface do QGIS acessa-se o módulo *modelling* e em seguida a ferramenta *Spatial environmental modelling*. Por fim, dentro do item *Learner* seleciona-se o aprendiz estatístico *Penalized Multinomial Regression*.

Esse aprendiz usa o termo “penalizada” pois necessita-se inserir pesos de confiança nas amostras inseridas na regressão. Conforme Nascimento *et al.* (2017) deve-se, teoricamente, introduzir valores entre 0.00 e 1.00, sendo zero (0) indicando nenhuma confiança na informação que se está colocando e um (1) a absoluta certeza do tipo de solo daquele ponto (no caso de

coletas de dados pedológicos de campo). Na prática, esses autores sugerem que sejam inseridos valores entre 0.50 e 0.80 na qual eles intitulam de pseudoamostras, que são pontos que não substituem as amostras de campo, ou seja, são amostras simuladas.

O QUADRO 6 ilustra um exemplo (retirado do setor norte do MDT de 20 metros) como as regressões logísticas interpretam a matriz de pontos amostrados(pseudoamostras). A coluna UM interpreta se o ponto foi designado como pertencente da UM-01 ou da UM-02. A da confiança interpreta o valor atribuído ao ponto assim como as colunas dos atributos topográficos o quanto cada um dos pontos representa ao longo do seu *grid*.

QUADRO 6 – PARTE DA MATRIZ DE PONTOS AMOSTRADOS E TABULADOS - ANÁLISE DAS RL

ID	UM	CONFIANÇA	CNL	IPT	IRG	ITM	PLA
1	02	0,80	7,770740	-28,882510	15,285310	12,982400	-0,000870
2	02	0,80	17,966920	-22,405850	12,235900	10,515860	0,001790
3	02	0,80	12,211350	-14,064880	11,084760	8,287860	0,001850
4	02	0,60	9,877420	-7,827030	12,223980	6,848270	0,003780
5	01	0,60	5,789260	-0,054630	12,508500	6,683730	0,007980
6	01	0,80	6,167460	8,317750	8,497090	6,342870	0,013580
7	01	0,80	0,744330	11,063110	3,811060	10,436900	0,008400
8	01	0,80	1,946800	5,253940	3,713220	9,654840	0,006050
9	01	0,80	5,788170	3,734470	7,085470	7,413570	0,003710
10	01	0,80	4,053410	7,419160	5,294450	7,575850	0,001970
11	02	0,80	2,808410	-24,524480	13,306550	14,920600	0,001050
12	02	0,80	1,981650	-28,120540	13,939290	15,195780	-0,008780
13	02	0,80	3,544350	-19,575680	12,144210	13,563080	-0,008130
14	02	0,80	5,409790	-9,294310	8,609500	10,791930	-0,014150
15	02	0,60	4,537250	-18,440220	7,120010	11,587880	-0,011830
16	01	0,80	0,591340	25,499270	6,099350	8,305930	0,013810
17	01	0,80	5,591520	0,463780	7,199930	7,571600	0,001170
18	01	0,80	6,235580	-2,729250	7,667180	7,748500	0,007550
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
600	02	0,60	6,723170	-6,336300	7,910900	9,425960	-0,014870

A validação do modelo é feita com a inserção dos pontos de controle (amostras) extraídas tanto de trabalhos preexistentes quanto de observações de campo. Ou seja, é computado quantos pontos denominados de UM-01 se localizam dentro da classe especializada UM-01 (acertos) e quantos se localizam na UM-02 (erros). Assim como são computados os acertos e erros dos pontos referentes a UM-02.

Importante destacar que essa validação também é gerada automaticamente por meio da estatística das pseudoamostras (chamado pelo *software* de validação cruzada), ou seja, contabiliza os seus respectivos acertos e erros. Nas duas validações foi usado as seguintes técnicas de verificação de qualidade: Acurácia Geral e Índice Kappa.

Pela ferramenta *Spatial environmental modelling* é possível também gerar informações de quão incerto o aprendiz estatístico está em relação ao valor de solo predito (NASCIMENTO *et al.*, 2017; SAMUEL-ROSA, 2016). Neste contexto, cada uma das bandas armazena a informação de um dos seguintes índices estatísticos: pureza teórica, entropia de Shannon e índice de confusão, conforme o QUADRO 7.

QUADRO 7 – INCERTEZAS: PUREZA TEÓRICA, ENTROPIA DE SHANNON E ÍNDICE DE CONFUSÃO

ÍNDICE	DESCRIÇÃO	SIGNIFICADO DOS VALORES
<b>Pureza teórica</b> ( <i>Theoretical purity</i> )	Indica o maior valor predito de probabilidade num ponto	1 = máxima pureza teórica – o aprendiz (geo)estatístico tem alta confiança sobre a categoria predita. 0 = mínima pureza teórica – o aprendiz (geo)estatístico possui grande incerteza sobre a categoria predita.
<b>Entropia de Shannon</b> ( <i>Shannon entropy</i> )	Representa uma medida da “desordem” da predição	1 = máxima desordem - o aprendiz (geo)estatístico possui baixa confiança sobre a categoria predita. 0 = máxima confiança sobre a categoria predita
<b>Índice de confusão</b> ( <i>Confusion Index</i> )	Medida da confusão que o aprendiz faz entre as duas classes mais prováveis	1 = máxima confusão - o aprendiz (geo)estatístico possui grande confusão em relação as duas classes mais prováveis. 0 = mínima confusão entre as duas classes mais prováveis.

Fonte: Nascimento *et al.* (2017)

#### 4.4.2 Setorização da área de estudo

A área de estudo apresenta uma extensa planície fluvial no rio Ivaí (a jusante da bacia há uma porção da planície do rio Paraná na AE), sendo que esta planície possui solos característicos a essa condição geomorfológica. É importante destacar que alguns trabalhos realizados no noroeste paranaense, como o de Nakashima (1999), apresenta uma distinção morfopedológica entre as porções localizadas nas margens esquerda e direita do rio Ivaí. Trabalhos desenvolvidos no LABS (COUTO, 2015; FUMIYA, 2017; MANGUEIRA, 2017) apontam também que no relevo de colinas amplas, localizado ao norte do rio Ivaí, com domínio dos Latossolos, a rede de drenagem apresenta-se pouco entalhada, enquanto que ao sul do rio Ivaí, com predomínio do relevo de colinas médias, onde os Argissolos ganham expressão, a rede de drenagem encontra-se mais densa e entalhada.

Sendo assim, optou-se por criar uma área que representa a distribuição dos solos de planície fluvial da AE que se estendem por toda a planície de inundação do supramencionado rio (sendo assim os setores norte e sul foram denominados neste momento como solos de planalto) e para melhor interpretação da distribuição dos solos da área de estudo, e também para otimizar as integrações dos atributos topográficos (principalmente por questões de *hardware*) a mesma foi dividida em setor norte (margem direita do rio Ivaí) e outra no setor sul (margem esquerda).

Para a delimitação da planície, tomou-se como base os conceitos de áreas úmidas<sup>20</sup> e solos hidromórficos<sup>21</sup> pois entende-se que toda área úmida é o “segmento de paisagem constituído por solos hidromórficos (PARANÁ, 2008, p.3).

A primeira etapa consistiu na identificação da planície fluvial, cujo parâmetro de análise foram as seguintes informações do meio físico: 1) geologia do grupo Caiuá (classe de sedimentos cenozoicos) (FERNANDES; COIMBRA, 1994) (FIGURA 3); 2) planície fluvial presente no mapeamento geomorfológico do estado do Paraná (SANTOS *et al.* 2006) (FIGURA 3); 3) Neossolos Flúvicos (RY), Gleissolos (G) e Organossolos (O) do mapeamento da EMBRAPA (2007) (FIGURA 4); e 4) sistema pedológico (SP) de planícies de inundação (SP-VI) de Nakashima (1999) (FIGURA 4).

Os atributos topográficos selecionados para delimitar o compartimento de planície fluvial foram: índice de posição topográfica (IPT)<sup>22</sup> e índice topográfico de umidade modificado (ITM). Com o intuito de auxiliar a etapa de discretização dos intervalos desses AT, foram examinados diversos perfis transversais com valores de hipsometria e clinografia ao longo da planície fluvial do rio Ivaí. Em seguida, foram selecionadas dois que representassem os limites dessa planície, um à jusante do rio Ivaí (Perfil 01) e outro à montante (Perfil 02), com aproximados 20 km de extensão.

---

<sup>20</sup> Um exemplo da importância ambiental que essas áreas oferecem foi dada pelo estado do Paraná, a partir da criação de uma Resolução Conjunta IBAMA/SEMA/IAP nº 005 (PARANÁ, 2008) que conceitua as áreas úmidas como “segmento de paisagem constituído por solos hidromórficos” (PARANÁ, 2008, p.3). O solo naturalmente originado pela presença de água subsuperficial, geralmente, dentro de 50 cm a partir da superfície. Essa resolução se baseou na concepção do regime hídrico dos solos para avaliar as áreas úmidas e seus entornos protetivos.

<sup>21</sup> Ambientes hidromórficos são propícios ao desenvolvimento do processo pedogenético de gleização cuja redução do ferro, em condições anaeróbias, possibilita a formação de horizontes acinzentados com ou sem mosqueamento. Nessas situações pode ocorrer também acúmulo de resíduos orgânicos e a formação de Organossolos (LEPSCH, 2011; EMBRAPA, 2018). Esses locais se caracterizam ainda pela presença de camadas estratificadas, e/ou distribuição irregular do conteúdo de carbono orgânico em profundidade, não relacionada a processos pedogenéticos, empregados na identificação dos Neossolos Flúvicos (EMBRAPA, 2018; IBGE, 2015).

<sup>22</sup> Nessa etapa foi utilizada análise de vizinhança com janela circular de raio com 50km. Foram testados diversos valores e este apresentou melhor segmentação da planície fluvial do rio Ivaí, tendo em vista que quanto maior o raio de análise de vizinhança, maior a generalização do produto final.

A partir dessas análises foi possível separar os AT nas seguintes classes: 1) solos de planície fluvial; 2) solos de planalto. Os valores das classes discretizadas estão sintetizados na TABELA 4.

TABELA 4 – DISCRETIZAÇÃO DAS CLASSES DOS SOLOS (PLANÍCIE FLUVIAL)

Solos	Intervalos	Classe
<b>ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE MODIFICADO (ITM)</b>		
Planalto	7 a 15	1
Planície fluvial	16 a 25	2
<b>ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA (IPT)</b>		
Planície fluvial	-137 a -70	2
Planalto	-69 a +193	1

A etapa final consistiu em aplicar o método de tabulação cruzada (TOMLIN, 1994) entre os dois atributos. A classe considerada como solos de planície fluvial foi a de valor 2 do ITM com a de valor 1 do IPT (combinação 21 na tabulação). As demais combinações (11, 12 e 22) foram consideradas classes pertencentes ao grupo de solos de planalto (QUADRO 8).

QUADRO 8 – TC (ITM E IPT) –COMPARTIMENTO DE SOLOS DE PLANÍCIE FLUVIAL

ATRIBUTO TOPOGRÁFICO				IPT	
				Planície fluvial	Planalto
Solos		Intervalos	Classe	-137 a -70	-69 a +193
				1	2
ITM	Planalto	7 a 15	1	<b>11</b>	<b>12</b>
	Planície fluvial	16 a 25	2	<b>21</b>	<b>22</b>

Os resultados dessa setorização foram comparados através da técnica de acurácia geral com a espacialização dos Neossolos Flúvicos e Gleissolos do mapeamento realizado por Fasolo *et al.* (1988) nos municípios de Santa Mônica e Santa Izabel do Ivaí, e com as classes de Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Organossolos mapeados em EMBRAPA (2007).

#### 4.4.3 Aplicação da área mínima mapeável

O conceito de área mínima mapeável (AMM)<sup>23</sup> associado à cartografia define o tamanho da área que um determinado objeto (neste caso uma classe de solo) deve conter para que seja representado num mapa ou carta geográfica. Nesse sentido essa área mínima entende-se como o conjunto de pixels contínuos em uma imagem (MOTTA, 2010).

Para esse trabalho foram feitas generalizações cartográficas (remoção de ruídos) dos resultados com o intuito de suprir a área mínima mapeável. A equivalência desta área no mapa, com a área correspondente no terreno, é função da escala final de apresentação. Portanto, para a escala adotada de 1:100.000<sup>24</sup> (escala de nível de reconhecimento de alta intensidade) a área mínima mapeável é de 0,4 km<sup>2</sup> (400.000 m<sup>2</sup>), conforme descrito em IBGE (2015).

Tendo como exemplo o MDT que usa o tamanho do pixel de 20x20 metros, entende-se o valor total de sua área é de 400 m<sup>2</sup>. Assim, para saber a quantidade de pixels mínimos necessários no procedimento, divide-se o valor da AMM com o valor total de área do pixel, chegando-se ao valor de 1000 pixels. Portanto, todas os agrupamentos com menos de 1000 pixels foram generalizados no MDT. Para os dois MDEs (30 e 90 metros), foi utilizado o mesmo processo metodológico.

Conforme o QUADRO 9 é possível observar a quantidade de pixels para a AMM de cada um dos modelos utilizados levando em consideração a escala adotada.

QUADRO 9 – VALORES DAS ÁREAS MÍNIMAS MAPEÁVEIS PARA OS MODELOS

MODELO (RESOLUÇÃO ESPACIAL - METROS)	ÁREA PIXEL (m <sup>2</sup> )	AMM (PIXELS)
MDT 20	400	1000
MDE 30	900	444
MDE 90	8100	50

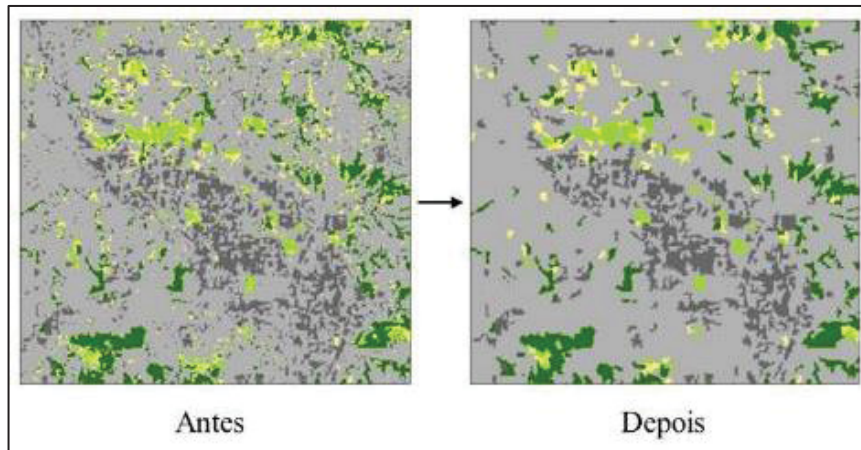
A partir do módulo *Spatial Analyst tools* do *software* ArcGIS 10.3 é possível remover pequenas regiões isoladas de um *grid*, ou seja, as porções que são maiores do que certo número de pixels permanecerão no mesmo, atendendo, portanto, a escala de mapeamento selecionada.

<sup>23</sup> A escala e a área mínima mapeável devem obedecer à uma dimensão que atenda aos objetivos do que se deseja estudar e mapear, ou seja, definir uma escala e o tamanho da área mapeável define o tamanho do erro aceitável num mapeamento (MOTTA, 2010).

<sup>24</sup> A adoção da escala foi de 1:100.000 e não a mesma do mapeamento de Fasolo *et al.* (1988), que é de 1:55.000, pois para esta escala seria preciso distinguir classes de solos como Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Flúvicos e ainda Gleissolos estando, portanto, não compatível com os objetivos desta pesquisa.

Para tanto, foram utilizadas as ferramentas de generalização: *Region Group*, *Set Null* e *Nibble* sendo que através da FIGURA 26 é possível notar a diferença entre um modelo hipotético antes e depois do processo de generalização.

FIGURA 26 – GENERALIZAÇÃO DE IMAGEM E REMOÇÃO DE RUÍDOS



FONTE: Adaptado de: ESRI - ARCGIS HELP 10.3 (2017)

Para fins cartográficos todos os produtos finais passaram por um controle de filtragem (ferramenta *Major Filter* no ArcGis) para suavizar as bordas das unidades mapeadas.

#### 4.5 SELEÇÃO DE ÁREAS DE REFERÊNCIA

As áreas de referência deste trabalho foram definidas a partir da delimitação de sub-bacias hidrográficas no interior dos municípios contemplados pelo mapeamento pedológico de Fasolo *et al.* (1988).

Os critérios para a escolha e delimitação dessas áreas foram os seguintes: locais onde a passagem lateral dos Latossolos para Argissolos (principais solos das duas UM) pudesse ser melhor representada para o contexto geral da área de estudo; diferentes comportamentos geomorfométricos (atributos topográficos analisados em segundo plano no *software*); bacias de primeira, segunda ou no máximo terceira ordem conforme Strahler (1952); valor de área entre no mínimo 10 km<sup>2</sup> e no máximo 30 km<sup>2</sup>.

TABELA 5 – VALOR DE ÁREA (AR)

SETOR NORTE (N)		SETOR SUL (S)	
ÁREA DE REFERÊNCIA	km <sup>2</sup>	ÁREA DE REFERÊNCIA	km <sup>2</sup>
AR_N01	13,9	AR_S01	22,1
AR_N02	27,8	AR_S02	11,0
AR_N03	22,0	AR_S03	17,2
AR_N04	17,8	AR_S04	18,2
AR_N05	19,4	AR_S05	13,5
AR_N06	21,7	AR_S06	22,4
AR_N07	13,8	AR_S07	22,3
AR_N08	20,1	AR_S08	24,3
<b>Total</b>	<b>156,5</b>	<b>Total</b>	<b>151,0</b>

Cabe destacar que a predição dos solos, através dos dois métodos utilizados neste trabalho, foi feita primeiramente dentro das áreas de referência (AR) para os setores norte e sul e em seguida foi feita a extrapolação das regras de classificação dos solos para o restante da área de estudo (AE).

#### 4.6 MAPEAMENTOS PREEXISTENTES E PONTOS DE CONTROLE

Essa etapa teve por finalidade fazer um levantamento de mapeamentos preexistentes e também de dados pedológicos em forma de pontos de controle (PC) com o intuito de sustentar a etapa da discretização dos atributos topográficos e posteriormente validar os mapas pedológicos preditivos finais, além de proporcionar melhor entendimento acerca da distribuição dos solos da região. Ainda foram realizadas observações de campo (OC) em topossequências.

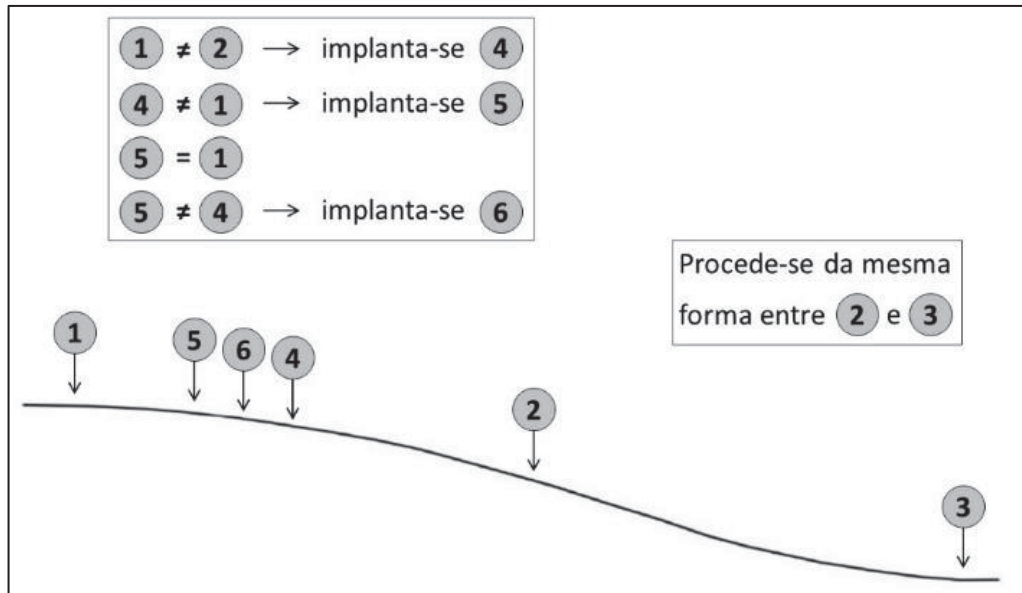
##### 4.6.1 Métodos de observação de campo

Para realização desta etapa, foi efetuada uma adaptação do método da Análise Estrutural da Cobertura Pedológica. Esse procedimento permite o entendimento do solo na paisagem, ou seja, do solo no *continuum* (QUEIROZ NETO, 2000; 2010), porém, o objetivo desta etapa foi somente encontrar os pontos de controle para identificação dos solos, diferenciação lateral dos solos na vertente e ainda identificar rupturas de declive e/ou outras alterações observáveis na topografia.

Para tanto, foram realizadas sondagens através de topossequências em intervalos regulares (uma no topo, uma na média vertente e outra na baixa vertente) com trado manual

(trado holandês) para identificar algumas características morfológicas do solo (FIGURA 27) (BOULET *et al.*, 1982; FERNANDES BARROS, 1985; CASTRO, 1989; ÁVILA, 2009; QUEIROZ NETO, 2010).

FIGURA 27 – MÉTODO DE IMPLANTAÇÃO DE SONDAGENS EM TOPOSEQUÊNCIA



FONTE: Adaptado de BOULET *et al.* (1982)

Seguindo as especificações de determinações de campo indicadas de EMBRAPA (2018) e IBGE (2015), foram analisadas as seguintes características morfológicas do solo: transição entre horizontes; profundidade e espessura dos horizontes; cor; e textura. Todas as amostras de solo analisadas foram coletadas e armazenadas em pedocomparador.

A somatória dos pontos de controle gerados por OC foi de 47, contudo, foram selecionadas 13 amostras que tivessem confiabilidade de representação das unidades de mapeamento em questão, ou seja, que não apresentaram dúvidas na classificação expedita em campo<sup>25</sup>. Esses 13 pontos de controle foram integrados para o processo de validação dos modelos gerados por Regressões Logísticas.

<sup>25</sup> Os demais pontos não apresentaram confiabilidade pois com os dados levantados em campo (e não levados para análises laboratoriais) não foi possível realizar uma classificação no primeiro nível categórico, sendo assim não contemplado no banco de dados pedológicos. Cabe destacar ainda que o número de pontos é considerado baixo e para resultados de verificação de qualidade é recomendável (IBGE, 2015) uma quantidade mínima de amostras por unidade de área. Porém, por questões de viabilidade de acesso ao campo, o número de amostras foram apenas 13.

#### 4.6.2 Trabalhos preexistentes

Primeiramente, tomou-se como base alguns dados em forma de ponto (amostra) da descrição dos solos do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná, (LARACH *et al.*, 1984) realizado pela EMBRAPA. Este mapeamento objetivou identificar e classificar os diferentes solos do Estado, bem como a verificação da sua distribuição geográfica, delimitação das áreas e investigação das suas características morfológicas, químicas, físicas e mineralógicas.

Foram utilizadas informações presentes em Silva *et al.* (2011) sobre três perfis de solo característicos de uma topossequência do arenito, na Estrada Quatorze, pertencente à Microbacia Arara, do Programa de Gestão Ambiental Integrada em Microbacias (PGAIM), no Município de Paranavaí<sup>26</sup>. Também foram gerados pontos a partir da topossequência realizada por Cunha *et al.* (2008), na qual há uma transição de Latossolos no topo e terço médio para Argissolos no terço inferior da mesma.

Por fim, foi utilizado o Banco de Dados de Informações Ambientais (IBGE, 2018) (Portal BDIA), na qual permite a visualização e consulta de dados de perfis de solo descritos. A partir deste portal é possível acessar no mapa todos os perfis de solo incluídos na base e acessar informações sobre bibliografia original, localização, classificação, descrição geral, descrições morfológicas, etc. No contexto da AE, foi possível extrair uma amostra de Argissolo. Sendo assim, a somatória de todos os pontos de controle (amostras) dos trabalhos preexistentes nos setores norte e sul da AE é de 30.

Como referência de um mapeamento semidetalhado, foi usado o mapa de solos de municípios do noroeste paranaense elaborado por Fasolo *et al.* (1988) na escala 1:55.000. A elaboração de levantamentos de solos nesta escala teve por finalidade a obtenção de informações básicas para implantação de projetos de colonização, loteamentos rurais, estudos integrados de bacias hidrográficas, entre outros objetivos.

Toda a base encontrava-se em formato analógico e foi convertida (vetorizada) em ambiente SIG para formato digital, georreferenciada e transformada em arquivo vetorial utilizando o *software* Arcgis 10.3. Os dados digitais foram atualizados para a atual classificação conforme está descrito em EMBRAPA (2018).

A legenda desse mapeamento contém a descrição original, com a nomenclatura do sistema de classificação da época. Para cada uma das classes de solos foi feita sua conversão

---

<sup>26</sup> As informações detalhadas dos dados de Larach *et al.* (1984) e Silva *et al.* (2011) encontram-se no Anexo A (Descrição dos atributos morfológicos dos perfis de solos dos trabalhos preexistentes).

para o atual SiBCS (EMBRAPA, 2018) e posteriormente feito um enquadramento para uma das duas unidades de mapeamento selecionadas nesta pesquisa.

Os mapas de solos dos municípios utilizados neste trabalho foram os de Paranavaí, Loanda, Santa Izabel do Ivaí e Santa Mônica no setor norte da área de estudo e os municípios de Guaporema e Rondon no setor sul. No total foram vetorizadas 18 folhas como a que está representada no Anexo B (Folha 3 do município de Rondon).

O segundo mapeamento preexistente de referência é o Mapa de Solos do Estado do Paraná (EMBRAPA, 2007) apresentado na escala 1:250.000. A base cartográfica deste mapeamento se encontra disponível no formato *shapefile*.

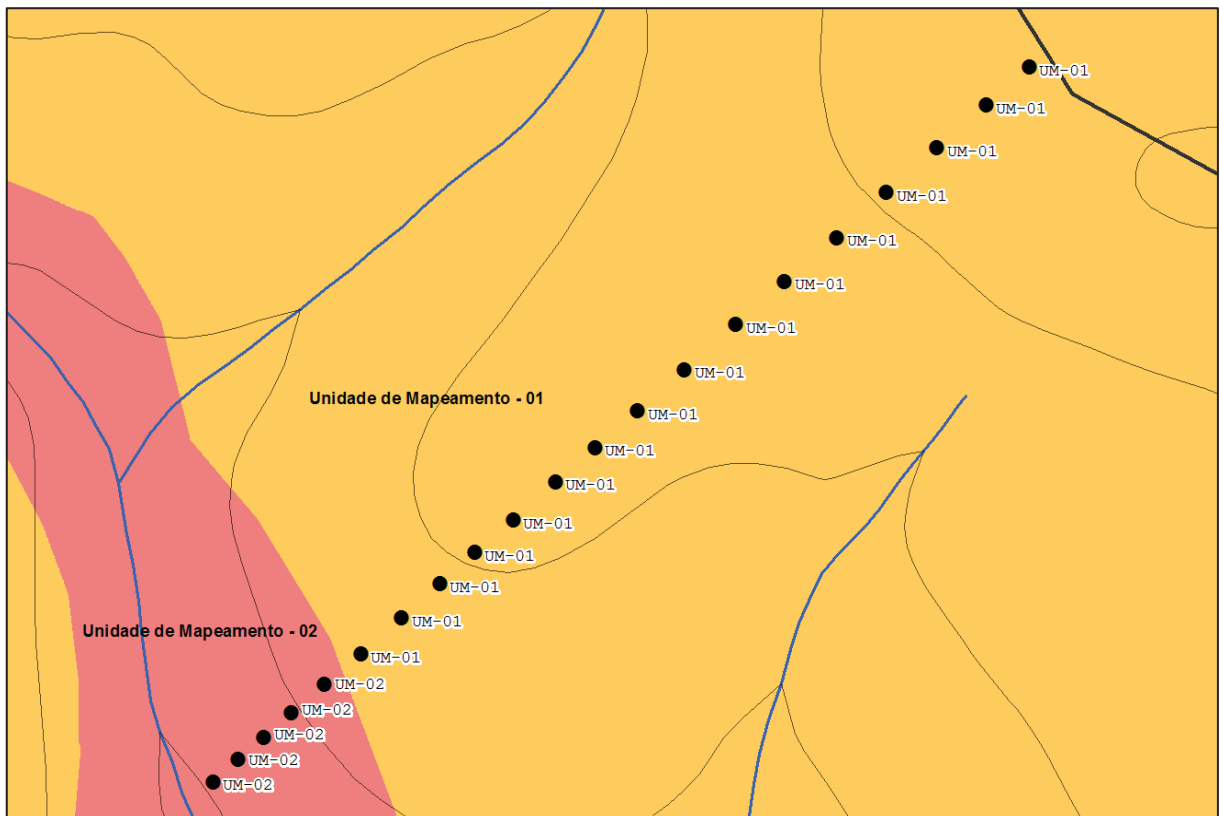
#### 4.6.2.1 Estabelecimento de pseudoamostras

A partir do mapeamento de Fasolo *et al.* (1988) foi possível estabelecer pontos de controle (pseudoamostras) para aplicação do método das regressões logísticas. Foi feita uma simulação de topossequência por área de referência, conforme ilustrado na FIGURA 28.

O número total de pseudoamostras foi de 1.200 (600 para cada setor) sendo que o número mínimo de amostras para cada uma das dezesseis AR foi de 60 (totalizando 960).

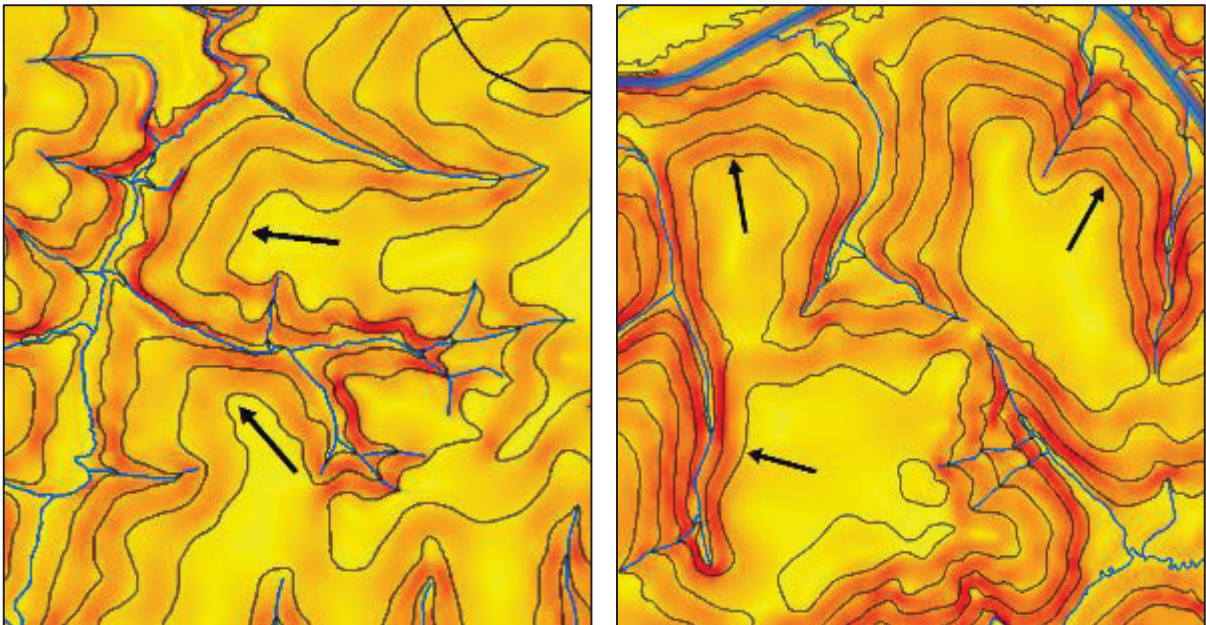
Foram feitos testes com a aplicação do método para toda a AE, porém, por questões de limitações de *hardware* as regressões foram executadas em cada um dos setores separadamente. Foram feitos testes com 100, 200, 300, 400 pontos e conforme o número de amostras foi aumentando, a predição se mostrou mais consistente. As diferenças entre 500 e 600 pontos foi pouca na espacialização, e também por limitação de *hardware* optou-se por estabelecer 600 pseudoamostras em cada um dos setores.

FIGURA 28 – DISTRIBUIÇÃO DE PSEUDOAMOSTRAS EM TOPOSEQUÊNCIA SIMULADA



Os 240 pontos restantes do estabelecimento de pseudoamostras foram efetivados de três maneiras. A primeira consiste em distribuir pontos ao longo das AR a partir das informações do mapeamento de Fasolo *et al.* (1988). A segunda na análise de proximidade de curvas de nível juntamente com uma camada de clinografia habilitada no ArcGis (FIGURA 29). Deste modo foi possível determinar locais com rupturas de declives (mesmo que suaves) que marcassem uma potencial transição entre os principais solos das duas unidades de mapeamento em questão, conforme apontam trabalhos supramencionados na região noroeste do Paraná.

FIGURA 29 – ESTABELECIMENTO DE PSEUDOAMOSTRAS - CURVAS DE NÍVEL E CLINOGRAFIA



Priorizou-se as áreas onde os valores do atributo fossem muito altos ou muito baixos<sup>27</sup>, para que nas regressões logísticas nesses valores induzissem o estabelecimento da UM correta no mapeamento preditivo.

A terceira maneira foi a partir da análise de imagens de satélites disponibilizadas pelo mesmo *software* (FIGURA 30). Buscou-se por áreas com solo exposto que evidenciasse mudanças na cor ao longo das vertentes.

Para Cunha *et al.* (1999), na região noroeste do Paraná a cor do solo varia ao longo das vertentes refletindo mudanças até mesmo nas classes de solos. Para jusante do terço médio ao inferior, o horizonte A torna-se mais claro e menos espesso. Esses autores também destacam a ocorrência de diferenciação textural nos perfis verticais do solo, marcada por aumento gradativo de contraste nesse sentido, correspondente ao aparecimento do horizonte E.

A terceira pela observação de feições erosivas em ambientes rurais<sup>28</sup> da AE, pois conforme destacam Nakashima (1999), Cunha *et al.* (1999) e Santos e Castro (2006) essas feições podem ser indicativos de erosão hídrica superficial e subsuperficial que ocorrem quando

<sup>27</sup> Foram estabelecidos alguns pontos fora das AR com valores muito altos de clinografia, sobretudo em feições erosivas atuais e paleovoçorocas, marcados como UM-02.

<sup>28</sup> Conforme apresentado por Mangueira *et al.* (2016) as erosões dentro da área urbana sofrem influência antrópica direta, tanto pelo traçado do sistema viário quanto pela deficiência de dissipação do sistema de drenagem de águas pluviais e servidas. A urbanização, como toda obra que interpõe estruturas pouco permeáveis entre o solo e a chuva, faz com que o escoamento seja incrementado com a diminuição da infiltração, promovendo uma mudança de regime de escoamento local. Deste modo, as erosões que se enquadram como urbanas foram desconsideradas nesta etapa tendo em vista que elas podem acontecer em qualquer classe de solo no Noroeste.

há formação de horizonte Bt no solo (em decorrência da deficiência de infiltração de água neste tipo de horizonte).

FIGURA 30 – ESTABELECIMENTO DE PSEUDOAMOSTRAS POR COR E FEIÇÕES EROSIVAS



Fonte: ArcGis 10.3 (*Basemap - Imagery*) – GeoEye01 – Resolução: 0,46m – Data: 14/08/2016

Com base nos critérios propostos por Nascimento *et al.* (2017), os pesos de confiança usado para as pseudoamostras foram dois: 0.60 para pontos próximos dos limites das classes de solos do mapeamento de Fasolo *et al.* (1988); e 0.80 para o restante dos pontos (distante de limites). A escolha desses valores foi baseada nas imprecisões ocorridas no georreferenciamento dos mapas de solos, por isso a confiança maior ocorre nos pontos localizados no centro dos polígonos e os pontos com menor confiança próximo dos limites das

classes do mapa. No total, foram estabelecidos 432 pontos para a classe UM-01 e 768 para a classe UM-02 (por esta unidade representar porções do relevo com maior heterogeneidade de informações a quantidade de pontos foi maior).

#### 4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA – MEDIDAS DESCRITIVAS

Para a comparação entre os modelos preditivos, foram usadas medidas descritivas de tendência central e medidas de variação (ANDRIOTTI, 2003; BUSSAB; MORETTIN, 2017; MOORE, 2017) com o intuito de verificar, e acima de tudo quantificar, quais os modelos que tiveram uma maior variação, tomando por base a porcentagem de área mapeada nas duas unidades de mapeamentos propostos nesta tese. As comparações foram realizadas entre as predições do M20, o M30 e o M90 e entre os métodos de tabulação cruzada e regressões logísticas.

As medidas de tendência central dos dados foram expressas por meio da média aritmética, que é o resultado da divisão entre a soma das observações pela quantidade dos dados, ou seja, se tivermos uma série de valores de uma variável, a média aritmética (MA) simples é determinada pela Equação 15:

$$MA = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (15)$$

onde:

x = valor dos dados

n = quantidade de dados

Em relação às medidas de dispersão, que são parâmetros estatísticos usados para determinar o grau de variabilidade dos dados de um conjunto de valores, são usadas para uma análise mais confiável dos dados, tendo em vista que as variáveis de tendência central (média, mediana, moda) muitas vezes escondem a homogeneidade ou não dos dados. Assim sendo, a técnica mais utilizada é a do desvio padrão (DP) que é uma medida que expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados. Esta técnica é bastante empregada em análises comparativas pois leva em consideração a totalidade dos valores da variável em estudo e com isso é capaz de indicar o quanto um conjunto de dados é uniforme. Quanto mais próximo de 0 for o desvio padrão, mais homogêneo são os dados e é expresso pela Equação 16:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (16)$$

onde:

$x_i$  = valor dos dados

$\mu$  = média

$n$  = quantidade de dados

Outra técnica utilizada é a da variância e é determinada pela média dos quadrados das diferenças entre cada uma das observações e a média aritmética da amostra, ou seja, o quanto cada dado está variando da média. Cabe destacar que apenas o cálculo da variância pode não ser suficiente, pois essa é uma medida de dispersão muito influenciada por valores que estão muito distantes da MA. Pode ser entendida pela Equação (17):

$$VA = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \quad (17)$$

Por fim, foi utilizado o coeficiente de variação (CV), que é uma medida de dispersão relativa, pois permite avaliar melhor quando se precisa comparar variáveis que apresentam médias bastante diferentes. Desta forma, ao confrontar dois conjuntos de dados, o mais homogêneo será aquele que apresentar menor coeficiente de variação. Sua equação pode ser usada com ou sem valores percentuais, sendo que para essa pesquisa foram usados valores percentuais sendo a razão do desvio padrão pela média aritmética, conforme a Equação 18:

$$CV = \frac{DP}{MA} \quad (18)$$

Cabe destacar que se os dados forem menores ou iguais a 15% indica baixa dispersão (dados homogêneos); entre 15 e 30% indica média dispersão; e maior que 30% indica alta dispersão (dados heterogêneos).

#### 4.8 COMPARAÇÕES ENTRE INFORMAÇÕES ESPACIAIS (VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE)

Os métodos de comparação para verificação de qualidade (VQ), ou seja, acurácia dos modelos, foram usados entre os mapas preditivos gerados a partir do MDT e dos dois MDE's e com dois mapeamentos preexistentes: Fasolo *et al.* (1988) na escala 1:55.000 e EMBRAPA (2007) na escala 1:250.000. Cabe destacar que ambos os mapeamentos em formato *shapefile*

foram tratados e padronizados (como exemplo, remoção de classes como localidade, ou corpos hídricos) e as classes de solos agrupados conforme as duas unidades de mapeamentos propostos nesta tese.

Os métodos selecionados foram: acurácia geral (AG), matriz de erros e acurácia do mapeador (AM) e do usuário (AU); índice kappa (K) e validação cruzada (VC).

#### 4.8.1 Matriz de erros, Acurácia geral, do mapeador e do usuário

A exatidão global (SILVEIRA, 2010; NOWATZKI 2013), qualidade global (CENTENO, 2004) ou ainda acurácia geral (TEN CATEN, 2008) é definida computando o número de pixels corretamente classificados, conforme Equação (19):

$$AG = \frac{pcc}{pt} \quad (19)$$

onde:

EG = Exatidão Global;  
pcc = número de pixels corretamente classificados;  
pt = número de pixels total da matriz.

Por meio deste método é possível verificar o percentual de concordância (C%) (Equação 20) e o percentual de discordância (D%) (Equação 21), na qual serve como um parâmetro geral de avaliação entre os mapas (SILVEIRA, 2010).

$$C\% = 100 \cdot EG \quad (20)$$

$$D\% = 100 - PC \quad (21)$$

A Exatidão Global é considerada um parâmetro geral pois não permite gerar maiores conclusões, como por exemplo, determinar qual grupo foi melhor classificada ou quais grupos encontram-se associadas à uma superestimação e são responsáveis pela maior parcela de erros. Uma melhor avaliação é obtida por meio da matriz de erros (CENTENO, 2004; CORREA, 2003; TEN CATEN, 2008, SILVEIRA, 2010 e NOWATZKI, 2013).

Para Moreira *et al.* (2009) a matriz de erros (ou de confusão) identifica o erro global da classificação para cada grupo, mostrando também como se deram as confusões entre os mesmos. A matriz de erros é uma forma de representar as contradições entre a verdade de campo e o resultado do processo de classificação. Ou ainda, como no caso desta tese,

representar as diferenças entre um mapeamento preexistente convencional, com um mapeamento preditivo.

Segundo Centeno (2004), na matriz do QUADRO 10 são confrontadas duas situações: as linhas correspondem à classe do mapa de referência (preexistente) e as colunas à classe estimada no processo de classificação do novo mapa, ou seja, os valores das linhas representam as categorias do mapa de referência, as colunas categorias da predição, e os elementos da diagonal principal apresentam o nível de concordância entre os dois conjuntos de dados (valores de pixels).

QUADRO 10 – EXEMPLO DE UMA ESTRUTURA DE MATRIZ DE ERROS

CLASSES		PREDIÇÃO		
		1	2	∑ linha (l)
MAPEAMENTO PREEXISTENTE	1	Acerto (combinação 11)	Erro (combinação 12)	∑ l1
	2	Erro (combinação 21)	Acerto (combinação 22)	∑ l2
	∑ coluna (j)	∑ j1	∑ j2	∑ total pixels

A partir da matriz de erros é possível verificar os erros de omissão e os erros de inclusão entre os dois mapas analisados. Esses erros são elementos que servem para avaliar quanto uma classe foi subestimada ou superestimada. Os erros de omissão descrevem a precisão que determinada classe de um mapa foi definida e o quanto ela deixou de ser mapeada pelo modelo, enquanto a taxa de erros de inclusão indica quanto uma classe foi superestimada, ou seja, mapeada a mais pelo modelo (CENTENO, 2004; SILVEIRA, 2010).

Os erros de inclusão correspondem aos pixels que mesmo pertencendo à outra classe, foram incluídos na classe mapeada. Por exemplo: O *pixel* foi mapeado como UM-01 no mapa predito e que, no entanto, pertence a UM-02 no mapeamento preexistente. A Equação (22) apresenta a forma de se calcular o erro de inclusão:

$$Ein(i) = \frac{SC(j) - M(i,j)}{SC(j)} \quad (22)$$

onde:

$Ein(i)$  = erro de inclusão;

$SC(j)$  = soma parcial da coluna  $j$  da matriz de erros;

$M(i,j)$  = elementos da diagonal da linha  $i$  da matriz de erros.

Conforme destaca Silveira (2010), os erros de omissão são pixels que pertencem à classe que se deseja mapear, mas que foram erroneamente classificados como sendo de outra, ou seja, foram omitidos da classe. Exemplo pode ser percebido quando uma classe de UM-02 no mapa preexistente foi mapeada como UM-01 no mapa predito. A Equação 17 apresenta como os erros de omissão são obtidos.

$$Eom(i) = \frac{SL(i) - M(i,j)}{SL(i)} \quad (17)$$

onde:

$Eom(i)$  = erro de omissão;

$SL(i)$  = soma parcial da linha  $i$  da matriz de erros;

$M(i,j)$  = elementos da diagonal da linha  $i$  da matriz de erros.

Os erros de omissão e inclusão levam aos conceitos de exatidão do ponto de vista do produtor e de usuário (CENTENO, 2004; SILVEIRA, 2010), ou acurácia do mapeador e do usuário (TEN CATEN, 2008). Para estes autores, a acurácia do mapeador está associada aos erros de omissão e pode ser medida pela taxa de pixels corretamente classificados em cada classe. Quanto maior for essa taxa maior será o sucesso alcançado nas classes do mapa classificado em relação ao mapa de referência. São calculados conforme a Equação (23):

$$AM = \frac{M(i,j)}{SL(i)} \cdot 100 \quad (23)$$

Assim sendo, em uma matriz de erro em que de 100 pixels 80 foram classificados corretamente, o percentual da AM é de 80%.

Estes autores ainda destacam que a acurácia do usuário demonstra se determinada classe na imagem classificada corresponde a essa na imagem de referência, estando associado à taxa de erro de inclusão. Se não existirem erros de inclusão, então a matriz de erros apresentará valores apenas na diagonal, porém geralmente isso não ocorre. AU foi calculado por meio da Equação (24):

$$AU = \frac{M(i,j)}{SC(i)} \cdot 100 \quad (24)$$

#### 4.8.2 Índice Kappa

O índice (ou coeficiente) Kappa é um método muito utilizado para avaliar a concordância ao comparar dados espaciais, pois sua grande vantagem é que em seu cálculo são

incluídos todos os elementos da matriz de erro e não somente os elementos da diagonal principal, como é o caso da exatidão global (MOREIRA, 2001; HENGL *et al.*, 2007; TENCATEN, 2008; SILVEIRA, 2010).

O Kappa é uma medida de concordância como valor máximo o 1, onde este valor representa total concordância e os valores próximos ou abaixo de 0, indicam nenhuma concordância e sugere que a concordância encontrada foi menor do que aquela esperada pelo acaso. Portanto, a qualidade atingida numa classificação pode ser medido por este índice comparando o mapa preditivo com um mapa preexistente, conforme o QUADRO 11 na qual traz um exemplo hipotético.

QUADRO 11 – MATRIZ DE ERROS HIPOTÉTICA

CLASSES		PREDIÇÃO		
		1	2	∑ linha (l)
MAPEAMENTO PREEXISTENTE	1	1000	80	∑ l1 = 1080
	2	100	2000	∑ l2 = 2100
	∑ coluna (j)	∑ j1 = 1100	∑ j2 = 2080	∑ total = 3180

Nota-se que tiveram 1000 pixels corretamente classificados tanto na classe 1 do mapa preexistente quanto na predição. Já classes 2 com 2 tiveram 2000 pixels. Já os que não foram corretamente classificados foram os 100 que no mapa preexistente pertencem a classe 2 mas foi mapeado como 1 na predição. E por fim os 80 pixels da classe 1 do mapa foram classificados como 2 da predição.

Para a determinação do valor Kappa (K) emprega-se as Equações (25, 26 e 27) propostas por Cohen (1960) *apud* Centeno (2004) seguir:

$$K = \frac{Po - Pc}{1 - Pc} \quad (25)$$

sendo que:

$$Po = \sum_{i=1}^M \frac{n_{ij}}{N} \quad (26)$$

$$Pc = \sum_{i=1}^M \frac{n_i * n_j}{N^2} \quad (27)$$

onde:

Po = pixels corretamente classificados (mesmo valor da acurácia geral);

$P_c$  = proporção de unidades que concordam por casualidade;  
 $M$  = número de classes presentes na matriz de erro;  
 $n_{ij}$  = o número de observações na linha  $i$  e coluna  $j$  (corretamente classificados);  
 $n_i$  e  $n_j$  = totais marginais da linha  $i$  e coluna  $j$ , respectivamente;  
 $N$  = número total de unidades amostrais contempladas na matriz.

Sendo assim, com base na matriz do exemplo hipotético temos:

$$P_o = \frac{(1000 + 2000)}{3180} = \frac{3000}{3180} = \mathbf{0,94}$$

$$P_c = \frac{(1100 * 1080) + (2080 * 2100)}{3180^2} = \frac{1.188.000 + 4.368.000}{10.112.400} = \frac{5.556.000}{10.112.400} = \mathbf{0,54}$$

$$K = \frac{0,94 - 0,54}{1 - 0,54} = \frac{0,40}{0,46} = \mathbf{0,8696}$$

O índice Kappa desta análise comparativa é de 0,87, sendo que a partir deste índice é possível analisar, por meio de critérios qualitativos estabelecidos por Landis e Koch (1977) (QUADRO 12), a qualidade da imagem (*grid*), neste caso as geradas por TC e RL

QUADRO 12 – QUALIDADE DE CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O ÍNDICE KAPPA

<b>Coefficiente Kappa</b>	<b>Qualidade da imagem</b>
Inferior a 0,00	Péssima
0,01 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito boa
0,80 – 1,00	Excelente

Fonte: Adaptado de Landis e Koch (1977) e Silveira (2010)

Para Ten Caten (2008), os valores relatados pela literatura em testes de modelos preditivos aplicados ao mapeamento de solos considerados satisfatórios se encontram na ordem entre 0,30 a 0,60.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem por finalidade apresentar os dados gerados nesta pesquisa. Primeiramente foi organizado um acervo de todos os dados pedológicos que embasaram esta pesquisa, sejam eles em forma de polígonos ou pontos de controle; em seguida, foi apresentada a espacialização do setor de solos de planície fluvial na qual serviu para separar os setores norte e sul; caracterização geral dos atributos topográficos utilizados; predição dos solos por tabulação cruzada e por regressões logísticas; análises estatísticas descritivas e por fim a verificação de qualidade das predições em relação a mapeamentos preexistentes.

### 5.1 COMPILAÇÃO DOS DADOS PEDOLÓGICOS

Para melhor confiabilidade do mapeamento preditivo, foi imprescindível ter pontos de observação de campo, pois, além de proporcionar um melhor entendimento de como são distribuídos os solos na paisagem ao longo da área de estudo, essas amostras foram usadas na validação dos modelos gerados pelo método de regressões logísticas. Foram utilizados dois mapeamentos preexistentes distintos para a realização das verificações de qualidade dos modelos preditos.

Os dados pedológicos se referem tanto aos pontos de observações de campo realizadas por meio de trabalhos de campo<sup>29</sup> e de trabalhos preexistentes, quanto às informações do mapeamento pedológico de Fasolo *et al.* (1988), já apresentando o agrupamento para as duas unidades de mapeamento propostas nesta tese (FIGURA 31)<sup>30</sup>.

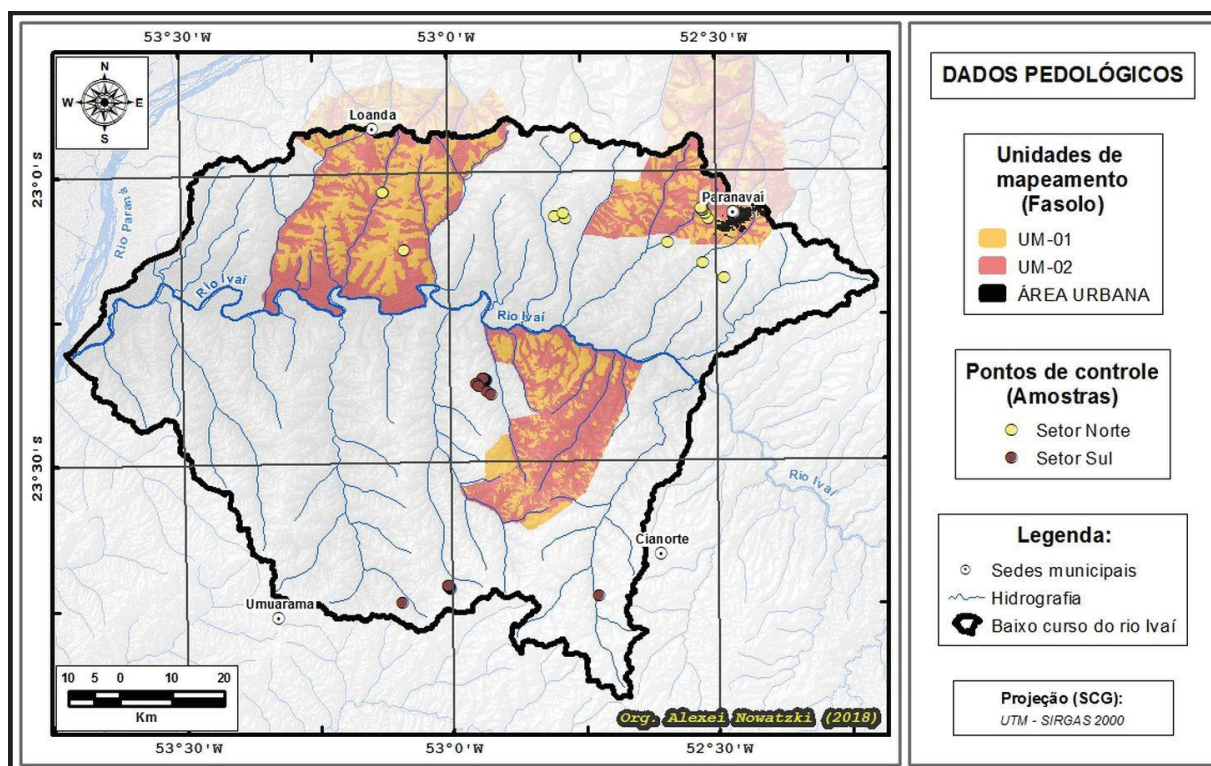
Convertendo a descrição original para a mais recente da SiBCS (EMBRAPA, 2018) correm na área de estudo: Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelhos, Argissolos Vermelho-Amarelos, Nitossolos Vermelhos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Flúvicos, Gleissolos Háplicos e Gleissolos Háplicos associados com Planossolos Háplicos.

---

<sup>29</sup> As descrições das observações de campo se encontram no Apêndice D.

<sup>30</sup> Pela escala de apresentação dessa figura, não é possível visualizar todos os pontos, pois muitos deles se situam em topossequências, ou são muito próximos um dos outros, por isso tem-se a impressão de que há menos pontos no mapa do que os que estão apresentados nos quadros sínteses do banco de dados pedológicos.

FIGURA 31 – DADOS PEDOLÓGICOS (UNIDADES DE MAPEAMENTO E PONTOS DE CONTROLE)

FONTE: Fasolo *et al.* (1988)

Pelas informações presentes no mapeamento de Fasolo *et al.* (1988), foi elaborado o QUADRO 13, na qual exibe as descrições originais, a conversão para o SiBCS atual e as unidades de mapeamento. O QUADRO 14 apresenta quais foram as classes de solos presentes em EMBRAPA (2007) enquadradas nas unidades de mapeamento. A TABELA 6 representa a quantificação total das áreas dos dois mapeamentos preexistentes em relação às duas unidades de mapeamento na área de estudo.

QUADRO 13 – DESCRIÇÕES ORIGINAIS, CONVERSÃO PARA O SIBICS E UNIDADE DE MAPEAMENTO

SIGLA ORIGINAL	DESCRIÇÃO ORIGINAL	SOLOS SiBCS (2018)	SIGLA SiBCS (2018)	UNIDADE DE MAPEAMENTO
Le <sub>1</sub>	LATOSSOLO VERMELHO ESCURO: A moderado textura areia ou areia franca/franco-arenosa	Latossolo Vermelho	LV	UM-01
Le <sub>2</sub>	LATOSSOLO VERMELHO ESCURO: A moderado textura areia franca ou franco-arenosa/franco-argilo-arenosa	Latossolo Vermelho	LV	UM-01

<b>SIGLA ORIGINAL</b>	<b>DESCRIÇÃO ORIGINAL</b>	<b>SOLOS SiBCS (2018)</b>	<b>SIGLA SiBCS (2018)</b>	<b>UNIDADE DE MAPEAMENTO</b>
Le <sub>3</sub>	LATOSSOLO VERMELHO ESCURO: A moderado textura franco-argilo-arenosa ou argila arenosa/argila arenosa ou argila	Latossolo Vermelho	LV	UM-01
Pe <sub>1</sub>	PODZOLICO VERMELHO-ESCURO: Latossólico A moderado textura areia ou areia franca/franco-arenosa ou franco-argilo-arenosa	Argissolo Vermelho	PV	UM-02
Pe <sub>2</sub>	PODZOLICO VERMELHO-ESCURO: A moderado textura areia ou areia franca/franco-arenosa ou franco-argilo-arenosa	Argissolo Vermelho	PV	UM-02
Pe <sub>3</sub>	PODZOLICO VERMELHO-ESCURO: A moderado textura franco-arenosa ou franco-argilo-arenosa	Argissolo Vermelho	PV	UM-02
Pe <sub>4</sub>	PODZOLICO VERMELHO-ESCURO: abrupto A moderado textura areia ou areia franca/franco arenosa ou franco-argilo-arenosa	Argissolo Vermelho	PV	UM-02
Pe <sub>5</sub>	PODZOLICO VERMELHO-ESCURO: abrupto A moderado textura areia ou areia franco-arenosa/franco-argilo-arenosa ou argila arenosa	Argissolo Vermelho	PV	UM-02
Pe <sub>6</sub>	PODZOLICO VERMELHO-ESCURO: abrupto A moderado textura areia ou areia franca/franco-argilo-arenosa	Argissolo Vermelho	PV	UM-02
PV <sub>1</sub>	PODZOLICO VERMELHO-AMARELO: A moderado textura areia ou areia franca/franco-argilo-arenosa	Argissolo Vermelho-Amarelo	PVA	UM-02
PV <sub>2</sub>	PODZOLICO VERMELHO-AMARELO: abrupto A moderado textura areia ou areia franca/franco-arenosa ou franco-argilo-arenosa	Argissolo Vermelho-Amarelo	PVA	UM-02
PV <sub>3</sub>	PODZOLICO VERMELHO-AMARELO: abrupto A moderado textura areia ou areia franca/franco-arenosa ou franco-argilo-arenosa	Argissolo Vermelho-Amarelo	PVA	UM-02
Tr	TERRA ROXA ESTRUTURADA: A moderado textura argilosa ou muito argilosa	Nitossolo Vermelho	NV	UM-02
Aq <sub>1</sub>	AREIAS QUARTZOSAS VERMELHA e AMARELAS: A moderado textura areia ou areia franca	Neossolo Quartzarênico	RQ	UM-02
Aq <sub>2</sub>	AREIAS QUARTZOSAS: A moderado textura areia	Neossolo Quartzarênico	RQ	UM-02
Aq <sub>3</sub>	AREIAS QUARTZOSAS HIDROMÓRFICAS: A moderado textura areia ou areia franca	Neossolo Quartzarênico	RQ	UM-02

SIGLA ORIGINAL	DESCRIÇÃO ORIGINAL	SOLOS SiBCS (2018)	SIGLA SiBCS (2018)	UNIDADE DE MAPEAMENTO
Aq <sub>4</sub>	AREIAS QUARTZOSAS VERMELHA e AMARELAS podzolizadas A moderado textura areia ou areia franca	Neossolo Quartzarênico	RQ	UM-02
Al	SOLOS ALUVIAIS: textura argilosa	Neossolo Flúvico	RY	PLANÍCIE FLUVIAL
Hgp <sub>1</sub>	GLEI POUCO HÚMICO: textura franco-argilosa ou argila.	Gleissolo Háptico	GX	PLANÍCIE FLUVIAL
Hgp <sub>2</sub>	ASSOCIAÇÃO DE GLEI POUCO HÚMICO: textura franco-argilosa ou argila + PLANOSSOLO textura areia/franco argiloso ou argila	Gleissolo Háptico	GX	PLANÍCIE FLUVIAL

FONTE: Adaptado de FASOLO *et al.* (1988).

QUADRO 14 – MAPEAMENTO EMBRAPA CLASSES NO 3º NÍVEL E UNIDADE DE MAPEAMENTO

SIGLA	DESCRIÇÃO	UNIDADE DE MAPEAMENTO
LVd	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico	UM-01
LVe	LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico	UM-01
PVd	ARGISSOLO VERMELHO Distrófico	UM-02
PVe	ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico	UM-02
NVd	NITOSSOLO VERMELHO Distrófico	UM-02
NVe	NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico	UM-02

FONTE: Adaptado de EMBRAPA (2007).

TABELA 6 – VALORES DE ÁREA DAS UM EM RELAÇÃO AOS DOIS SETORES PARA OS MAPEAMENTOS PREEXISTENTES

UM	NORTE (km <sup>2</sup> )	SUL (km <sup>2</sup> )	NORTE (%)	SUL (%)
<b>FASOLO</b>				
UM-01	581,64	178,92	47,3	28,5
UM-02	647,21	448,25	52,7	71,5
<b>Total</b>	<b>1.228,84</b>	<b>627,17</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<b>EMBRAPA</b>				
UM-01	2.163,49	1.972,49	60,6	39,6
UM-02	1.405,61	3.007,17	39,4	60,4
<b>Total</b>	<b>3.569,10</b>	<b>4.979,65</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

FONTE: Adaptado de FASOLO *et al.* (1988) e EMBRAPA (2007).

Para Fasolo *et al.* (1988) as duas unidades de mapeamento possuem distribuição homogênea no setor norte, porém no setor sul há um predomínio da UM-02, com 71,5%. No mapeamento da EMBRAPA, é possível notar que no setor norte há um destaque para a UM-01 (60,6%) enquanto que no setor sul os dados se apresentam de forma inversa (60,4% para a UM-02). A TABELA 7 representa a proporção geral (área total) das duas unidades para os dois mapeamentos.

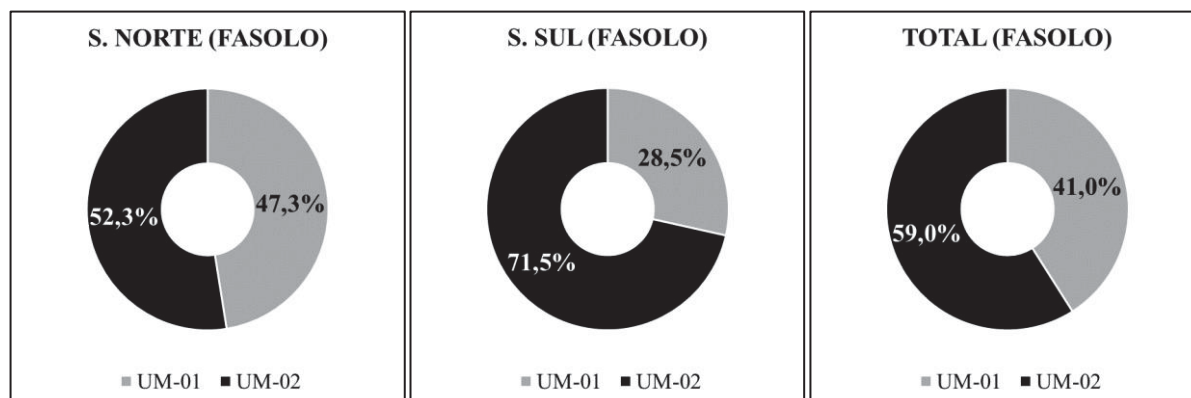
TABELA 7 – VALORES TOTAIS DAS UM - MAPEAMENTOS PREEXISTENTES

SETORES	UM-01 (km <sup>2</sup> )	UM-02 (km <sup>2</sup> )	UM-01 (%)	UM-02 (%)
<b>FASOLO</b>				
TOTAL NORTE E SUL	760,56	1.095,45	41,0	59,0
<b>EMBRAPA</b>				
TOTAL NORTE E SUL	4.135,98	4.412,77	48,4	51,6

FONTE: Adaptado de FASOLO *et al.* (1988) e EMBRAPA (2007).

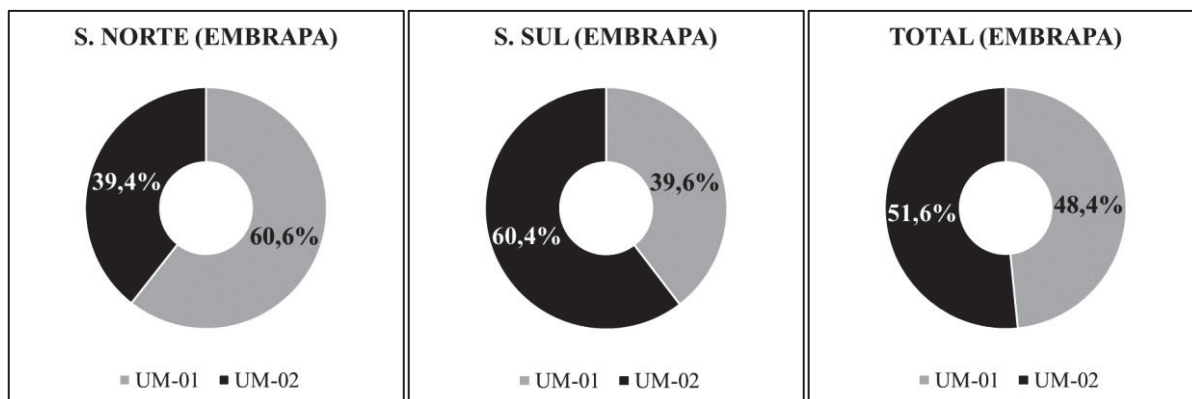
A proporção entre as duas unidades de mapeamento, evidenciou que a UM-02 possui maior distribuição no mapeamento do Fasolo *et al.* (1988), atingindo 59,0%. Para os dados da EMBRAPA, os valores ficaram bastante homogêneos com aproximadamente 50% para cada uma das UM. O GRÁFICO 1 sintetiza essas informações de proporção de área para o primeiro mapeamento e o GRÁFICO 2, o segundo.

GRÁFICO 1 – PROPORÇÃO DE ÁREA - MAPEAMENTOS DE FASOLO



Fonte: Adaptado de FASOLO *et al.* (1988)

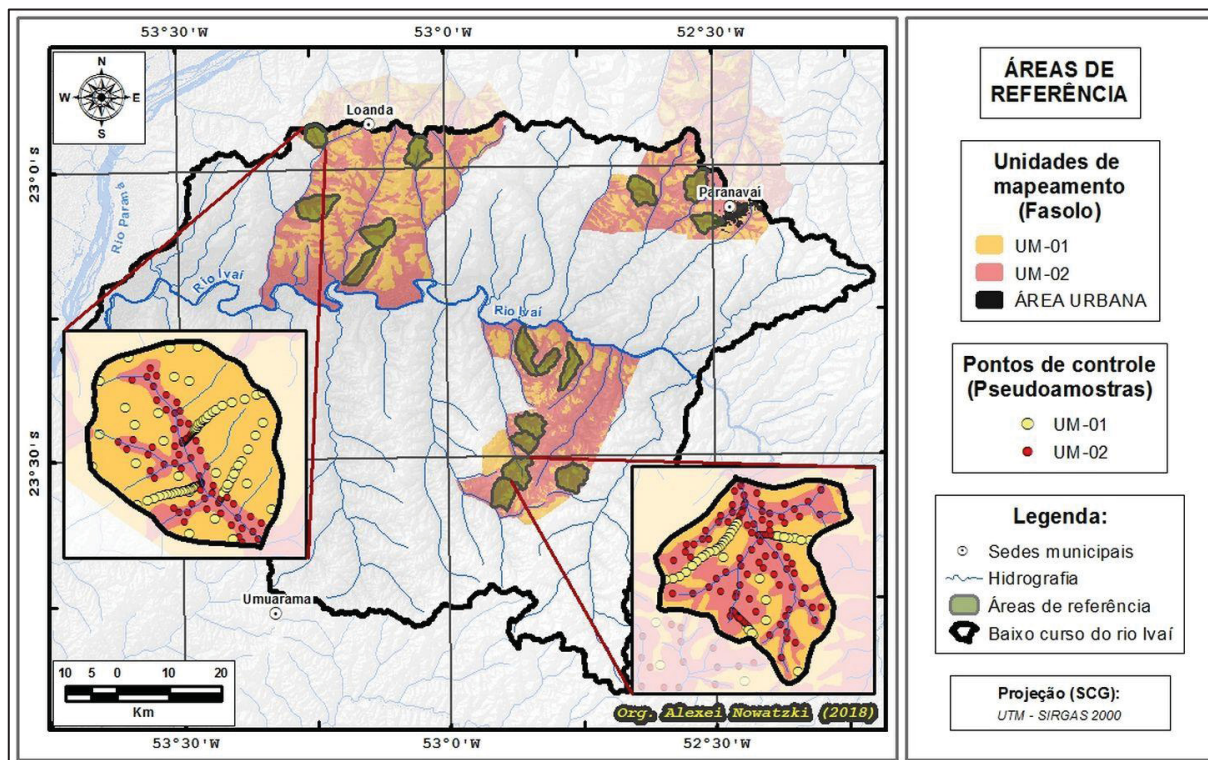
GRÁFICO 2 – PROPORÇÃO DE ÁREA - MAPEAMENTOS DA EMBRAPA



Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2007)

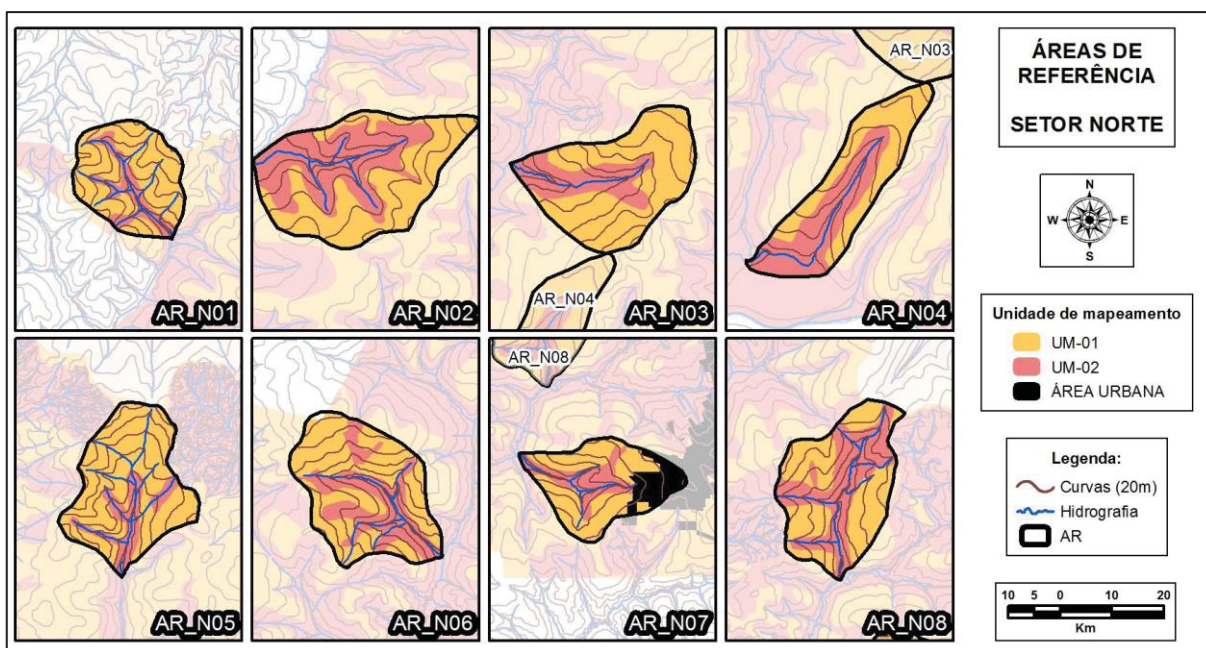
As sub-bacias utilizadas como áreas de referência estão ilustradas na FIGURA 32, sendo que foram no total 8 bacias para o setor norte e 8 para o setor sul. Para esta figura também foi feito o agrupamento das classes de solos conforme as duas unidades de mapeamentos propostas. Também há um detalhamento para duas áreas de referência (AR\_N01 e AR\_S06), na qual é possível notar a distribuição das pseudoamostras usadas nas predições de regressões logísticas.

FIGURA 32 – ÁREAS DE REFERÊNCIA



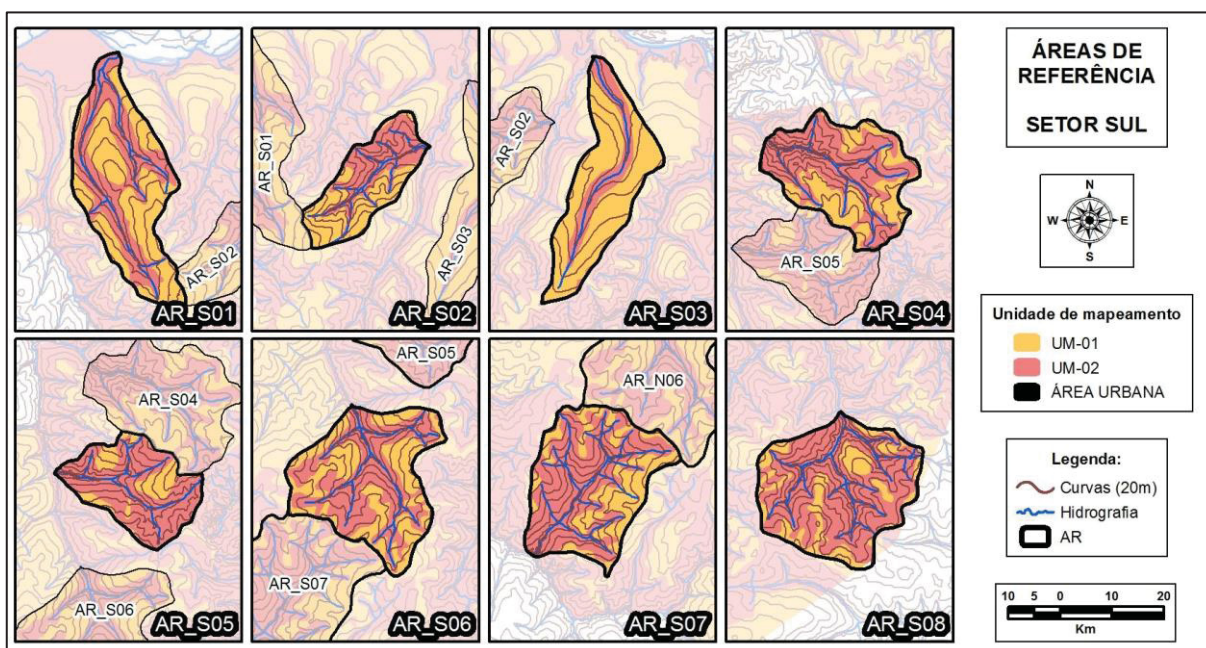
A FIGURA 33 e a FIGURA 34 ilustram as dezesseis sub-bacias (AR). Nota-se que para o setor norte há uma predominância da classe UM-01, enquanto que para o setor sul, há notável hegemonia da classe UM-02. Ao se analisar a área de estudo, totalizando os dois setores, temos um equilíbrio entre as duas UM (TABELA 8 e GRÁFICO 3).

FIGURA 33 – ÁREAS DE REFERÊNCIA DO SETOR NORTE (MAPEAMENTO DE FASOLO)



Fonte: Adaptado de FASOLO *et al.* (1988)

FIGURA 34 – ÁREAS DE REFERÊNCIA DO SETOR SUL (MAPEAMENTO DE FASOLO)



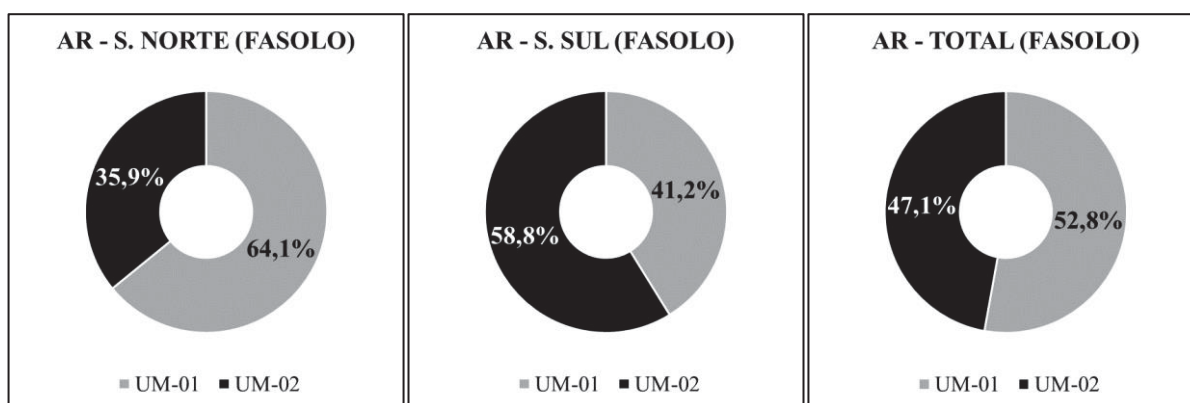
Fonte: Adaptado de FASOLO *et al.* (1988)

TABELA 8 – VALOR DE ÁREA (AR) - MAPEAMENTOS DE FASOLO

SETOR NORTE (N)						SETOR SUL (S)					
AR	km <sup>2</sup> TOTAL	UM-01		UM-02		AR	km <sup>2</sup> TOTAL	UM-01		UM-02	
		km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%			km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
AR_N01	13,9	10,8	77,3	3,2	22,7	AR_S01	22,1	11,5	52,3	10,5	47,7
AR_N02	27,8	14,4	51,8	13,4	48,2	AR_S02	11,0	5,3	47,8	5,8	52,2
AR_N03	22,0	15,9	72,3	6,1	27,7	AR_S03	17,2	12,9	75,3	4,2	24,7
AR_N04	17,8	8,8	49,5	9,0	50,5	AR_S04	18,2	6,4	35,1	11,8	64,9
AR_N05	19,4	15,7	80,6	3,8	19,4	AR_S05	13,5	2,9	21,8	10,6	78,2
AR_N06	21,7	13,6	62,9	8,0	37,1	AR_S06	22,4	9,9	44,2	12,5	55,8
AR_N07	13,8	10,3	89,4	3,5	10,6	AR_S07	22,3	7,6	33,9	14,8	66,1
AR_N08	20,1	10,8	53,6	9,3	46,4	AR_S08	24,3	5,7	23,4	18,5	76,6

Fonte: Adaptado de FASOLO *et al.* (1988)

GRÁFICO 3 – PROPORÇÃO DE ÁREA (AR) - MAPEAMENTOS DE FASOLO



Fonte: Adaptado de FASOLO *et al.* (1988)

A partir do somatório das informações de proporção de áreas, temos que as duas classes presentes nas áreas de referência estão com valores aproximados (47,1% para a UM-01 e 52,8% para a UM-02). Ao quantificar os valores de áreas foi possível também legitimar a informação que no setor norte há uma proporção maior da UM-01 nas AR pois apenas na AR\_N03 a proporção de UM-02 é maior. Em contrapartida, no setor sul apenas a AR\_S03 teve uma proporção de UM-02 inferior a da UM-01.

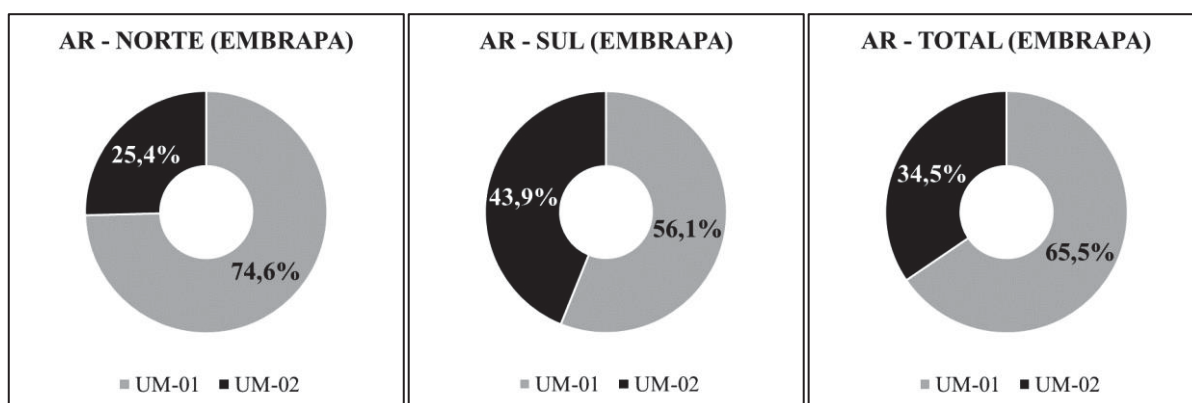
Também foi realizada uma quantificação das duas unidades de mapeamento das AR para o mapeamento da EMBRAPA (2007), conforme a TABELA 9 e o GRÁFICO 4.

TABELA 9 – VALOR DE ÁREA (AR) - MAPEAMENTOS DE EMBRAPA

SETOR NORTE (N)					SETOR SUL (S)						
AR	km <sup>2</sup> TOTAL	UM-01		UM-02		AR	km <sup>2</sup> TOTAL	UM-01		UM-02	
		km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%			km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
AR_N01	13,9	11,2	<b>80,5</b>	2,8	<b>19,8</b>	AR_S01	22,1	11,1	<b>50,2</b>	11,0	<b>49,7</b>
AR_N02	27,8	20,3	<b>73,1</b>	7,5	<b>26,9</b>	AR_S02	11,0	7,2	<b>65,3</b>	3,9	<b>35,1</b>
AR_N03	22,0	18,3	<b>83,0</b>	3,7	<b>16,9</b>	AR_S03	17,2	16,4	<b>95,2</b>	0,8	<b>4,7</b>
AR_N04	17,8	8,9	<b>50,1</b>	8,9	<b>49,8</b>	AR_S04	18,2	9,2	<b>50,4</b>	9,1	<b>49,8</b>
AR_N05	19,4	17,4	<b>89,5</b>	2,0	<b>10,5</b>	AR_S05	13,5	6,9	<b>51,3</b>	6,6	<b>48,7</b>
AR_N06	21,7	14,5	<b>66,6</b>	7,3	<b>33,4</b>	AR_S06	22,4	14,2	<b>63,6</b>	8,2	<b>36,5</b>
AR_N07	13,8	11,0	<b>79,8</b>	2,8	<b>20,2</b>	AR_S07	22,3	12,1	<b>54,4</b>	10,2	<b>45,8</b>
AR_N08	20,1	15,3	<b>76,1</b>	4,8	<b>23,9</b>	AR_S08	24,3	7,5	<b>30,9</b>	16,8	<b>69,1</b>

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2007)

GRÁFICO 4 – PROPORÇÃO DE ÁREA (AR) - MAPEAMENTOS DA EMBRAPA



Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2007)

A somatória para o setor norte foi de 74,6% para a UM-01 e 25,4% para a UM-02. Já para o setor sul foi de 56,1% (UM-01) e 43,9% (UM-02). Totalizando essas informações temos que 65,5% da área pertence à classe UM-01 e o restante (34,5%), a classe UM-02.

Nota-se que há uma menor distribuição da UM-02 no mapeamento da EMBRAPA, quando este mapeamento é comparado com os dados de Fasolo *et al.* (1988). Esta subestimação pode ser explicada pela diferença entre as escalas que ambos os mapeamentos foram realizados.

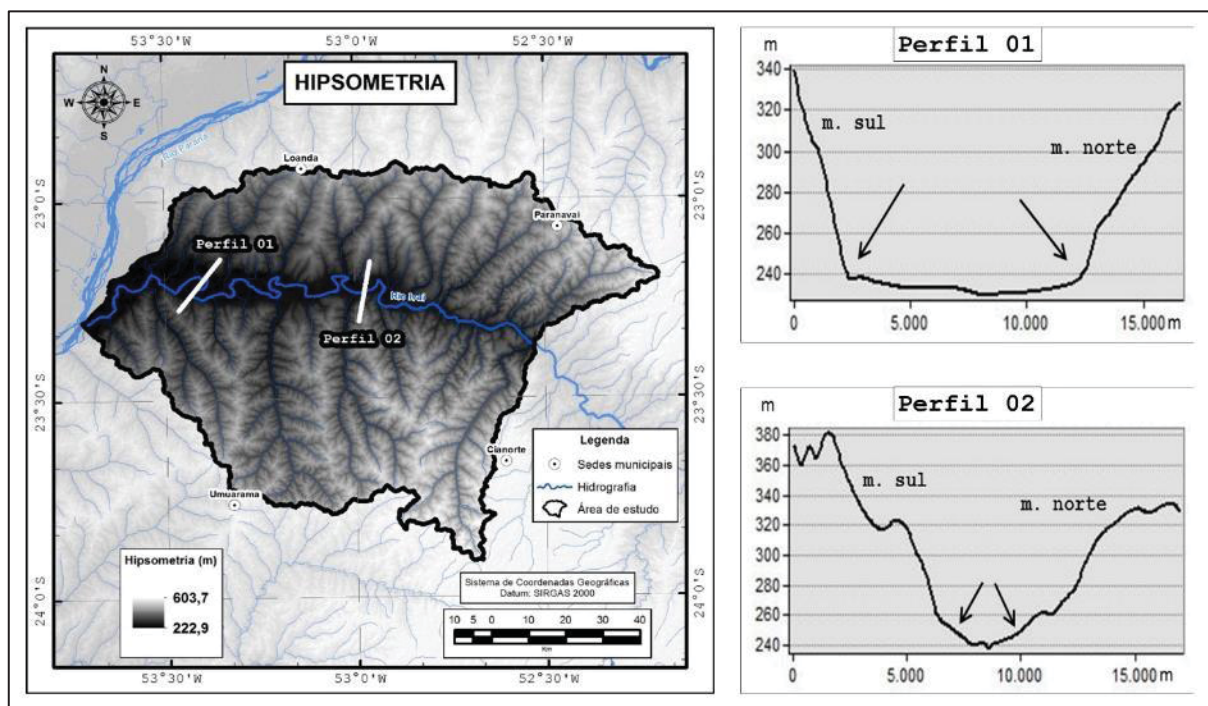
## 5.2 SETORIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Tomando por base a extensa planície fluvial do rio Ivaí, a área de estudo foi segmentada em três setores: norte (planalto), sul (planalto) e planície fluvial. Nos dois planaltos é onde há a passagem lateral Latossolos-Argissolos e na planície, solos característicos de ambientes hidromórficos.

Para a realização desta etapa, foram examinados diversos perfis transversais com valores de hipsometria e clinografia ao longo e selecionadas dois que representassem os limites dessa planície, conforme mencionado no capítulo de método.

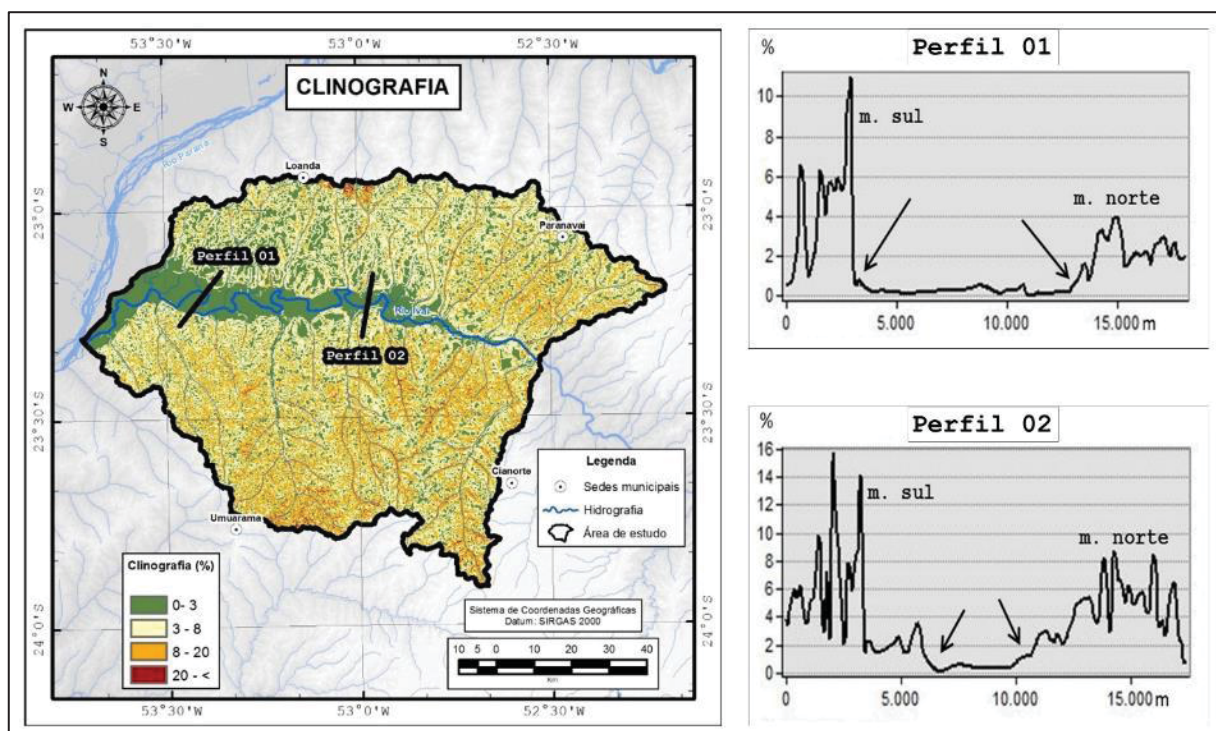
A análise hipsométrica do perfil transversal 01 (localizado à jusante do rio Ivaí) evidenciou o início e o fim da planície fluvial (250 m de altitude e extensão de 10 km aproximadamente). No perfil 02 a extensão da planície se mostrou bem menor (com cerca de 3 km apenas), por estar situado mais à montante em relação ao primeiro, conforme apontam as setas indicadas na FIGURA 35.

FIGURA 35 – PERFILS DE ANÁLISE HIPSOMÉTRICA



No que se refere a análise clinográfica dos perfis (FIGURA 36) os valores diminuem quando entra no contexto de planície fluvial, conforme indicam as setas. Os valores abaixo de 2% de clinografia indicam a início da planície fluvial e assim como na hipsometria, o perfil 01 apresentou uma extensão maior que o perfil 02.

FIGURA 36 – PERFIS DE ANÁLISE CLINOGRÁFICA



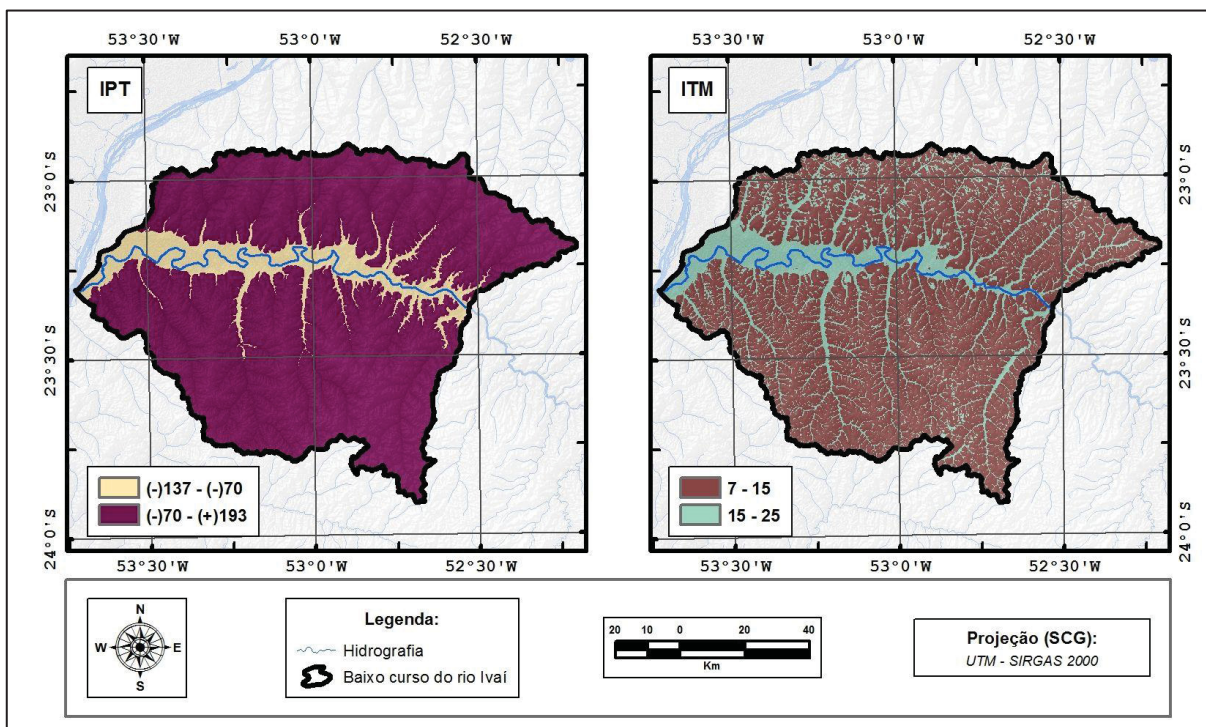
Nos setores de planalto os valores de clinografia nos dois perfis são em geral maiores no setor sul em relação ao setor norte, indicando que pode ocorrer maior distribuição de Argissolos, associados às declividades mais acentuadas em toda a região noroeste, evidenciado no SP- IV de Nakashima (1999) que se localiza na margem esquerda do rio Ivaí

A discretização do índice de posição topográfica e do índice topográfico de umidade modificado foi composta por duas classes: solos de planalto e solos de planície fluvial (TABELA 10 e FIGURA 37). Para o IPT a classe de planície teve o valor de 12,65% do total da AE, sendo que o valor da classe de planalto foi de 87,35%. Por sua vez, o ITM apresentou para a classe de planalto 74,75% do total da área, e a classe de solos de planície fluvial, 25,25%.

TABELA 10 – VALORES DE ÁREAS – SOLOS DE PLANALTO E PLANÍCIE FLUVIAL

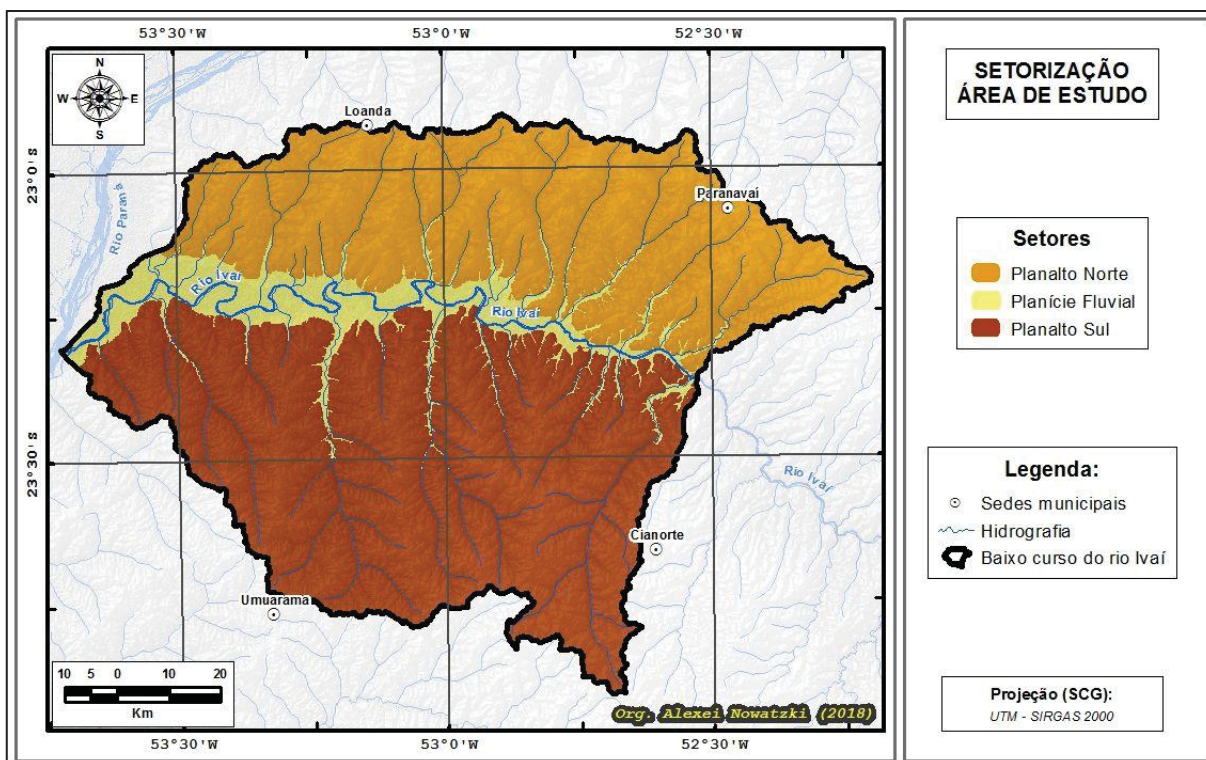
SOLOS	INTERVALOS	ÁREA (%)	ÁREA (km <sup>2</sup> )
<b>ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA (IPT)</b>			
Planície fluvial	-137 a -70	12,65	1.214,61
Planalto	-69 a +193	87,35	8.386,73
<b>Total</b>		<i>100,00</i>	<i>9.601,34</i>
<b>ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE MODIFICADO (ITM)</b>			
Planalto	7 - 15	74,75	7.176,78
Planície fluvial	16 - 25	25,25	2.424,56
<b>Total</b>		<i>100,00</i>	<i>9.601,34</i>

FIGURA 37 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS USADOS NA COMPARTIMENTAÇÃO DOS SOLOS DE PLANÍCIE FLUVIAL



A FIGURA 38 ilustra o resultado da integração por tabulação cruzada dos atributos IPT e ITM, na qual serviu como parâmetro para setorizar a área de estudo.

FIGURA 38 – SETORIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



O grupo de solos da planície fluvial (Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Organossolos) apresenta área de 1.053 km<sup>2</sup> (equivalente a 11% da área de estudo), enquanto que a classe de solos de planalto (Latosolos e Argissolos) tem 8.549 km<sup>2</sup> (89% da área), somados os setores de planalto norte e sul. A quantificação completa dos valores das áreas para cada um dos setores, bem como a contagem de pixels para cada um dos modelos utilizados se encontra na TABELA 11.

TABELA 11 – SETORES DA AE (VALORES DAS ÁREAS E QUANTIDADE DE PIXELS POR MODELO)

SETOR	ÁREA (km <sup>2</sup> )	ÁREA (%)	PIXELS MDT 20	PIXELS MDE 30	PIXELS MDE90
Planície	1052,58	11	2.631.483	1.169.758	138.226
Norte	3569,19	37	8.922.970	3.965.589	468.667
Sul	4979,57	52	12.448.914	5.532.839	653.889
Norte + sul	8548,75	89	21.371.884	9.498.428	1.122.556
<b>Total</b>	<i>9601,34</i>	<i>100</i>	<i>24.003.367</i>	<i>10.668.186</i>	<i>1.260.782</i>

Para checar a qualidade da setorização da área de estudo, foi realizada por meio da tabulação cruzada, primeiramente a integração do setor de planície fluvial com a espacialização dos Neossolos Flúvicos e Gleissolos do mapeamento realizado por Fasolo *et al.* (1988).

O valor de acurácia geral (AG) foi de 0,83, ou seja, concordância de 83,2%, sendo que os 16,8% foram as porções onde o setor de planície intersectou com classes de solos como Latossolos ou Argissolos.

A segunda checagem foi feita pela comparação com o mapa de EMBRAPA (2007) (planície fluvial combinados por tabulação cruzada com Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Organossolos), a AG foi de 0,60 (60% concordância e 40% de discordância).

Os valores de AG se mostraram maiores para o primeiro mapeamento e podem ser entendidos pois o segundo é apresentado em uma escala menos detalhada, portanto esses resultados eram os esperados na verificação de qualidade.

### 5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

Este item tem por finalidade apresentar em forma de valores contínuos, os seis atributos topográficos utilizados nesta tese para execução dos mapeamentos preditivos. Os atributos foram apresentados para cada um dos modelos usados (MDT 20, MDE 30 e MDE 90) e estão ilustrados em: FIGURA 39, FIGURA 40 e FIGURA 41.

FIGURA 39 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS (MDT 20)

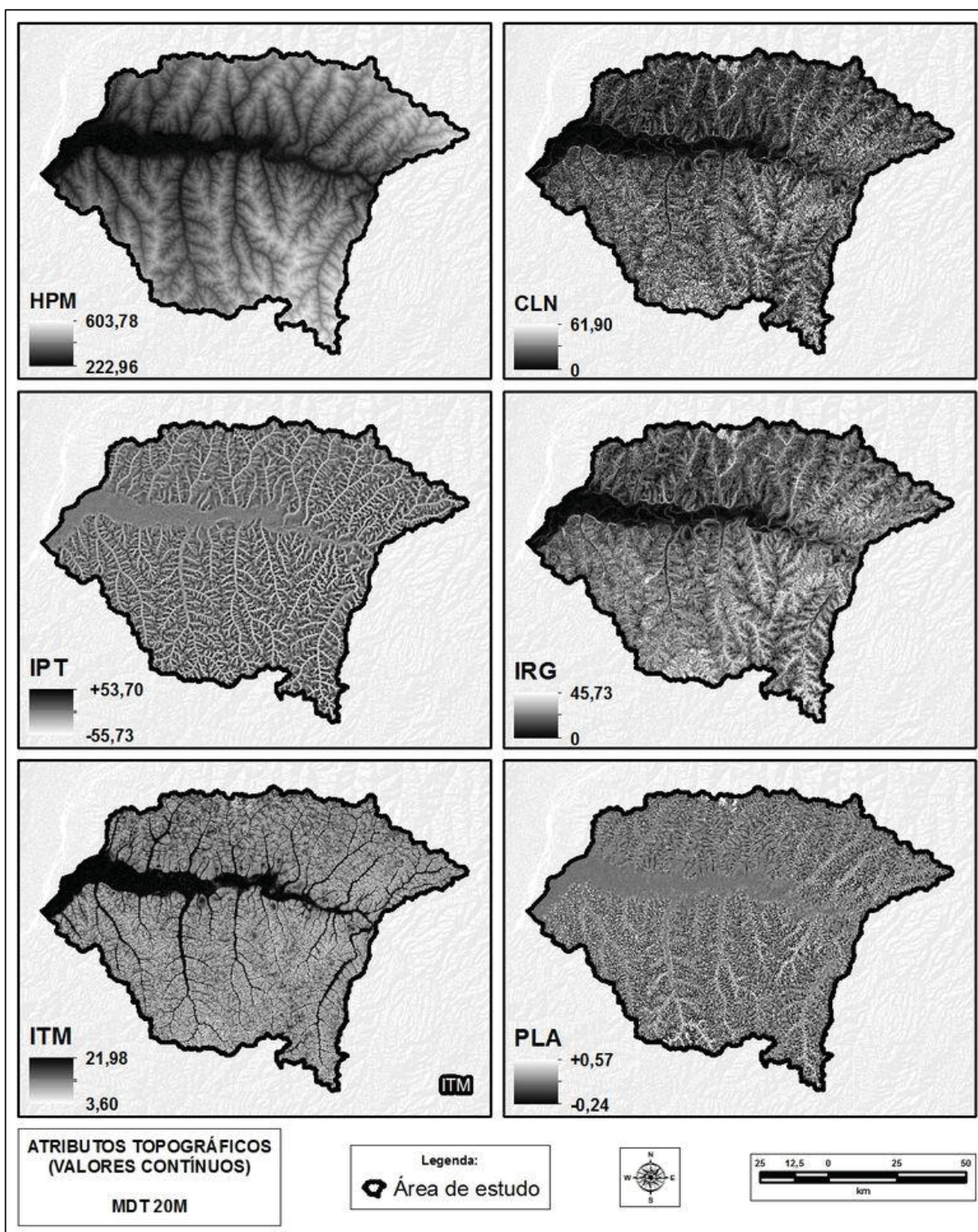


FIGURA 40 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS (MDE 30)

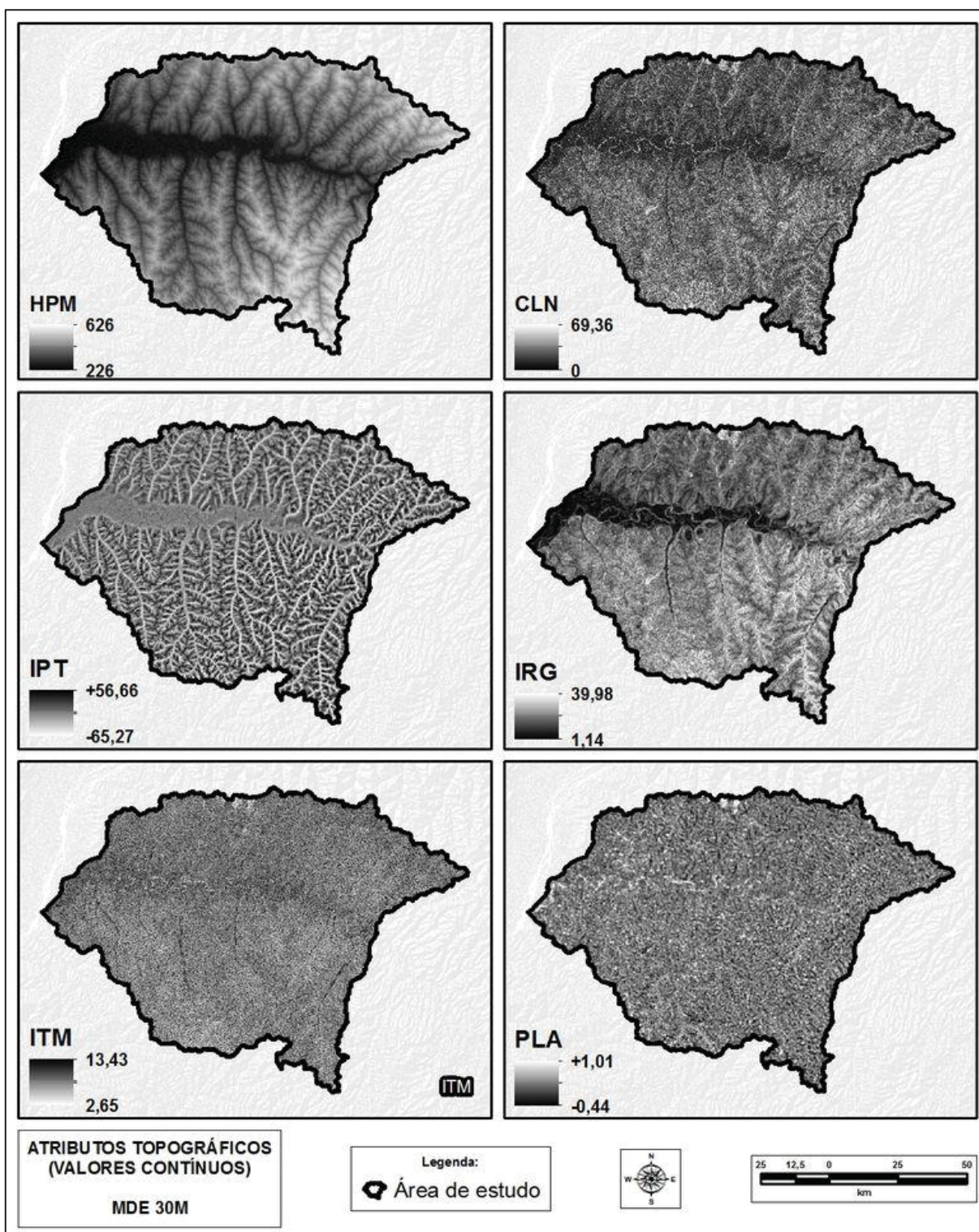
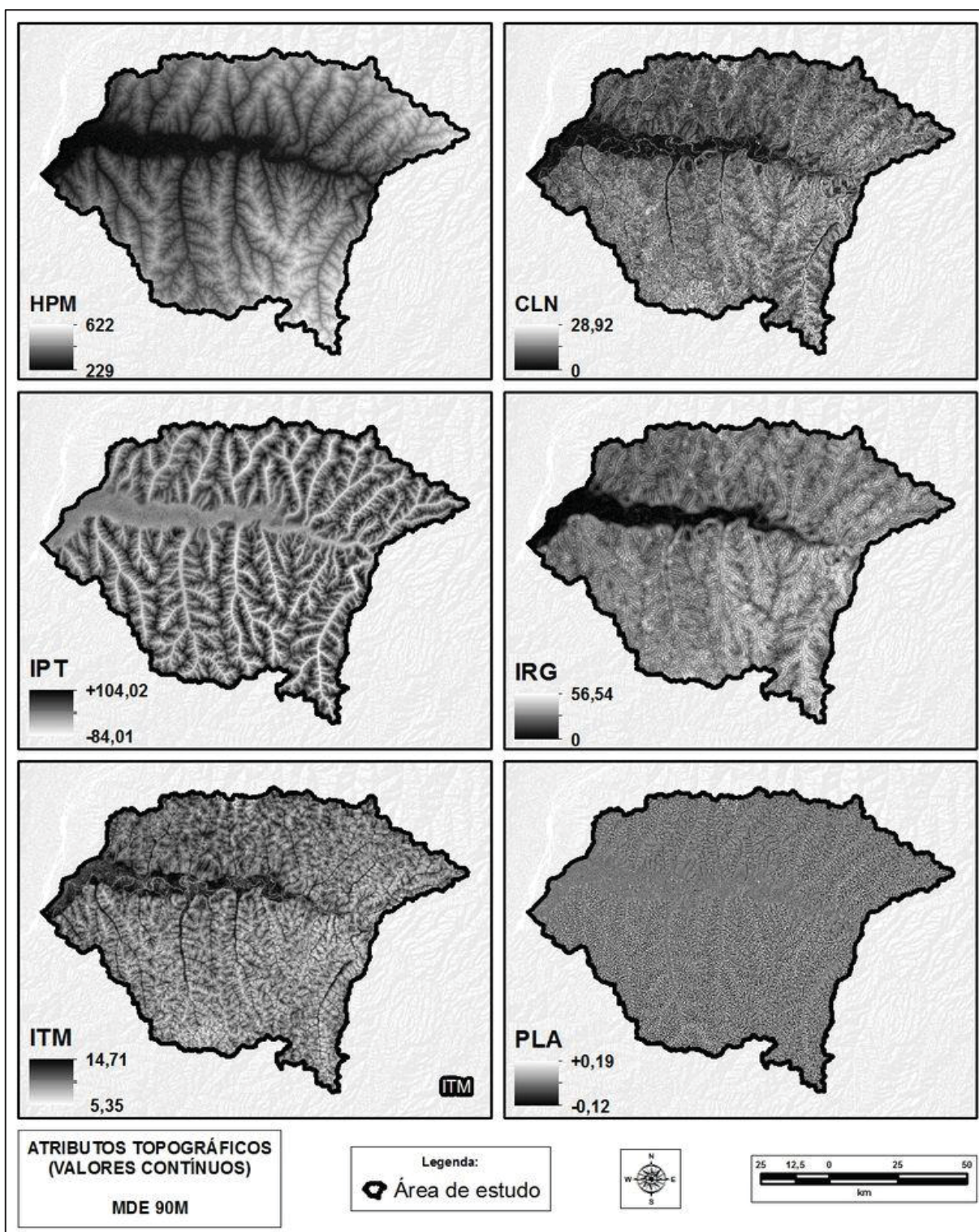


FIGURA 41 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS (MDE 90)



É importante salientar que os histogramas gerados para cada um dos AT (*software* ArcGis) estão presentes no Apêndice B, com todos os valores contínuos e os intervalos dos valores discretos usados nas predições por tabulação cruzada. Também é possível observar

dados estatísticos dos mesmos como: valores máximos e mínimos, somatória, média aritmética e desvio padrão. Os valores contínuos dos mesmos estão apresentados na TABELA 12.

TABELA 12 – VALORES CONTÍNUOS DOS AT PARA OS TRÊS MODELOS DIGITAIS

AT	M20		M30		M90	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
HPM	603,7	222,9	626,0	226,0	622,0	229,0
CLN	61,9	0,0	69,3	0,0	28,9	0,0
IPT	53,7	-55,7	56,6	-65,2	104,0	-84,0
IRG	45,7	0,0	39,9	1,1	56,5	0,0
ITM	21,9	3,6	13,4	2,6	14,7	5,3
PLA	0,57	-0,24	1,0	-0,4	0,1	-0,1

O atributo primário hipsometria permitiu a visualização da variação altimétrica da área de estudo, evidenciando deste modo, a planície aluvial do rio Ivaí, que ocupa os menores valores, na qual contribuiu para setorizar o compartimento de solos de planície fluvial e os maiores valores nas proximidades dos principais divisores da área de estudo.

A clinografia apresentou grande variação entre os três modelos (como no M30 que chegou na máxima de 69%), entretanto os valores médios da AE para os três se apresentam em torno de 5 ou 6% evidenciando a homogeneidade do relevo, ou seja, vertentes com baixo declive de um modo geral, sobretudo no setor norte. Nota-se uma distribuição de valores maiores no setor sul da área de estudo, influenciando deste modo a proporção da distribuição das UM.

O IPT apresentou informações que variam a partir de valores negativos na qual representou porções de terços médios a inferiores de vertentes, onde há ocorrência de Argissolos, e os valores positivos os divisores (ocorrência de Latossolos). Os valores próximos de zero compreendem áreas com declives constantes, evidenciando assim a extensa planície do rio Ivaí e as porções da vertente onde não há variação da clinografia. Cabe destacar que o M20 apresentou a menor variação dos valores de IPT, enquanto que o M90 foi a maior.

Os resultados obtidos com a aplicação do índice de rugosidade do terreno mostraram áreas com concentração de formas semelhantes do relevo como porções de alta clinografia pois diferentemente desta que mostra um resultado pontual, ele permite apresentar a generalização (ou regionalização) dos dados. Assim como na clinografia, é possível notar nos três modelos a distribuição dos maiores valores no setor sul, podendo com isso contribuir no mapeamento de solos presentes na UM-02.

Para o ITM é possível destacar que os valores mais altos ocorrem na planície fluvial do rio Ivaí, assim como algumas regiões com drenagens mais representativas. Portanto, além

desse índice ter sido fundamental para a delimitação do setor de solos de planície fluvial da AE também contribuiu para distinguir porções de UM-01 (topos com pouca umidade no solo) de UM-02 (fundos de vale com maiores índices de umidade no solo).

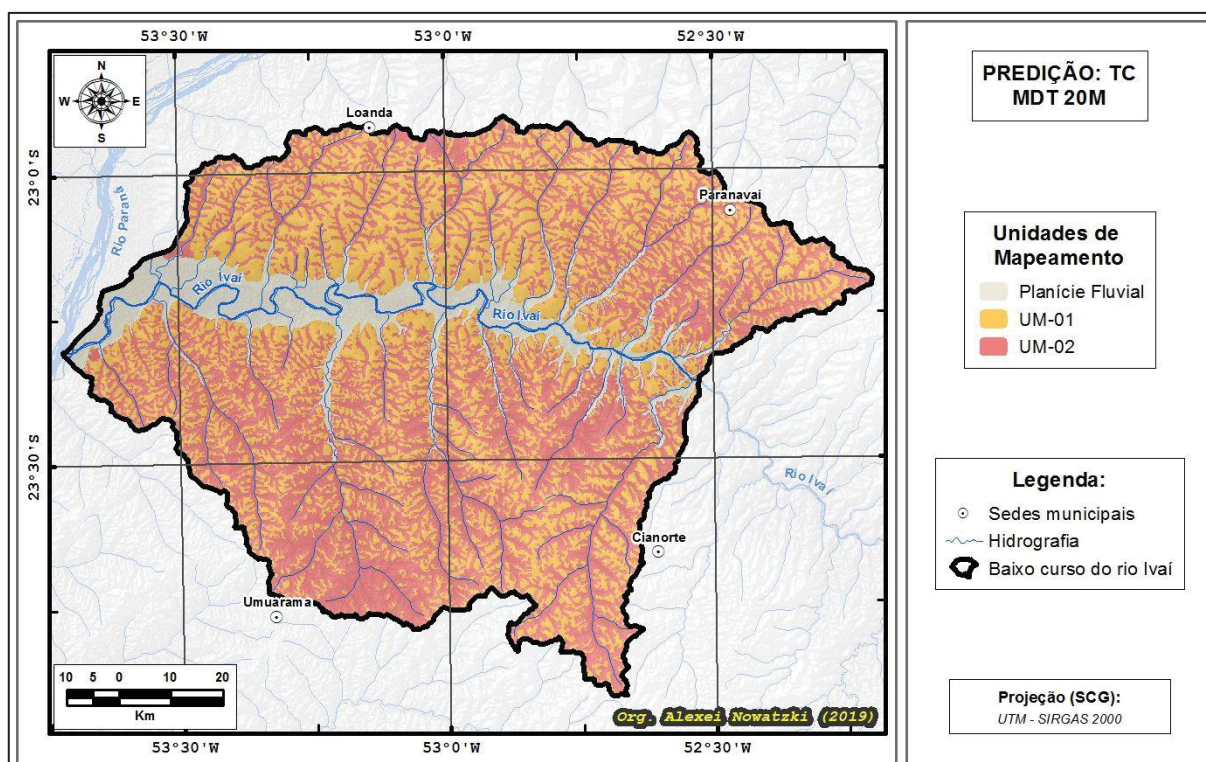
O último AT utilizado foi o plano de curvatura e para as predições propostas nesta tese foi importante realizar o tratamento de generalização, pois com isso as porções com convergência nas vertentes ficaram mais evidenciadas e com isso permitiu espacializar porções onde há distribuição da UM-02. As demais áreas (como as divergentes), que possuem valores positivos neste índice, se enquadram no UM-01.

#### 5.4 PREDIÇÃO DOS SOLOS POR TABULAÇÃO CRUZADA

Por meio da operação de tabulação cruzada foram obtidas duas classes de unidades de mapeamento (UM-01 e UM-02) que foram geradas a partir de três modelos digitais distintos (FIGURA 42, FIGURA 43 e FIGURA 44). Essas UM representam porções semelhantes do relevo no que tange tanto as características da vertente quanto a distribuição das principais classes de solos. A classe de planície fluvial foi incluída posteriormente em todas as predições, preenchendo deste modo a área de estudo.

A classe UM-01 foi gerada pelas classes de menor valor dos atributos topográficos, sendo eles a clinografia, o índice de rugosidade do terreno e o índice topográfico de umidade modificado, e pelos maiores valores do índice de posição topográfica e do plano de curvatura. Para a geração do UM-02 foram usadas discretizações opostas, como por exemplo a classe de clinografia com valores acima de 10%. As ilustrações com os atributos topográficos discretizados se encontram no Apêndice C. A FIGURA 42 ilustra a predição das UM a partir do MDT de 20 metros.

FIGURA 42 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR TC – MDT 20



Para a predição do modelo digital de 20 metros (TABELA 13 e GRÁFICO 5) houve proporção balanceada duas unidades de mapeamento para o setor norte, porém no setor sul a classe UM-02 teve 64%, corroborando com a espacialização dos mapeamentos preexistentes na área de estudo, na qual apontam que esta UM é a mais representativa para este setor. A somatória dos valores de área para os dois setores evidenciou que a classe mais abundante é a UM-02, com 58% de distribuição na AE.

TABELA 13 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M20 (TC)

UM	PIXELS	km <sup>2</sup>	%
<b>NORTE</b>			
UM-01	4.530.502	1.812,20	50,77
UM-02	4.392.468	1.756,99	49,23
Σ	8.922.970	3.569,19	100,00
<b>SUL</b>			
UM-01	4.411.012	1.764,40	35,43
UM-02	8.037.902	3.215,16	64,57
Σ	12.448.914	4.979,57	100,00
<b>TOTAL</b>			
UM-01	8.941.514	3.576,61	41,84
UM-02	12.430.370	4.972,15	58,16
Σ	21.371.884	8.548,75	100,00

Foi constatado que os segmentos de fundo de vale, mapeados como UM-02, tiveram bastante influência do atributo IPT, na qual foi possível observar os polígonos que acompanham as principais drenagens da AE. Neste contexto geomorfológico, o ITM também contribuiu para uma melhor distinção entre as duas classes de UM. O plano de curvatura influenciou na espacialização das zonas de convergência nas vertentes, e pelo fato do M20 ser o modelo mais detalhado, foi possível prever com maior precisão, em relação aos outros modelos, as áreas com UM-02, pois nota-se a quantidade de segmentos que acompanham as drenagens de primeira e segunda ordem de hierarquia fluvial. Os atributos clinografia e IRG foram efetivos para melhorar o mapeamento preditivo nas porções onde seus valores são mais elevados (classe UM-02), corroborando com as informações dos trabalhos supramencionados anteriormente sobre a distribuição dos solos no noroeste paranaense que tomam por base níveis de clinografia para identificar porções da vertente onde há transição de classes solos.

A predição realizada com o modelo de 30 (FIGURA 43) metros apresentou resultados semelhantes ao M20 em relação a quantificação e proporção das áreas dos dois UM (TABELA 14 e GRÁFICO 5).

FIGURA 43 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR TC – MDE 30

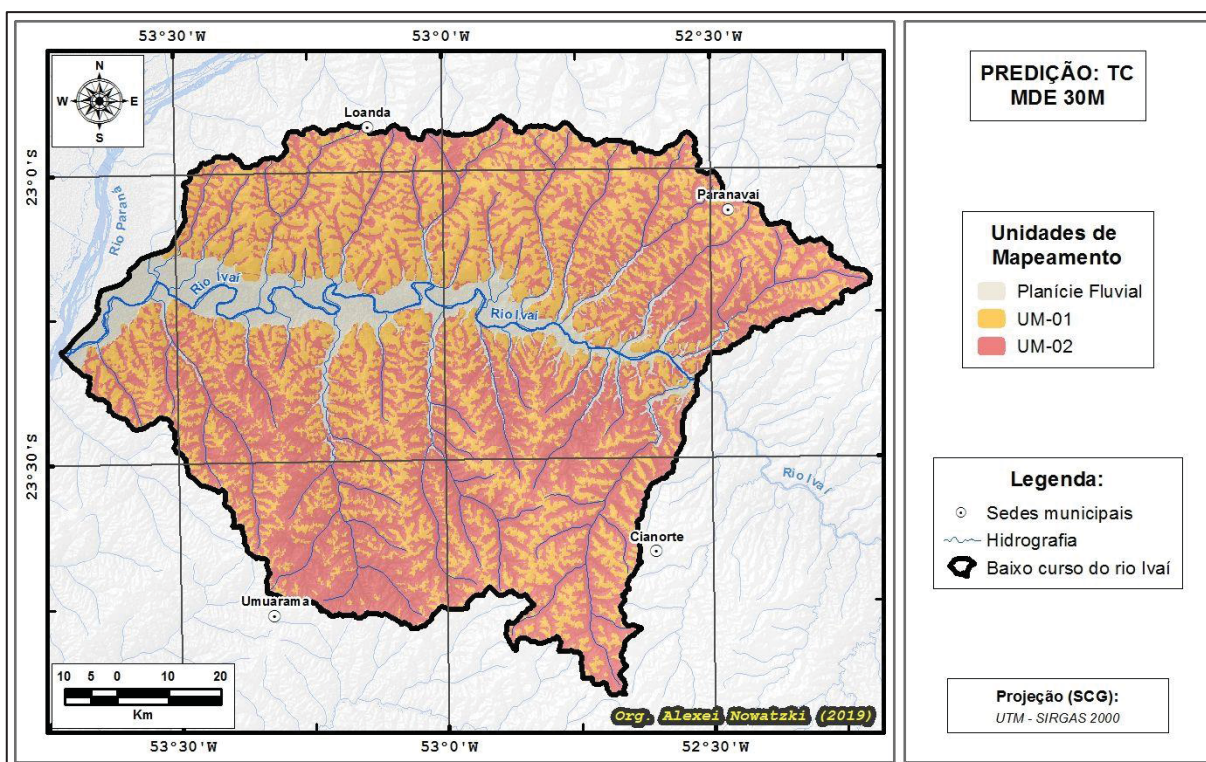


TABELA 14 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M30 (TC)

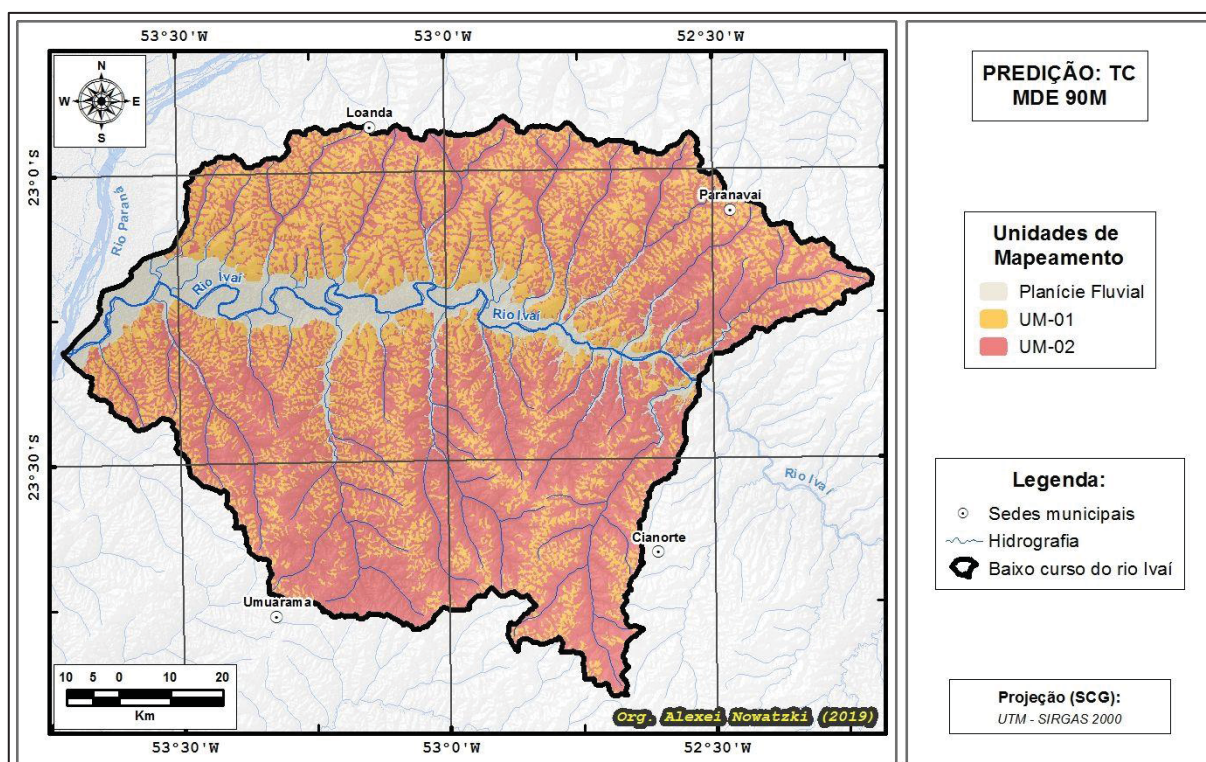
UM	PIXELS	km <sup>2</sup>	%
<b>NORTE</b>			
UM-01	2.004.963	801,99	50,56
UM-02	1.960.626	784,25	49,44
$\Sigma$	3.965.589	1.586,24	100,00
<b>SUL</b>			
UM-01	1.921.425	768,57	34,73
UM-02	3.611.414	1.444,57	65,27
$\Sigma$	5.532.839	2.213,14	100,00
<b>TOTAL</b>			
UM-01	3.926.388	1.570,56	41,34
UM-02	5.572.040	2.228,82	58,66
$\Sigma$	9.498.428	3.799,37	100,00

As mesmas proporções destacadas no M20 ocorreram na predição M30, ou seja, setor norte balanceado e setor sul com predominância do UM-02, o que resultou em proporções semelhantes com a somatória dos dois setores, evidenciando os 58% da UM-02.

Este modelo preditivo criou polígonos um pouco mais generalizados que o M20, principalmente em função do tamanho da sua célula de 30 metros e pelo fato de que os MDT são gerados com informações de hidrografia, o que acaba valorizando as porções de fundo de vale, influenciando diretamente na elaboração dos atributos topográficos e consequentemente nos mapeamentos pedológicos preditivos. O atributo IPT teve importante participação na predição, pois mesmo sendo menos detalhado que o do M20, conseguiu mapear porções de terços médios e inferiores das vertentes (UM-02), assim como o plano de curvatura. O IRG influenciou bastante no mapeamento, ficando evidente na forma dos polígonos em virtude da generalização das formas de relevo que este atributo consegue detectar. Os índices CLN e ITM apresentaram uma espacialização bastante dispersa (polígonos pequenos) o que acabou influenciando menos no mapeamento final, tendo em vista que esses dados dispersos acabam sendo generalizados nas operações de aplicação da área mínima mapeável.

Para o MDE de 90 metros (FIGURA 44) foram encontrados valores diferenciados em relação às duas predições anteriores. Os valores da UM-02 foram ainda maiores nos dois setores (TABELA 15 e GRÁFICO 5), sobretudo no setor sul, alcançando os 72%.

FIGURA 44 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR TC – MDE 90

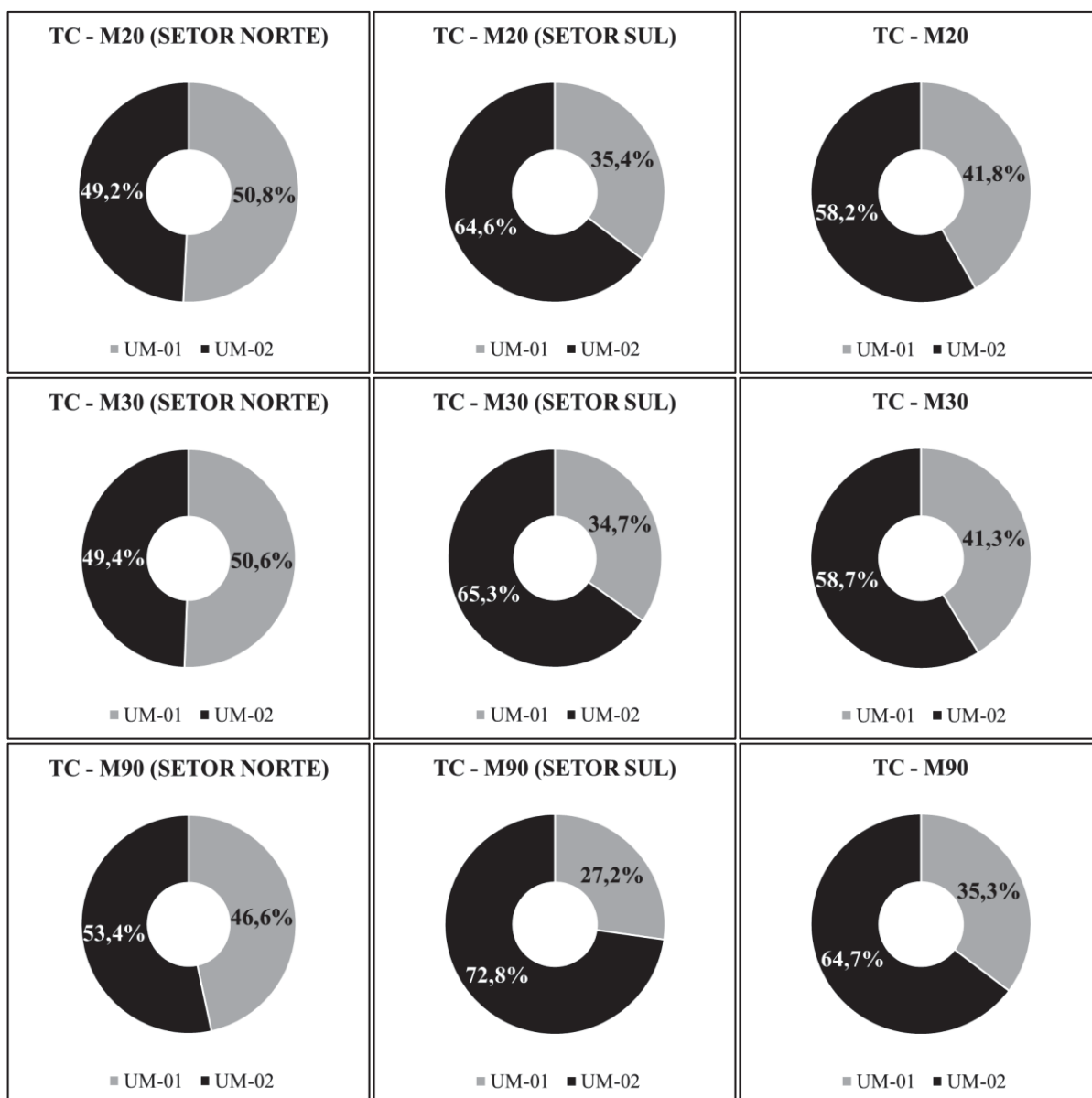


Pelo fato de o modelo de 90 metros ser o menos detalhado dos três, eram esperados resultados discrepantes em relação aos dois modelos anteriormente apresentados. Nota-se que os atributos CLN, IPT e IRG foram os que obtiveram melhor contribuição na espacialização das UM. Os atributos ITM e PLA tiveram seus dados bastante dispersos e acabaram sendo na maioria generalizados no processo da aplicação da AMM.

TABELA 15 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M90 (TC)

UM	PIXELS	km <sup>2</sup>	%
<b>NORTE</b>			
UM-01	218.497	87,40	46,62
UM-02	250.170	100,07	53,38
Σ	468.667	187,47	100,00
<b>SUL</b>			
UM-01	178.056	71,22	27,23
UM-02	475.833	190,33	72,77
Σ	653.889	261,56	100,00
<b>TOTAL</b>			
UM-01	396.553	158,62	35,33
UM-02	726.003	290,40	64,67
Σ	1.122.556	449,02	100,00

GRÁFICO 5 – PROPORÇÃO DAS ÁREAS – M20, M30 E M90 (TC)



Os valores de área mostram que os resultados dos modelos e 20 e 30 metros são semelhantes em função de suas resoluções espaciais. Entretanto, a predição realizada com o M90 foi mais discrepante, sobretudo pelo tamanho da célula que influencia diretamente na elaboração dos atributos topográficos, a exemplo da clinografia, que acaba deixando de espacializar feições (vertentes inclinadas) que influenciariam diretamente no mapeamento caso a célula fosse menor. A FIGURA 45 e a FIGURA 46 ilustram a diferença entre as duas espacializações (UM), preditas pelos três modelos propostos e também pelo mapeamento de Fasolo *et al.* (1988). A primeira ilustra a área de referência AR\_N01 e a segunda a AR\_S06.

FIGURA 45 – PREDIÇÃO DAS UM POR TC – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DIGITAIS (AR\_N01)

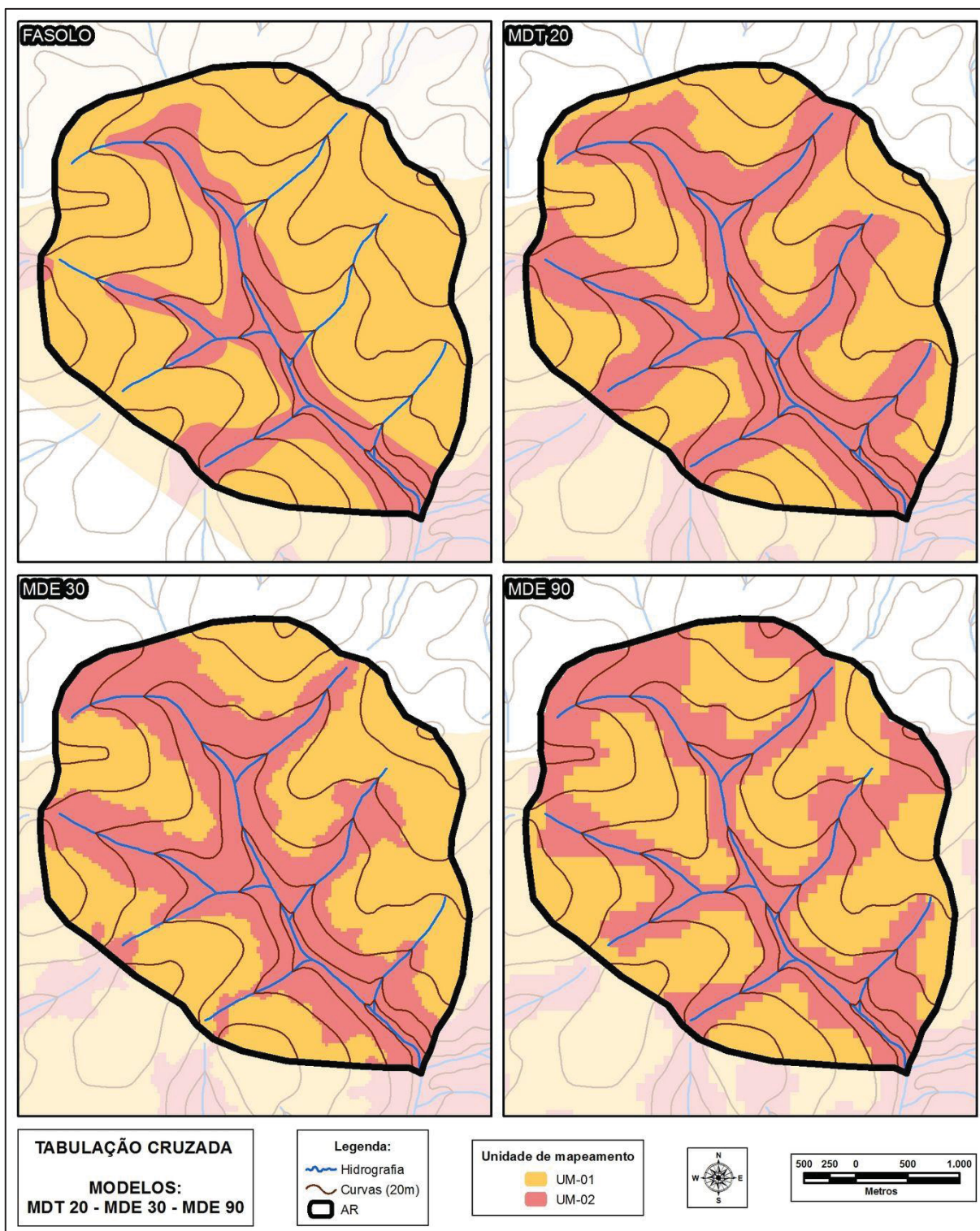
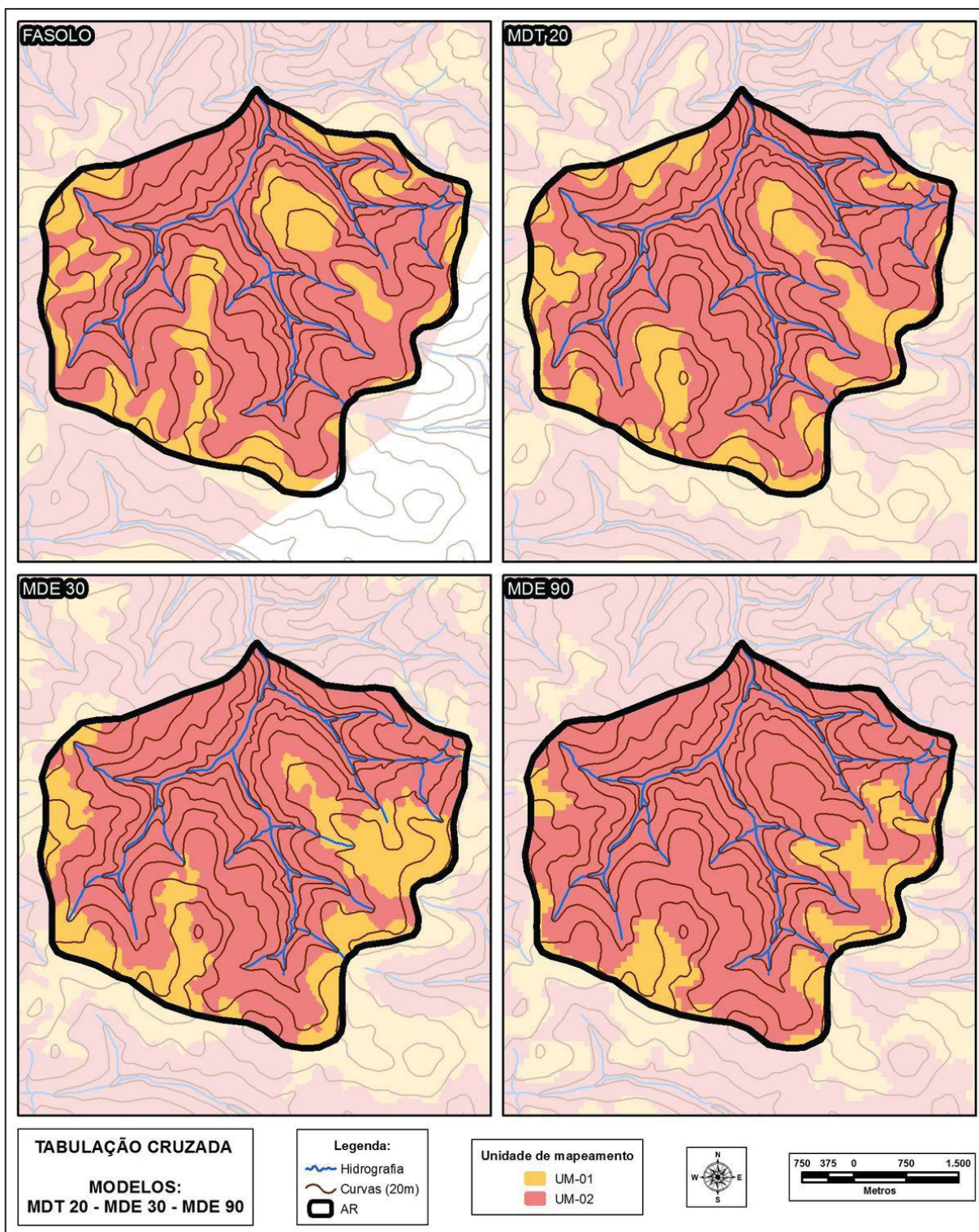


FIGURA 46 – PREDIÇÃO DAS UM POR TC – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DIGITAIS (AR\_S06)



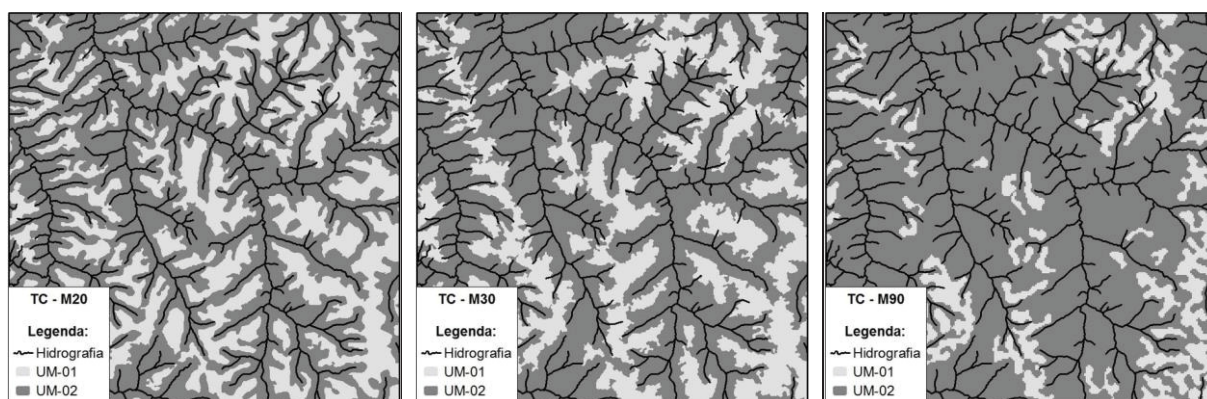
É possível notar que a predição M20 criou limites dos polígonos mais condizentes com as características do terreno (bordas suavizadas) do que os outros dois modelos, especialmente pelo fato de ser construído a partir de uma base cartográfica consistente e detalhada.

Em comparação com o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988) na AR\_N01, esta predição possibilitou ganho de informação, pois algumas feições pertencentes a classe UM-02 foram mapeadas onde no mapeamento preexistente está como UM-01, sendo que pelas curvas de nível não há potencialidade de ocorrência de Latossolos. Tomando por base a análise das curvas, do lado direito da AR há mapeado nos fundos dos vales a classe UM-02, entretanto, do lado esquerdo a disposição das curvas de nível é bastante semelhante ao lado direito, e desta maneira, no processo de elaboração dos atributos topográficos, tenha ocorrido o mapeamento desta feições que se enquadram na classe UM-02. Nestas situações faz-se necessária a conferência em campo.

Em se tratando da AR\_S06, observa-se que no mapeamento preexistente em questão, assim como no setor sul de um modo geral, a classe UM-02 predomina, sobretudo pelo fato do relevo ser mais movimentado quando comparado ao setor norte. A classe UM-01 encontra-se presente apenas nos topos e os modelos de 20 e 30 puderam mapear com precisão essas áreas. O M90 resultou em uma predição mais generalizada, estabelecendo, portanto, áreas maiores de UM-02.

Através da FIGURA 47 foi possível evidenciar essa generalização que ocorre com os dois modelos digitais de elevação ao se comparar com a predição M20 (MDT). O modelo de 90 metros cria polígonos maiores em comparação com os outros dois, deixando de mapear algumas feições de UM-01, como terços superiores de vertentes. As diferenças entre os modelos de 20 e 30 metros são menores, contudo é possível observar mesmo assim que os polígonos de UM-02 são maiores no modelo de 30.

FIGURA 47 – DIFERENÇAS ENTRE OS MODELOS (GENERALIZAÇÃO DOS MDE)

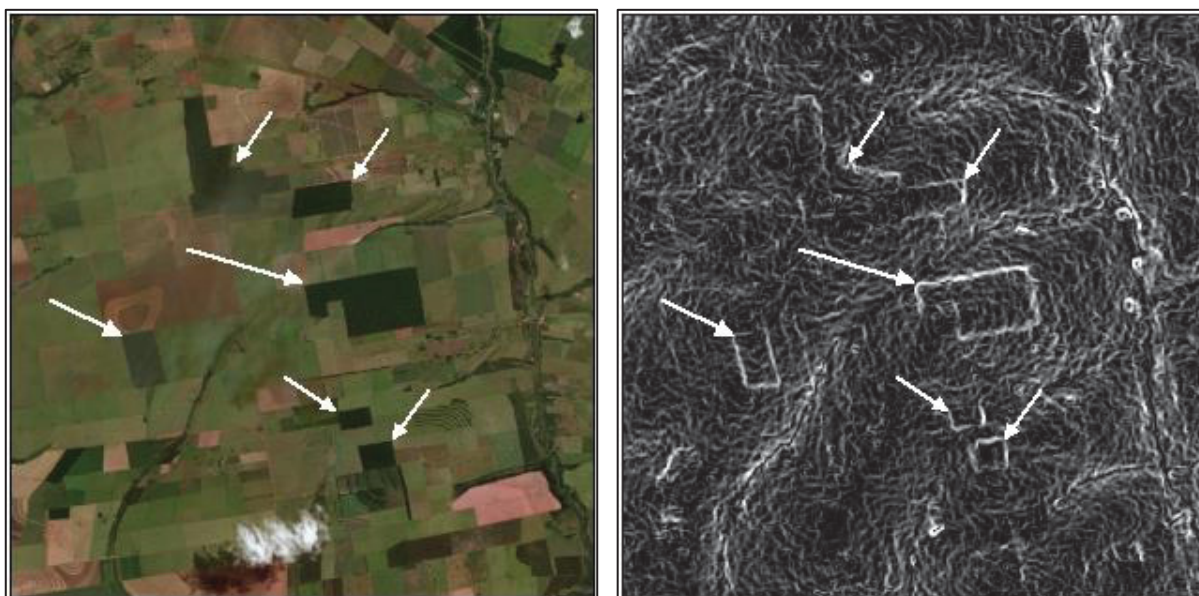


Assim como as generalizações, outra desvantagem do uso dos MDE é que os sensores detectam toda superfície e objetos acima do solo, como construções, áreas florestais, entre outros, enquanto que os MDT ficam restritos apenas as rugosidades do terreno. Em trabalhos

de mapeamentos digitais de solos, com a elaboração de atributos topográficos, alguns ruídos são detectados pelos MDE e acabam influenciando nos produtos preditivos finais.

Como exemplo, a FIGURA 48 apresenta por meio de imagem de satélite áreas no setor norte da AE que contêm algumas áreas florestadas em meio a outros usos, como agrícola ou pecuária. As bordas dessas áreas destacam uma mudança brusca entre a altura da superfície do solo com o topo da floresta, o que fica notabilizado em alguns atributos topográficos, como a clinografia (apresentada com valores contínuos) gerado a partir do modelo digital de elevação de 30 metros.

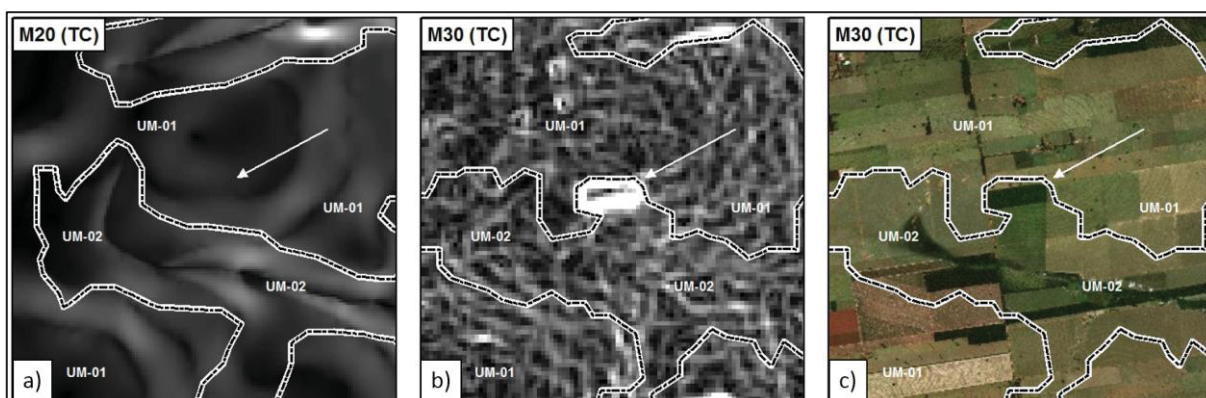
FIGURA 48 – IMAGEM DE SATÉLITE E RUÍDOS VISÍVEIS PELA CLINOGRRAFIA - MDE 30 METROS



Fonte: ArcGis 10.3 (*Basemap - Imagery*) – GeoEye01 – Resolução: 0,46m – Data: 14/08/2016

Nesse mesmo contexto, a FIGURA 49 ilustra o quanto esses ruídos influenciam nos produtos preditivos (área no setor norte da AE). São comparadas duas situações: a primeira (a) apresenta a clinografia gerada pelo modelo digital do terreno de 20 metros e os limites entre as duas UM mapeadas por tabulação cruzada. A segunda situação (b) é a clinografia gerada pelo M30, uma feição que se destaca por apresentar valores mais altos deste atributo e os limites da predição por TC. Nota-se que na terceira (c), o M30 detectou uma pequena área florestada e a mesma foi contemplada dentro da unidade de mapeamento 02.

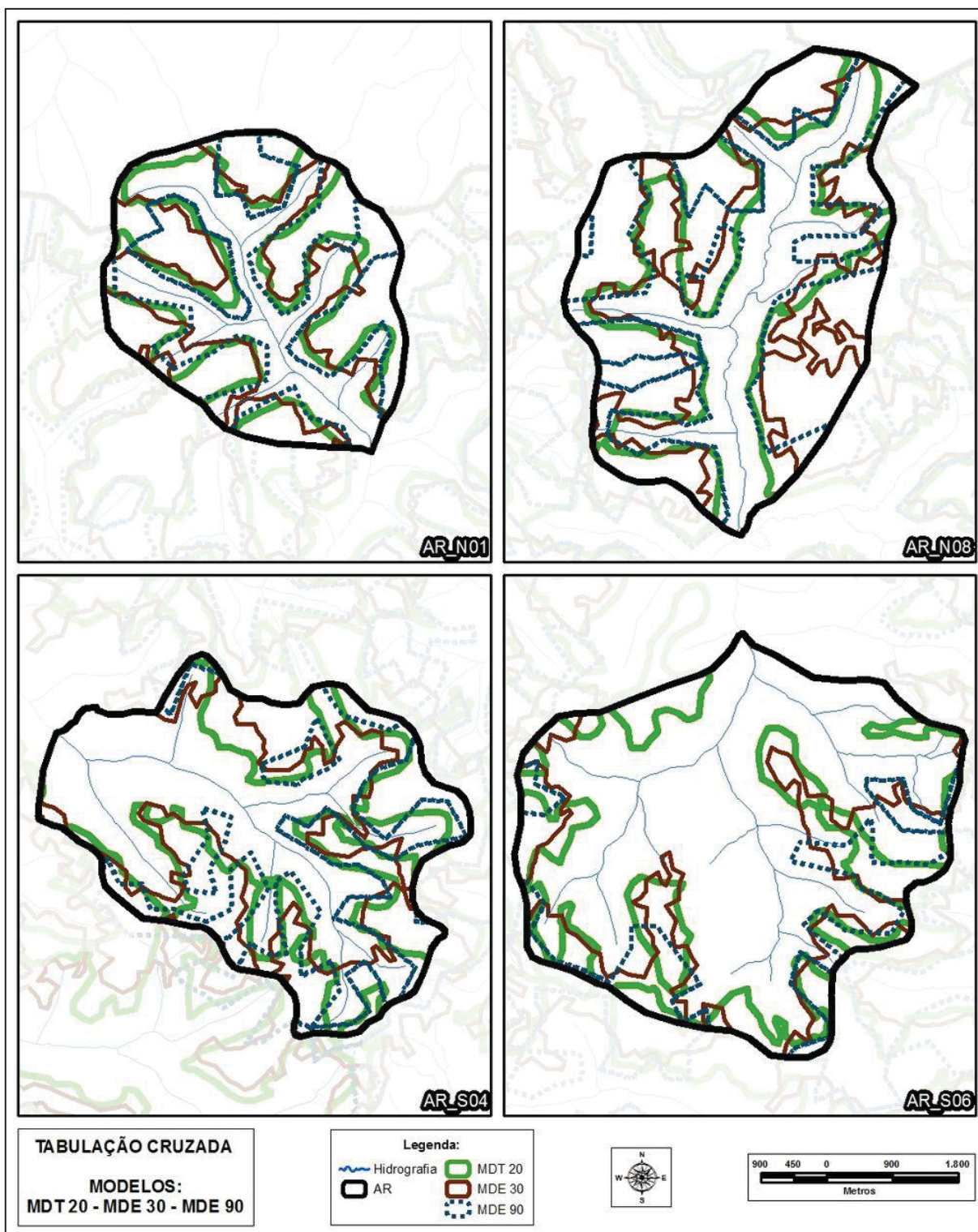
FIGURA 49 – INFLUÊNCIA DOS RUÍDOS NO M30 DOS MAPEAMENTOS PREDITIVOS POR TC



Fonte: ArcGis 10.3 (*Basemap - Imagery*) – GeoEye01 – Resolução: 0,46m – Data: 14/08/2016

Para finalizar este item referente às predições por TC, a FIGURA 50 demonstra a diferença entre os limites das duas classes de unidades de mapeamento preditas por tabulação cruzada para os três modelos digitais usados nesta tese. Foram ilustradas duas áreas de referência do setor norte (AR\_N01 e AR\_N08) e duas do setor sul (AR\_S04 e AR\_S06) que expressassem melhor essas diferenças.

FIGURA 50 – COMPARAÇÃO ENTRE OS LIMITES DAS UM – TC (M20, M30 E M90)



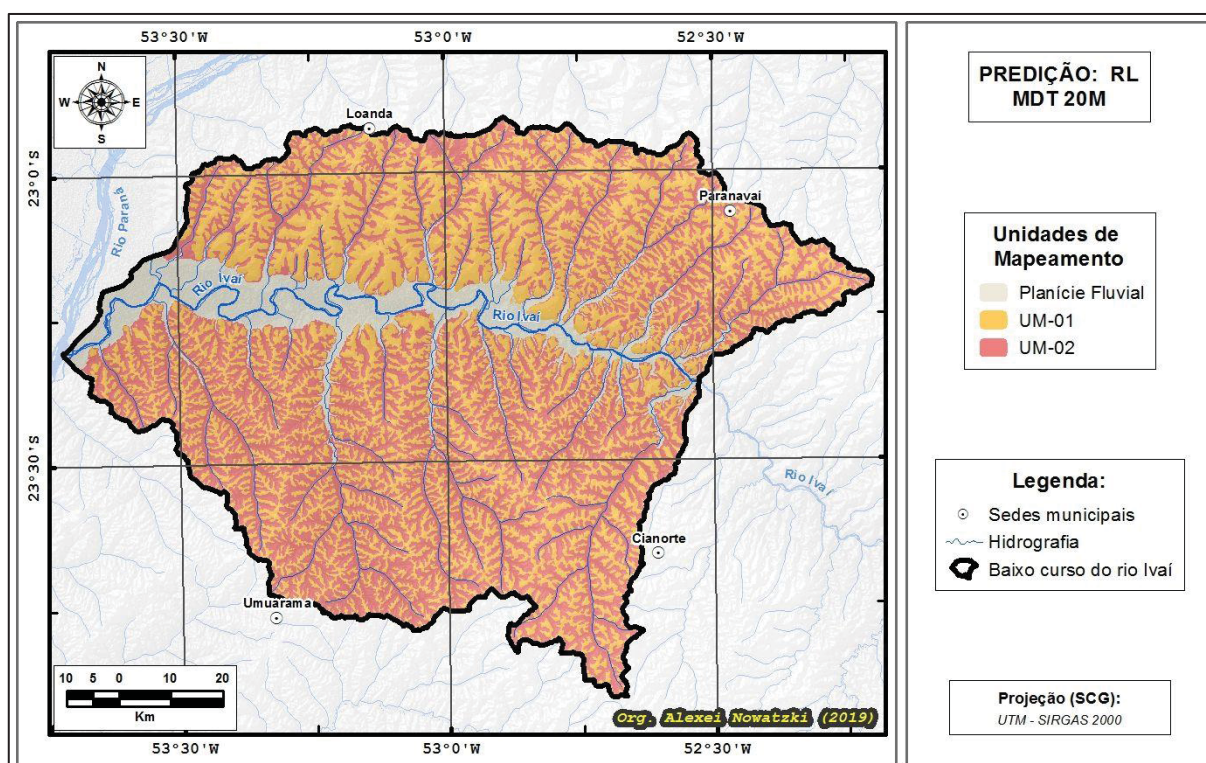
Nota-se que os limites variam bastante de um modelo para outro, com ênfase para as diferenças existentes entre o M90 e os outros dois modelos. Percebe-se que seus limites apresentam arestas e com isso acaba desrespeitando as nuances do terreno e comprometendo a qualidade do mapeamento preditivo.

## 5.5 PREDIÇÃO DOS SOLOS POR REGRESSÕES LOGÍSTICAS

O emprego do método das regressões logísticas multinominais múltiplas proporcionou predições a partir dos modelos de 20, 30 e 90 metros (FIGURA 51, FIGURA 52 e FIGURA 53). Para a efetivação deste mapeamento, foi realizada a integração dos cinco atributos topográficos (assim como por tabulação cruzada) com os seus *grids* introduzidos no *software* QGIS com valores de modo contínuo.

Por meio das 1.200 pseudoamostras inseridas nas dezesseis áreas de referência e com a escolha dos cinco AT, foi possível realizar os mapeamentos preditivos propostos. Primeiramente foram expostos os dados referentes a quantificação das áreas e proporção das mesmas para que posteriormente fossem feitas análises acerca dos valores das pseudoamostras.

FIGURA 51 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR RL – MDT 20



A predição pelo modelo de 20 metros apresentou uma distribuição semelhante aos resultados obtidos pela TC, ou seja, valores aproximados em proporção de área para o setor norte e prevalência da UM-02 no setor sul. Na totalização dos dados houve também uma maior distribuição da classe UM-02, com 54% (TABELA 16 e GRÁFICO 6).

TABELA 16 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M20 (RL)

UM	PIXELS	km <sup>2</sup>	%
<b>NORTE</b>			
UM-01	4.791.746	1.916,70	53,70
UM-02	4.131.224	1.652,49	46,30
$\Sigma$	8.922.970	3.569,19	100,00
<b>SUL</b>			
UM-01	4.887.716	1.955,09	39,26
UM-02	7.561.198	3.024,48	60,74
$\Sigma$	12.448.914	4.979,57	100,00
<b>TOTAL</b>			
UM-01	9.679.462	3.871,78	45,29
UM-02	11.692.422	4.676,97	54,71
$\Sigma$	21.371.884	8.548,75	100,00

A predição realizada através do M30 (FIGURA 52) apresentou diferenças em relação ao M20, sobretudo no setor norte da AE. De acordo com a TABELA 17 e o GRÁFICO 6 este setor apresentou 58,9% da área mapeada para a UM-01, sendo o maior valor de área para esta unidade de mapeamento, levando em consideração as seis predições realizadas.

Para o setor sul a proporção foi de 61% para a UM-02, mostrando similaridade com a predição de 20 metros por RL, assim como para as quantificações do mapa preexistente de Fasolo *et al.* (1988). A somatória dos setores apresentou ainda um equilíbrio entre as duas classes de UM (47,2% para a classe 01 e 52,8% para a 02).

FIGURA 52 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR RL – MDE 30

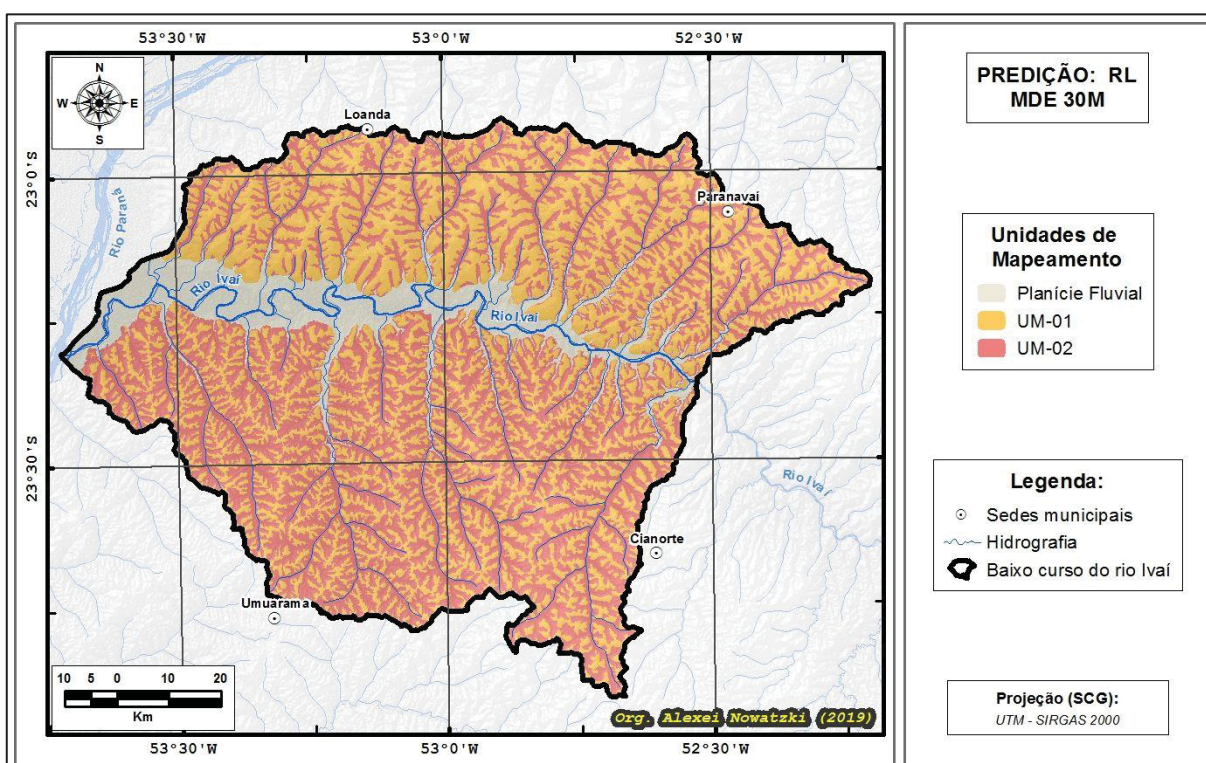


TABELA 17 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M30 (RL)

UM	PIXELS	km <sup>2</sup>	%
<b>NORTE</b>			
UM-01	2.335.254	934,10	58,89
UM-02	1.630.335	652,13	41,11
$\Sigma$	3.965.589	1.586,24	100,00
<b>SUL</b>			
UM-01	2.147.384	858,95	38,81
UM-02	3.385.455	1.354,18	61,19
$\Sigma$	5.532.839	2.213,14	100,00
<b>TOTAL</b>			
UM-01	4.482.638	1.793,06	47,19
UM-02	5.015.790	2.006,32	52,81
$\Sigma$	9.498.428	3.799,37	100,00

O produto resultante da predição do modelo digital de elevação de 90 metros (FIGURA 53) apresentou, da mesma forma que o M30, uma supervalorização da UM-01, com 58,7% do setor norte (TABELA 18 e GRÁFICO 6). A forma dos polígonos evidencia a valorização das principais drenagens da AE e com isso a UM-02 foi mapeada de modo menos acentuado nas drenagens de hierarquia fluvial mais elevada (o que é esperado de um modelo com resolução espacial como o M90). Em contrapartida, no setor sul a classe UM-02 foi a mais valorizada dos três modelos, atingindo 65% da área. No total dos dois setores foi a predição que mais mapeou a UM-02, atingindo 55% da área.

FIGURA 53 – PREDIÇÃO DAS UNIDADES DE MAPEAMENTO POR RL – MDE 90

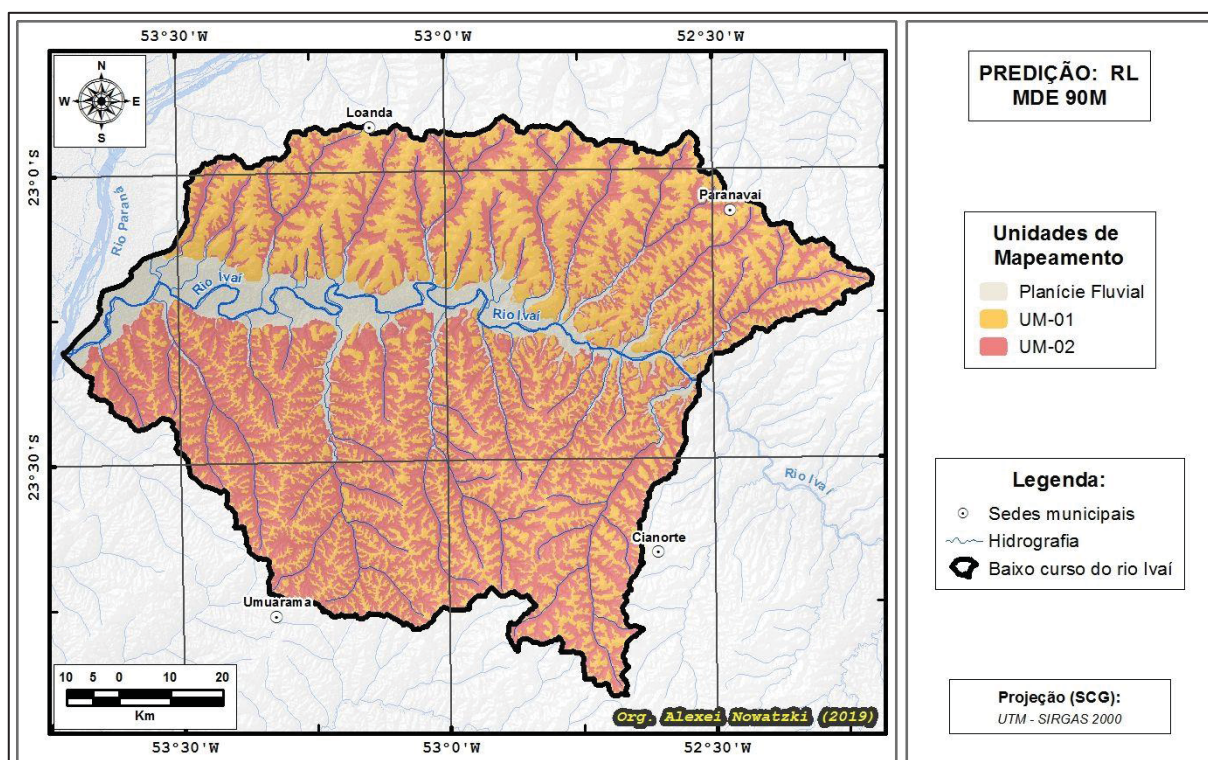
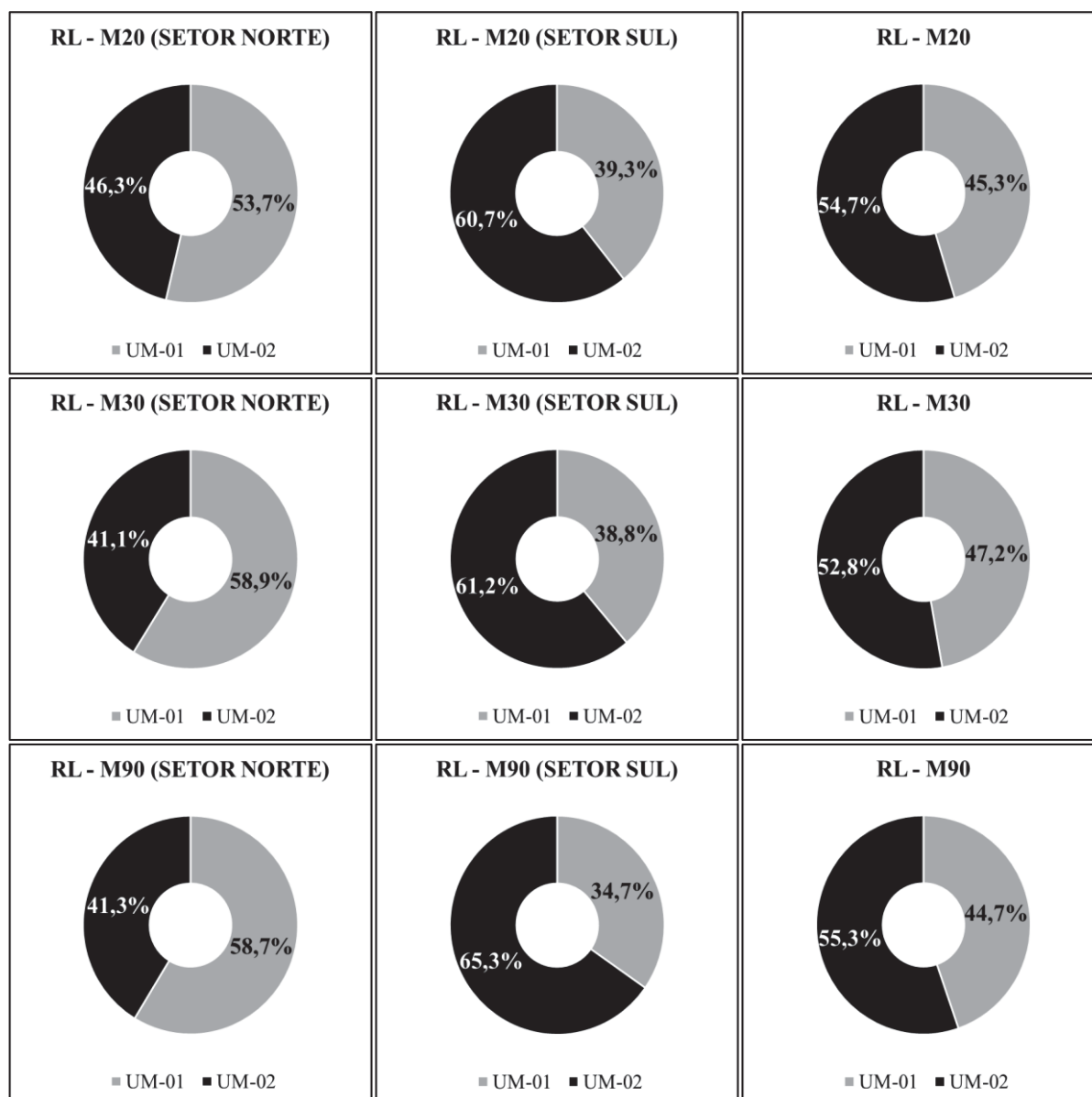


TABELA 18 – QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS – M90 (RL)

UM	PIXELS	km <sup>2</sup>	%
<b>NORTE</b>			
UM-01	275.336	110,13	58,75
UM-02	193.331	77,33	41,25
$\Sigma$	468.667	187,47	100,00
<b>SUL</b>			
UM-01	226.983	90,79	34,71
UM-02	426.906	170,76	65,29
$\Sigma$	653.889	261,56	100,00
<b>TOTAL</b>			
UM-01	502.319	200,93	44,75
UM-02	620.237	248,09	55,25
$\Sigma$	1.122.556	449,02	100,00

GRÁFICO 6 – PROPORÇÃO DAS ÁREAS – M20, M30 E M90 (RL)



Os dados de valores de área mostram que os resultados entre os modelos são bastante semelhantes, no quesito de proporção de áreas, porém, a forma dos polígonos apresentado nas predições são diferentes, haja vista que o M20 valorizou as drenagens e fundos de vales e mapeou a UM-02 em porções maiores à montante das drenagens de primeira ordem (eminente no setor norte), conforme é possível verificar na FIGURA 54.

Conforme ilustra a FIGURA 55, este método foi capaz de mapear com mais coerência (em relação às predições efetuadas por TC) às porções de terço superior das vertentes no setor sul, identificando feições de topo cuja potencialidade é de ocorrência de Latossolos. Constatase que pelas curvas de nível, algumas áreas mapeadas como UM-02 em Fasolo *et al.* (1988) estão supervalorizadas em relação aos dados apresentados pelas predições, como topos planos e áreas com baixa clinografia. Essas porções do relevo são destacadas pelos trabalhos supramencionados como propícias ao desenvolvimento pedogenético de Latossolos.

FIGURA 54 – PREDIÇÃO DAS UM POR RL – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DIGITAIS (AR\_N01)

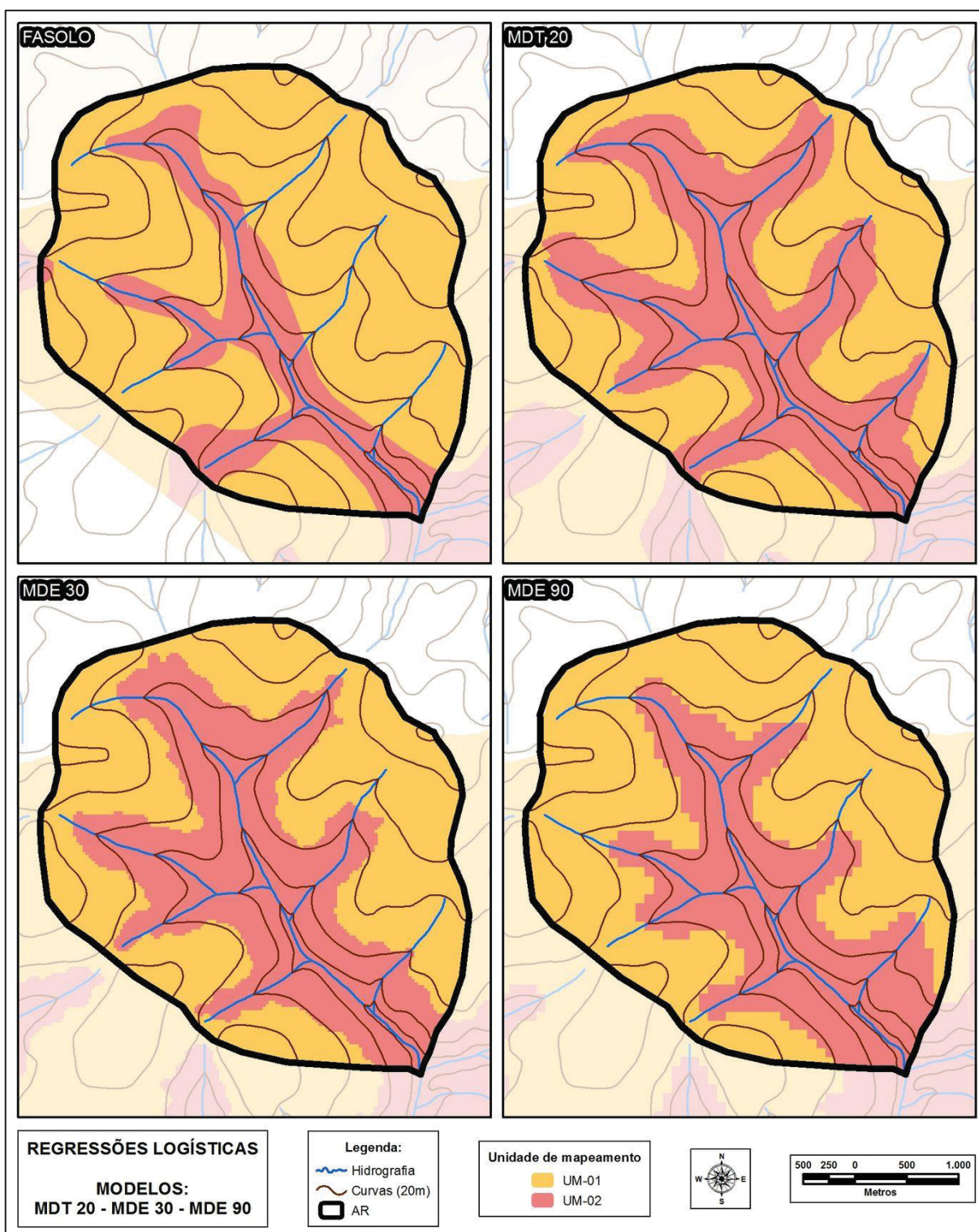
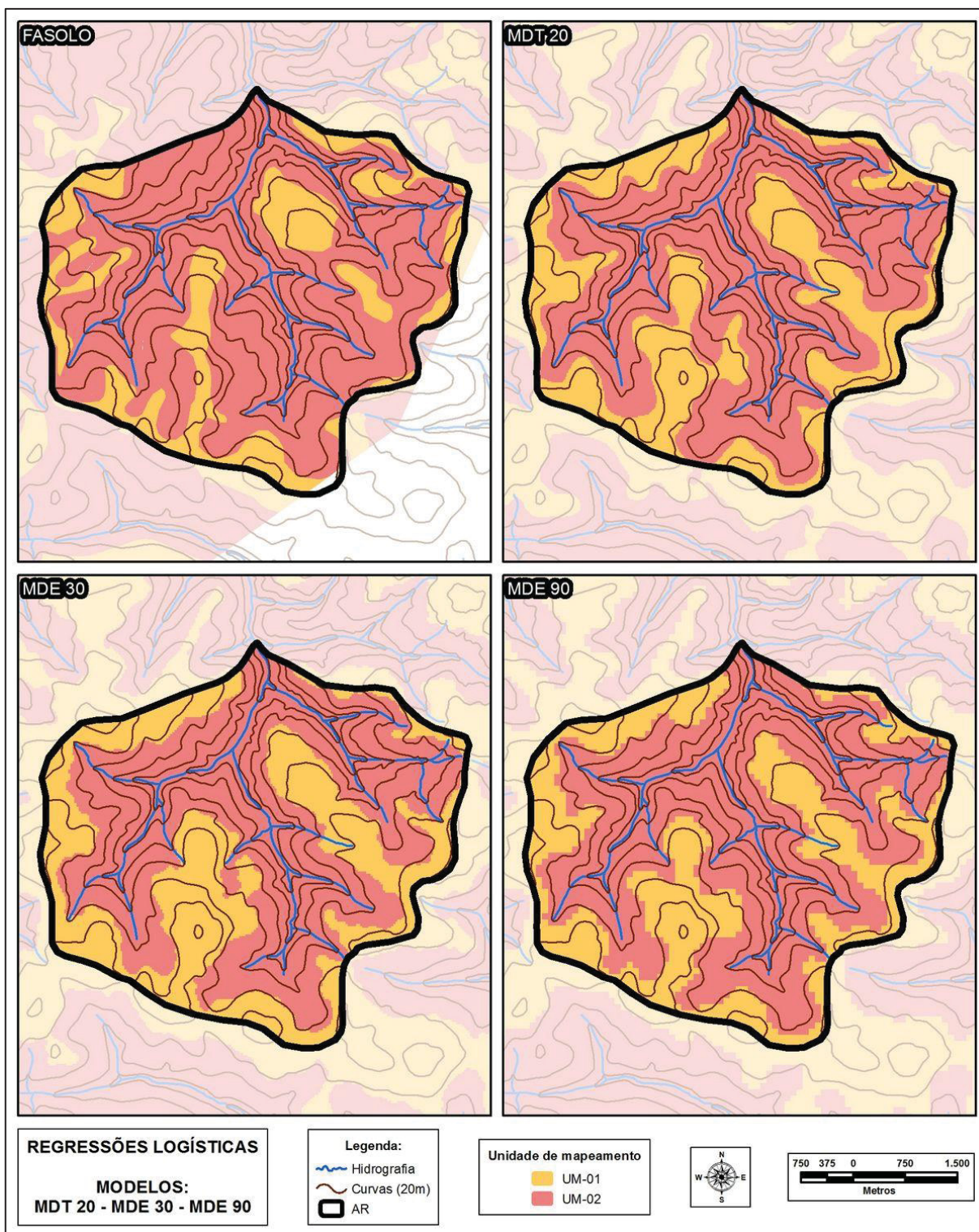
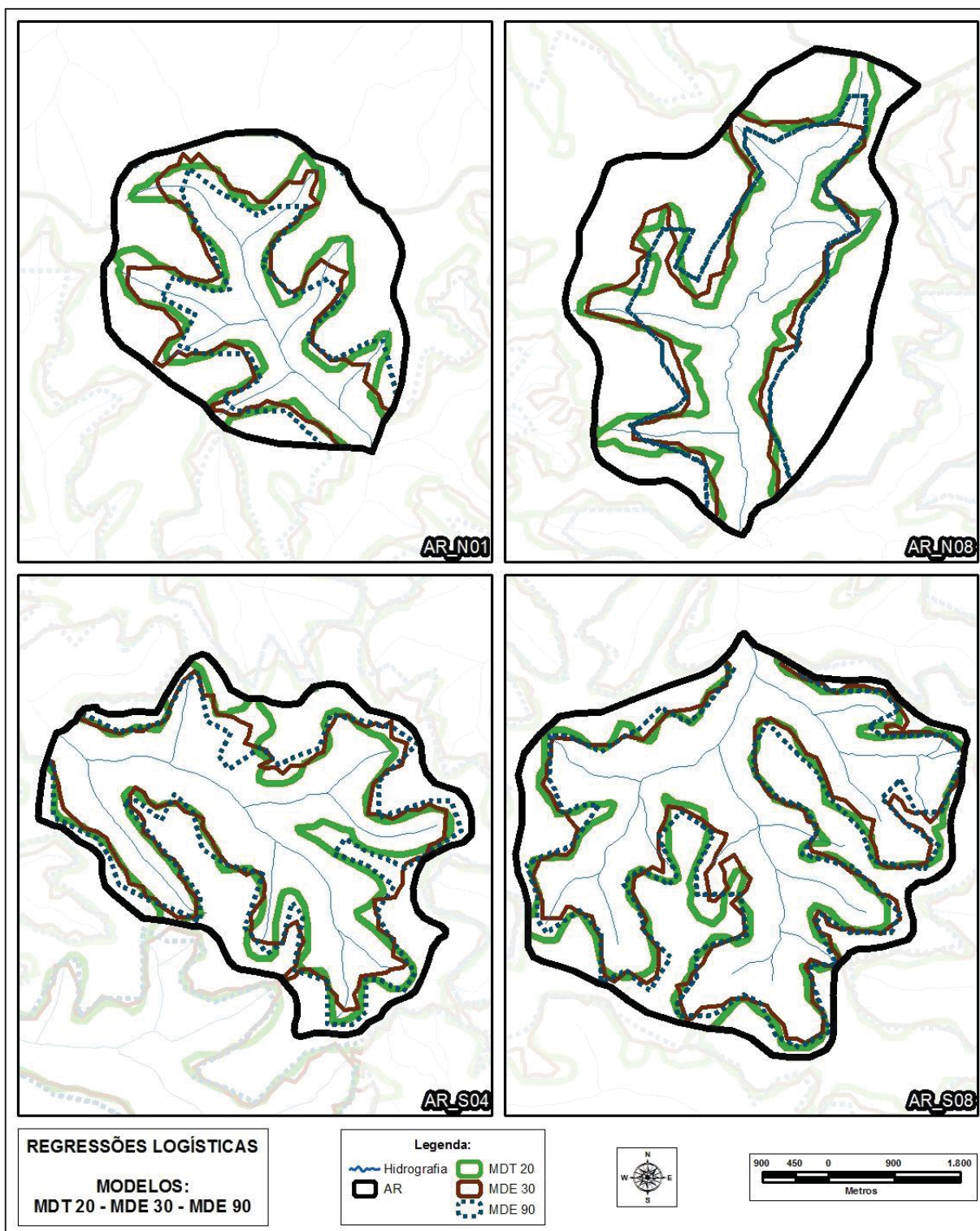


FIGURA 55 – PREDIÇÃO DAS UM POR RL – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DIGITAIS (AR\_S06)



Assim como foi feito para a TC, a FIGURA 56 teve por finalidade demonstrar a diferença entre os limites das duas UM previstas por regressões logísticas para os três modelos digitais usados. Foram ilustradas as mesmas duas áreas de referência do setor norte (AR\_N01 e AR\_N08) e duas do setor sul (AR\_S04 e AR\_S06).

FIGURA 56 – COMPARAÇÃO ENTRE OS LIMITES DAS UM – RL (M20, M30 E M90)



Nota-se que os limites variaram menos entre as predições dos três modelos existentes que as predições realizadas pelo método da tabulação cruzada, evidenciando que este método cria polígonos que condizem melhor com a espacialização dos solos na paisagem. É possível constatar que no setor norte o M20 valoriza mais a UM-02 em detrimento do M90, além do fato

que os produtos oriundos dos MDE geram polígonos com arestas. Todavia, no setor sul é observado que as três predições possuem limites próximos um dos outros, refletido nos valores de proporção de área dos dois UM.

Após feita a análise qualitativa dos dados e a quantificação das áreas das UM mapeadas, foi realizado o balanço dos 1.200 pontos de controle (pseudoamostras) por meio da análise de estatística descritiva de cada um dos cinco atributos topográficos, sendo utilizados os seguintes parâmetros: média (aritmética), mediana, moda, desvio padrão, variância, intervalo (amplitude dos dados), valores mínimos e máximos em forma de tabela.

Foram ilustrados em forma de diagrama de caixa (boxplot) - ferramenta gráfica que permite visualizar a distribuição e também dos valores discrepantes (outliers) dos dados -, fornecendo assim um meio complementar para desenvolver uma perspectiva sobre o caráter dos dados.

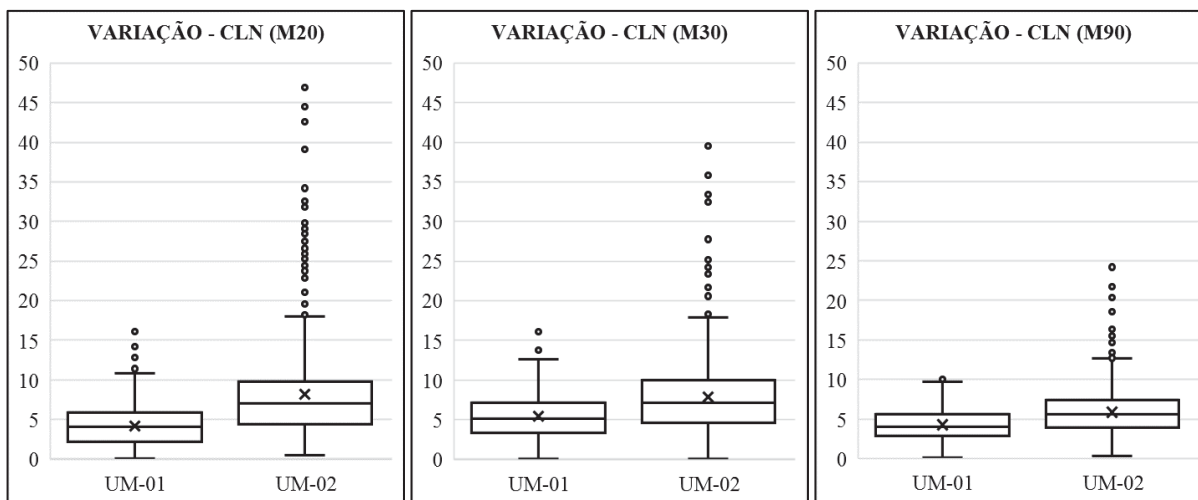
Além disso, o boxplot também é uma disposição gráfica comparativa e por isso foi escolhida para a análise dos dados dos pontos usados nas predições de RL. Esses gráficos apresentam medidas de estatísticas descritivas como o mínimo, máximo, primeiro quartil, segundo quartil (ou mediana) e o terceiro quartil (sendo que entre esses quartis, há a concentração de 50% dos dados, no caso pontos em forma de pseudoamostras).

A análise desses pontos de controle para cada um dos atributos topográficos foi efetuada a partir dos três modelos digitais. Para o atributo clinografia, foi criada a TABELA 19 e o GRÁFICO 7.

TABELA 19 – PONTOS DE CONTROLE (CLINOGRRAFIA)

UM	MÉDIA	MEDIANA	MODA	DESVIO PADRÃO	VARIÂNCIA	INTERVALO	MÍN.	MÁX.
<b>M20</b>								
<b>UM-01</b>	4,168	4,007	11,776	2,607	6,798	16,051	0,041	16,092
<b>UM-02</b>	8,163	7,048	15,453	6,155	37,883	46,493	0,450	46,943
<b>M30</b>								
<b>UM-01</b>	5,395	5,069	1,318	2,866	8,213	16,084	0,000	16,084
<b>UM-02</b>	7,836	7,096	4,167	4,978	24,781	39,511	0,000	39,511
<b>M90</b>								
<b>UM-01</b>	4,302	4,061	9,242	1,950	3,802	10,529	0,092	10,621
<b>UM-02</b>	5,852	5,603	8,017	2,834	8,032	23,858	0,356	24,214

GRÁFICO 7 – VARIAÇÃO (BOXPLOT) - CLINOGRRAFIA



Os valores dos pontos de controle apresentaram médias aritméticas menores para a UM-01 e maiores para a UM-02 nos três modelos (conforme o esperado), porém é possível observar que na predição do M20 os valores de mediana e moda também são maiores que nos dois modelos de elevação, por fatores como resolução espacial e aprofundamento de vale nos MDT (método Topogrid de interpolação).

Esta informação foi legitimada ao analisar o intervalo entre os valores mínimos e máximos, pois o M20 apresentou valor máximo de 46 para a UM-02, enquanto que o M30 foi de 39, e o M90 de 24, confirmando que esses modelos de elevação suavizam a superfície terrestre e acabam ocultando informações de variação altimétrica, ou no caso, clinográfica. Ainda se observa que esta informação se reflete na dispersão dos valores dos dados, pois os modelos M20 e M30 possuem valores menores de desvio padrão e variância se comparados com o M90.

É pertinente salientar que mesmo considerando que porções da vertente com baixa clinografia se enquadrem na classe UM-01, e a tendência que a maioria dos pontos fique com os valores deste índice próximos, a quantidade de pseudoamostras para este grupo foi menor (432 dos 1.200 pontos). Priorizou-se a quantidade de pontos na classe UM-02 pois essa ocorre em contextos geomorfológicos mais diversificados (terços médios e inferiores de vertente, vales). A partir dessas constatações, foi esperado que o desvio padrão e a variância apresentassem valores maiores para a classe UM-02 do que para a classe UM-01, sobretudo no M20 que teve 6,1 de desvio padrão entre os valores dos pontos.

Também deve se destacar que algum dos pontos inseridos fora das áreas de referência compõem os *outliers* no boxplot, que se enquadram dentro das feições de paleovoçoroca, ou seja, não estão entre o primeiro e terceiro quartil ilustrado no boxplot, assim como esses valores

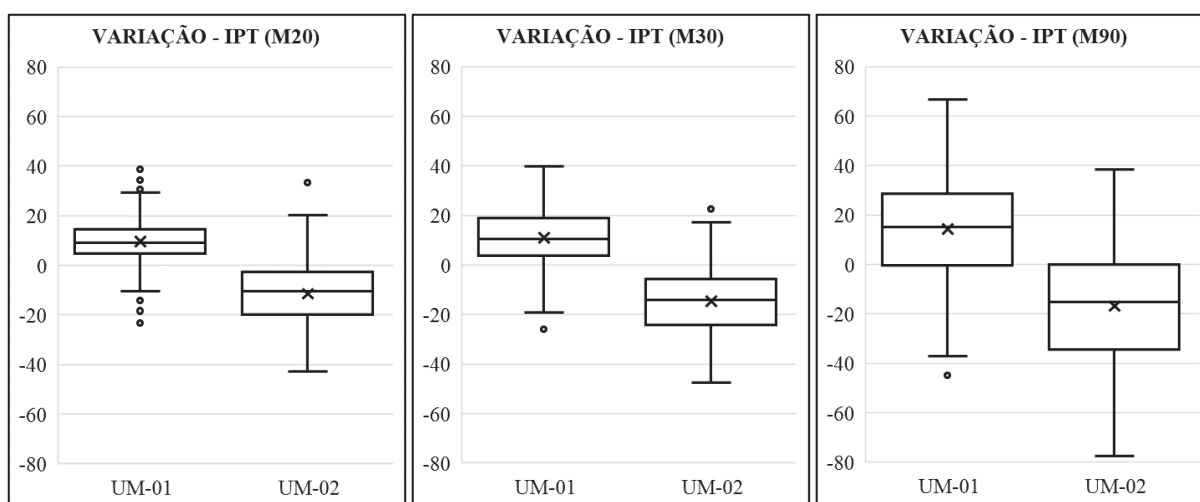
estão bastante distantes da média, mediana e moda. Essas feições erosivas apresentam formas de relevo bastante diferentes das que são encontradas ao longo da região noroeste paranaense, apresentando de um modo geral valores de clinografia bastante altos.

Para o AT índice de posição topográfica, foram elaborados a TABELA 20 e o GRÁFICO 8.

TABELA 20 – PONTOS DE CONTROLE (ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA)

UM	MÉDIA	MEDIANA	MODA	DESVIO PADRÃO	VARIÂNCIA	INTERVALO	MÍN.	MÁX.
<b>M20</b>								
UM-01	9,700	9,165	-6,660	8,541	72,949	62,056	-23,279	38,777
UM-02	-11,499	-10,551	-12,559	11,887	141,293	76,174	-42,772	33,402
<b>M30</b>								
UM-01	11,029	10,597	-19,099	11,691	136,680	65,898	-26,004	39,894
UM-02	-14,597	-14,198	-30,698	13,113	171,949	71,155	-47,617	23,538
<b>M90</b>								
UM-01	14,320	15,057	-12,622	21,385	457,336	111,539	-44,726	66,812
UM-02	-16,792	-15,088	-24,983	22,469	504,835	115,956	-77,388	38,568

GRÁFICO 8 – VARIAÇÃO (BOXPLOT) - ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA



Os valores apresentados para este AT demonstram que na classe UM-01 são maiores que zero (levando em consideração os valores entre o primeiro e o terceiro quartil, ou seja, 50% dos pontos), enquanto que os inferiores a zero se enquadraram na classe UM-02.

Ao se comparar as predições M20 e M30 com o M90 há uma diferenciação na variação dos dados, pois este modelo apresenta valores maiores tanto na média, mediana e moda. Pelo desvio padrão da classe UM-02 é possível notar essa diferença, pois para o M20 o valor é de

11, para o M30 é 13 e para o M90, de 22, sendo que a variância deste modelo chegou ao valor de 504.

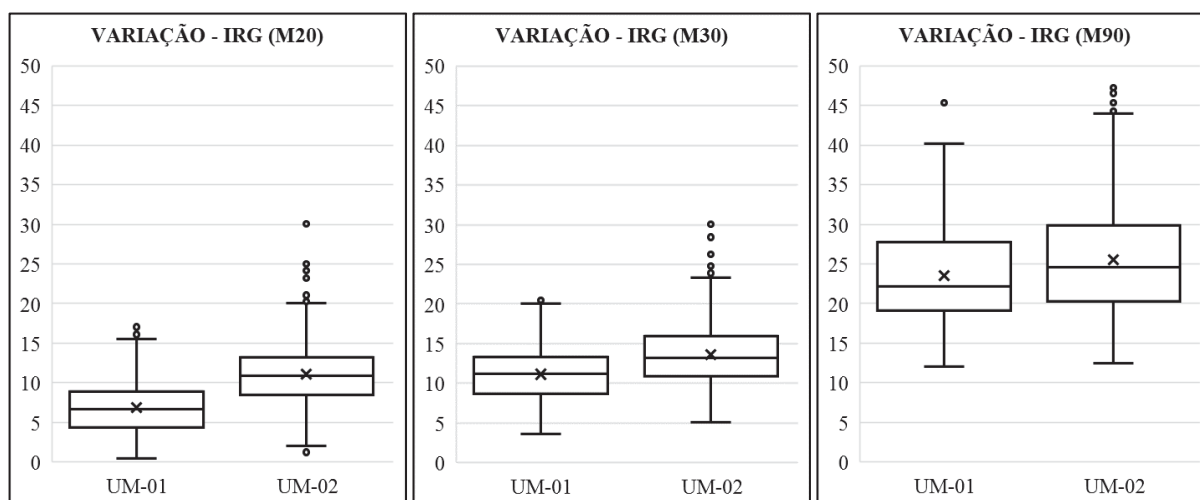
A amplitude dos valores também demonstra essa discrepância, pois no M20 o intervalo é de 62 para a UM-01, 65 no M30 e 111 no M90, sendo possível notar tanto pela variação dos valores dentro do primeiro e terceiro quartil, quanto nos valores máximos e mínimos. Assim sendo, essas constatações influenciaram na espacialização diferenciada que o M90 apresentou, principalmente por ter efetuado um mapeamento com menor ênfase nas porções com hierarquia fluvial elevada, conforme descrito anteriormente.

Em relação ao atributo índice de rugosidade do terreno, foi elaborada a TABELA 21 e o GRÁFICO 9.

TABELA 21 – PONTOS DE CONTROLE (ÍNDICE DE RUGOSIDADE DO TERRENO)

UM	MÉDIA	MEDIANA	MODA	DESVIO PADRÃO	VARIÂNCIA	INTERVALO	MÍN.	MÁX.
<b>M20</b>								
UM-01	6,880	6,693	14,023	3,266	10,666	17,169	0,398	17,567
UM-02	11,103	10,933	12,850	3,849	14,814	28,817	1,248	30,065
<b>M30</b>								
UM-01	11,143	11,236	12,271	3,333	11,109	17,192	3,601	20,793
UM-02	13,627	13,231	16,901	3,699	13,681	25,014	5,038	30,052
<b>M90</b>								
UM-01	23,506	22,205	19,705	6,174	38,116	33,318	12,018	45,335
UM-02	25,507	24,546	28,186	6,978	48,695	35,133	12,421	47,555

GRÁFICO 9 – VARIAÇÃO (BOXPLOT) - ÍNDICE DE RUGOSIDADE DO TERRENO



Este AT apresentou significativas diferenças entre as variações dos valores dos dados dos três modelos em questão. Enquanto que a média e a mediana do M20 foi de 6,8 e 6,6 respectivamente, para o M30 foi de 11,1 e 11,2, enquanto que para o modelo de 90 foi de 23,5 e 22,2. Como este índice leva em conta a análise de vizinhança dos valores dos *pixels*, a predição do MDT de 20 metros foi a que apresentou valores com menores índices concentrados dentro do primeiro e terceiro quartil (muito embora o intervalo total dos dados do M20 e do M30 fossem bastante parecidos para as duas unidades de mapeamento).

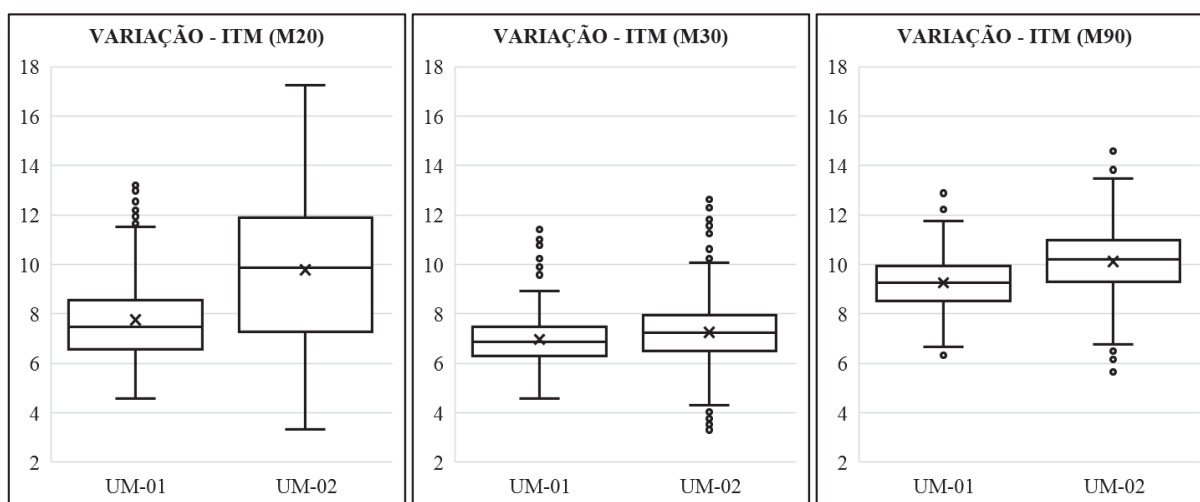
Um fato que merece destaque é que para o M90 os valores mínimos e máximos das duas unidades de mapeamento se apresentaram bastante análogos, deixando evidente que não foi um atributo que teve contribuição menor no mapeamento das duas UM.

Os valores encontrados para o atributo índice topográfico de umidade modificado se enquadram na TABELA 22 e no GRÁFICO 10.

TABELA 22 – PONTOS DE CONTROLE (ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE MODIFICADO)

UM	MÉDIA	MEDIANA	MODA	DESVIO PADRÃO	VARIÂNCIA	INTERVALO	MÍN.	MÁX.
<b>M20</b>								
UM-01	7,756	7,464	6,175	1,578	2,489	8,632	4,568	13,201
UM-02	9,777	9,852	7,672	2,899	8,405	13,925	3,330	17,254
<b>M30</b>								
UM-01	6,964	6,857	6,609	0,976	0,952	6,854	4,562	11,416
UM-02	7,251	7,247	6,493	1,243	1,545	9,330	3,308	12,637
<b>M90</b>								
UM-01	9,261	9,263	9,742	1,059	1,121	6,559	6,322	12,881
UM-02	10,115	10,192	10,423	1,266	1,602	8,942	5,648	14,590

GRÁFICO 10 – VARIAÇÃO (BOXPLOT) - ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE (MODIFICADO)



A primeira informação a ser notada por este atributo, é que para a predição do modelo de 20 metros há um intervalo maior entre os valores máximos e mínimos em relação aos dois modelos de elevação, principalmente na UM-02, o que também é possível notar pelos valores de desvio padrão e variância (os maiores dos três modelos). Neste modelo também há maior variação entre as médias nas duas unidades de mapeamento.

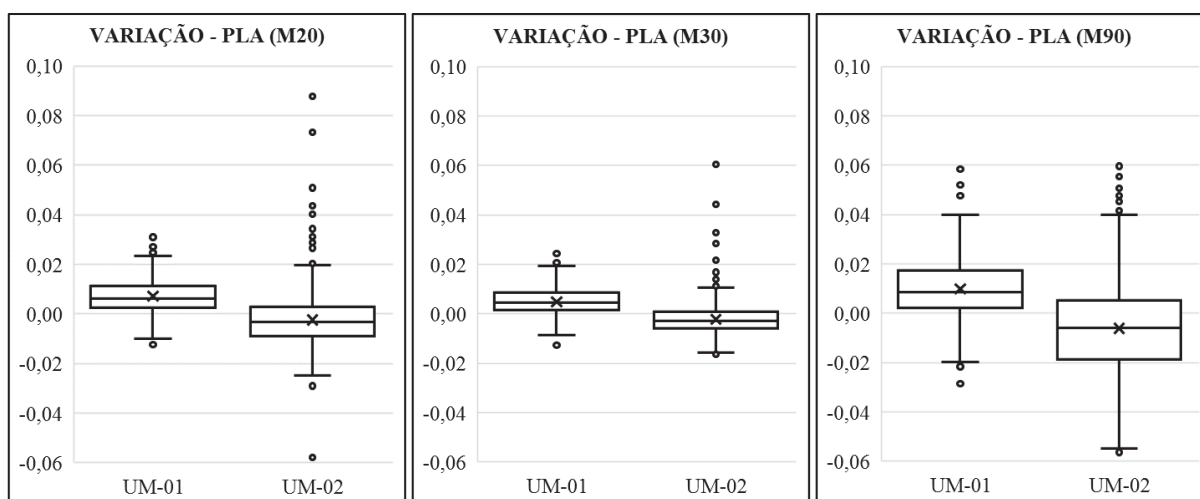
Muito embora a variação dos dados tenha sido pequena, o modelo de 30 metros apresentou dados muito próximos entre as duas UM, como a média aritmética de 6,9 para a UM-01 e 7,2 para a UM-02. Também se observa o fato de os valores das médias serem menores que o M20 e o M90, evidenciando que para este modelo, o ITM não teve contribuição significativa na predição.

O último atributo analisado é o plano de curvatura, com a variação de seus valores apresentados na TABELA 23 e no GRÁFICO 11.

TABELA 23 – PONTOS DE CONTROLE (PLANO DE CURVATURA)

UM	MÉDIA	MEDIANA	MODA	DESVIO PADRÃO	VARIÂNCIA	INTERVALO	MÍN.	MÁX.
<b>M20</b>								
UM-01	0,007	0,006	0,008	0,007	0,000	0,044	-0,012	0,032
UM-02	-0,002	-0,003	0,005	0,011	0,000	0,146	-0,058	0,088
<b>M30</b>								
UM-01	0,005	0,005	0,008	0,006	0,000	0,037	-0,013	0,024
UM-02	-0,002	-0,003	-0,003	0,007	0,000	0,078	-0,016	0,062
<b>M90</b>								
UM-01	0,010	0,009	0,004	0,012	0,000	0,087	-0,029	0,059
UM-02	-0,006	-0,006	-0,026	0,018	0,000	0,118	-0,056	0,062

GRÁFICO 11 – VARIAÇÃO (BOXPLOT) - PLANO DE CURVATURA



Para este atributo os valores de média para os três modelos foram positivos para a classe UM-01 (áreas divergentes) e negativos para a classe UM-02 (áreas convergentes). Não houve muita diferença entre os modelos de 20 e de 30 metros em nenhuma dos parâmetros estatísticos (somente o desvio padrão do M20 que foi maior, pois no M30 houve menor dispersão dos dados). Porém, no de 90 metros foi notado que os intervalos entre as máximas e mínimas é o mais expressivo (0,11 para a classe de UM-02). Assim sendo, o M90 foi o modelo que apresentou discrepâncias (em relação aos dois primeiros modelos) na espacialização ao efetuar o mapeamento digital das unidades de mapeamento.

Essas análises estatísticas foram essenciais para o entendimento das diferenças entre as três predições desta tese, tanto pelos valores de área das duas UM, quanto pelo formato de seus polígonos.

O método desenvolvido pelo *software* QGIS permitiu criar ainda uma camada de incertezas em relação às predições geradas por regressões logísticas. Ou seja, essa camada contém informações de quão certo o aprendiz estatístico está em relação a classe predita. Foram analisados três índices: pureza teórica, entropia de Shannon e índice de confusão.

Cada um desses índices foi apresentado em forma de bandas, sendo que para esta tese foi feita uma composição das três bandas para cada uma das três predições e resultou na confecção da FIGURA 57, da FIGURA 58 e da FIGURA 59, que ilustram uma síntese das três incertezas, com valores mínimos e máximos para quatro áreas de referência e também uma linha que representa os limites das duas UM.

Nota-se que para as predições dos três modelos o aprendiz estatístico conseguiu mapear com bastante certeza as regiões centróides dos polígonos, sobretudo os referentes a UM-02 e nas proximidades dos topos (divisores das AR) também houve uma maior certeza nas predições.

Acentuando essa informação, as maiores incertezas para todos os modelos foram próximas das áreas limites entre as unidades de mapeamento, ou seja, quanto maior e melhor distribuídos forem a quantidade de pontos inseridos como pseudoamostras, maior é a precisão do mapeamento. Com os testes realizados com 100, 200, 300, 400 e 500 pontos por setor, foi observada a diminuição das incertezas conforme o aumento do número de pontos de controle. Observa-se ainda que para o modelo de 90 metros os índices de incerteza se apresentam de forma mais dispersa.

FIGURA 57 – INCERTEZAS GERADAS PARA O MDT DE 20M

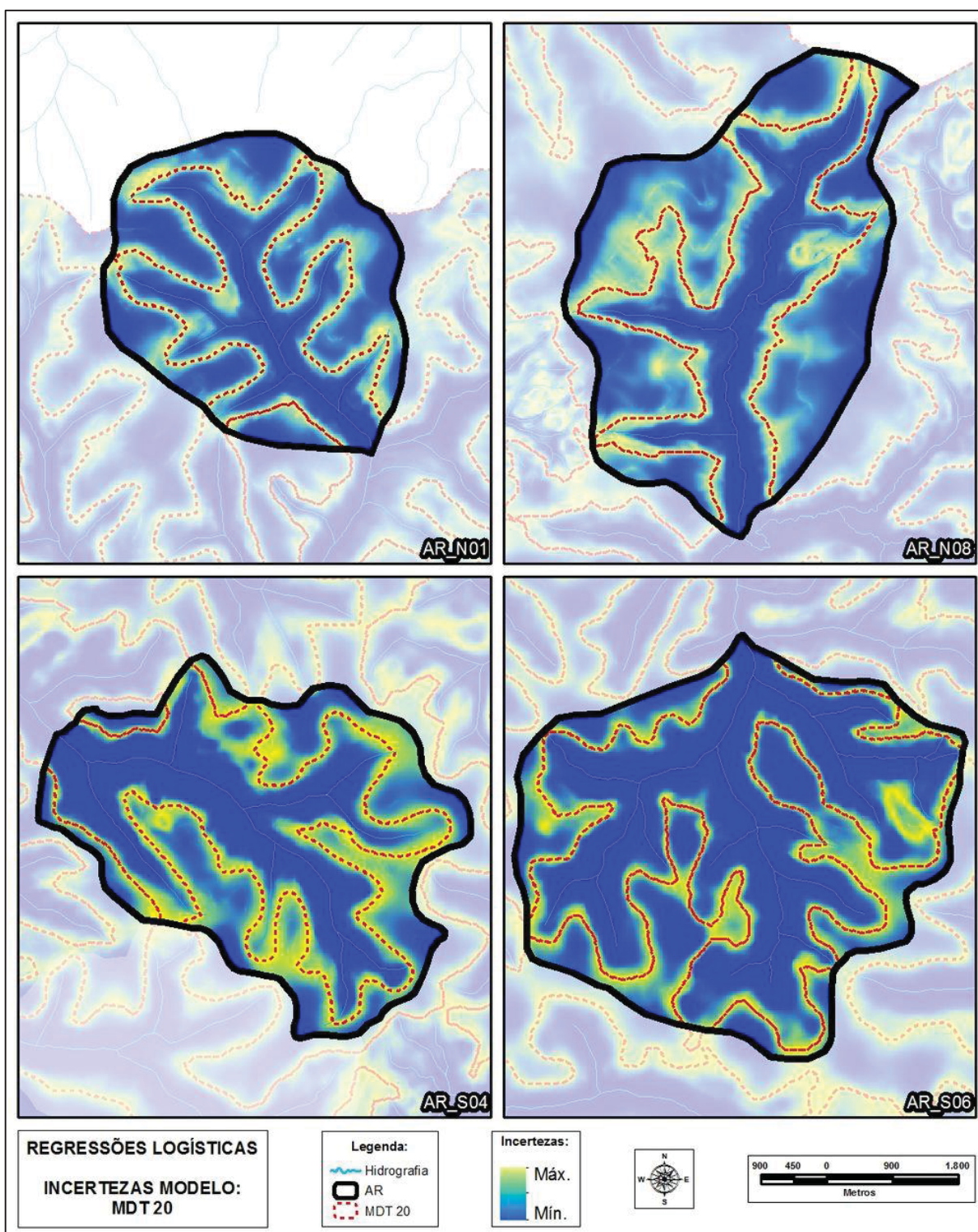


FIGURA 58 – INCERTEZAS GERADAS PARA O MDE DE 30M

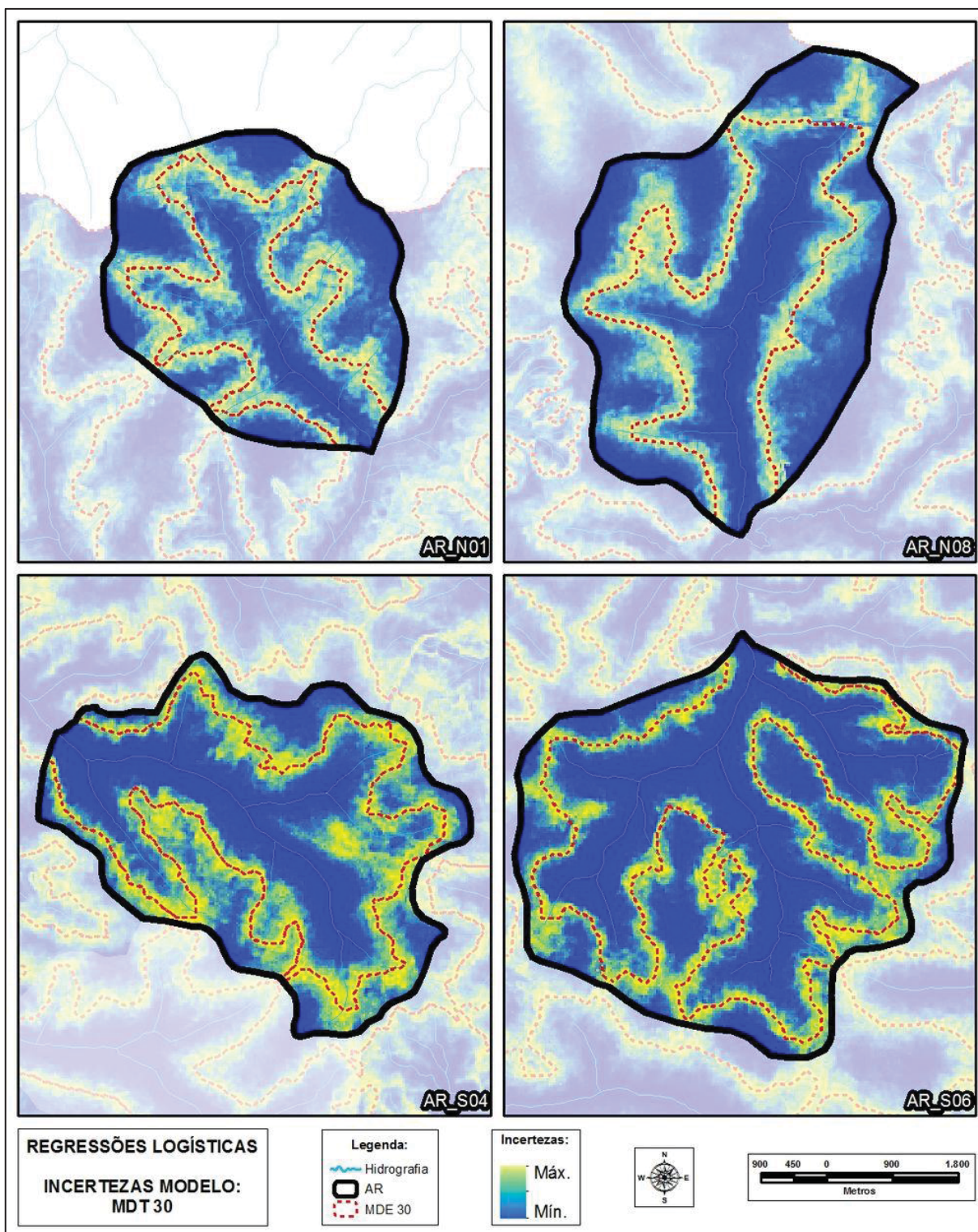
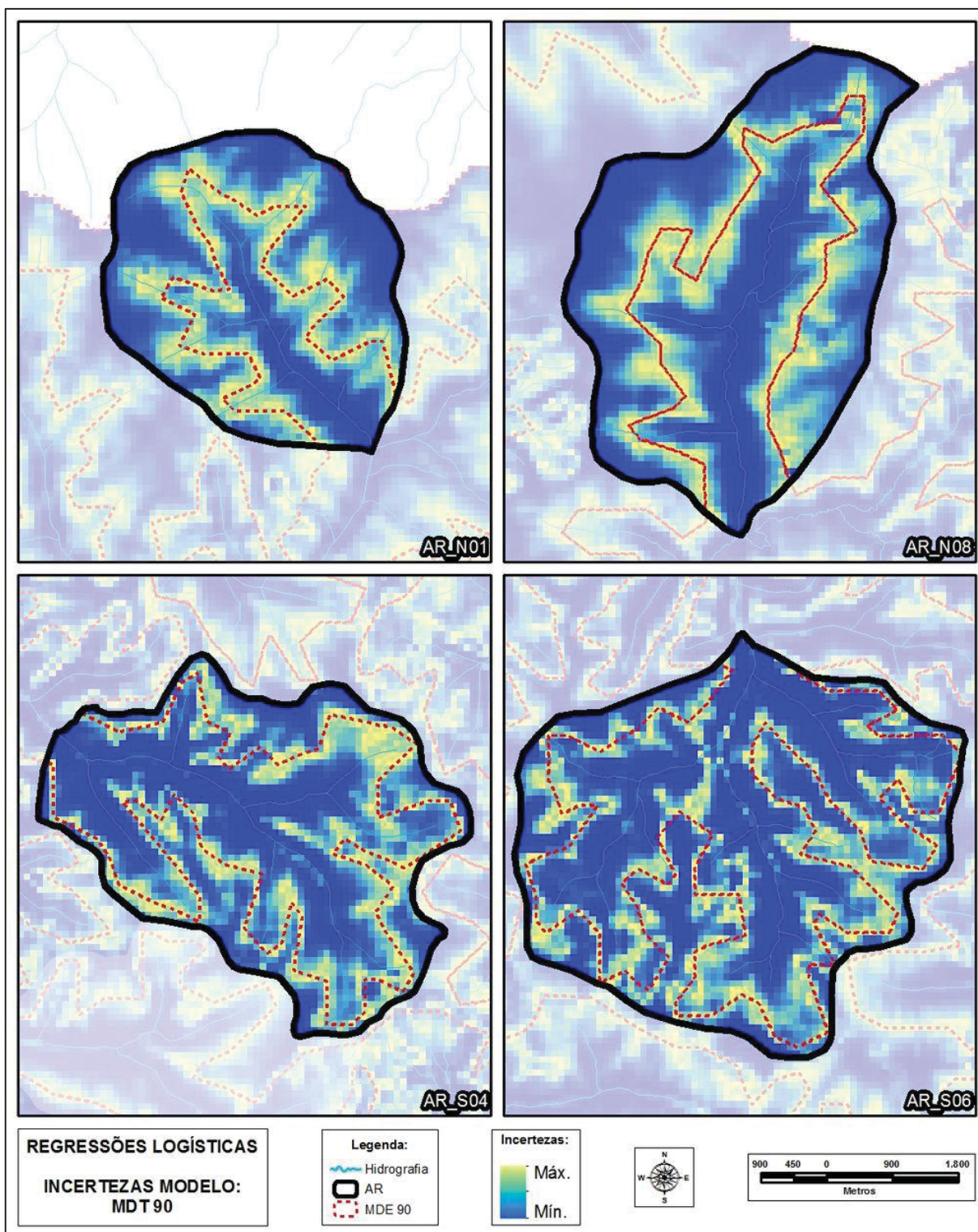


FIGURA 59 – INCERTEZAS GERADAS PARA O MDE DE 90M



## 5.6 ANÁLISE DE ESTATÍSTICA DESCRITIVA: MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO E MODELOS PREDITIVOS

Este item teve a finalidade de comparar, por valores de áreas, os dois métodos de integração escolhidos para as predições desta tese e também comparar as informações entre os três modelos preditivos (M20, M30 e M90). Para representar essas comparações foram selecionados os seguintes parâmetros: média aritmética, desvio padrão, variância e coeficiente de variação.

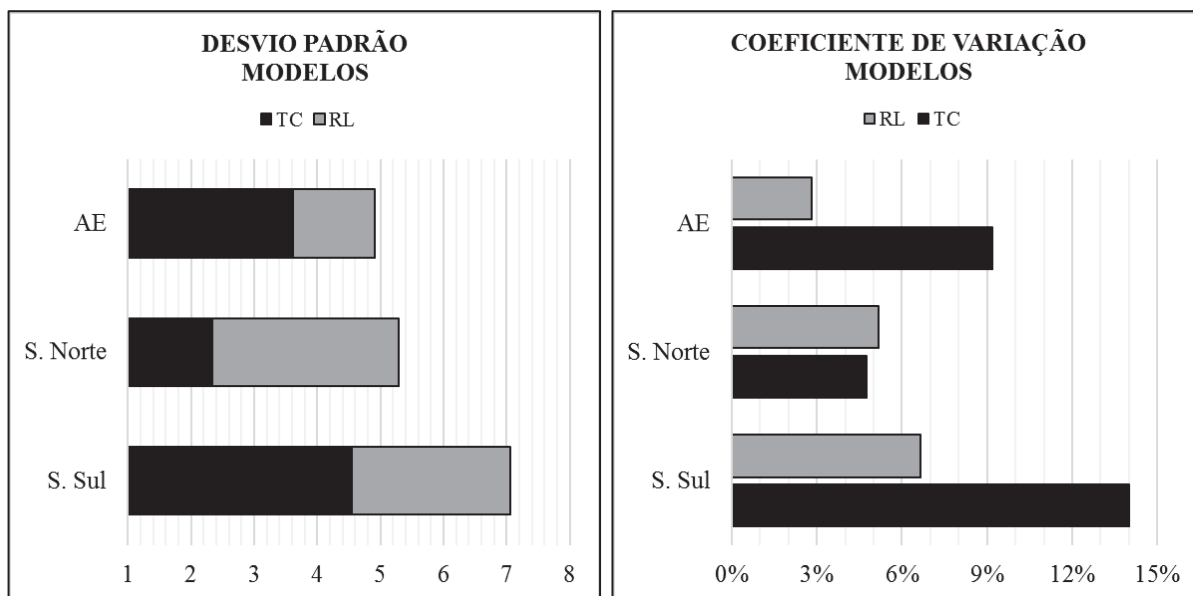
A primeira análise (TABELA 24) foi executada entre os métodos de integração, ou seja, os quatro parâmetros mencionados foram calculados pela integração dos valores dos três modelos. Importante salientar que a média aritmética foi apresentada para as duas unidades de mapeamento, os setores norte, sul e para a área total de estudo<sup>31</sup>. O GRÁFICO 12 ilustra a representação desta análise pelo viés do desvio padrão e do coeficiente de variação entre os três modelos preditivos.

TABELA 24 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO PELA INTEGRAÇÃO DOS MODELOS PREDITIVOS

MÉTODO DE INTEGRAÇÃO	TABULAÇÃO CRUZADA	REGRESSÕES LOGÍSTICAS
<b>MÉDIA ARITMÉTICA</b>		
<i>Área de estudo</i>	UM-01= 39,5% UM-02= 60,5%	UM-01= 45,7% UM-02= 54,3%
Setor norte	UM-01= 49,3% UM-02= 50,7%	UM-01= 57,1% UM-02= 42,9%
Setor sul	UM-01= 32,5% UM-02= 67,5%	UM-01= 37,6% UM-02= 62,4%
<b>DESVIO PADRÃO</b>		
<i>Área de estudo</i>	3,62	1,28
Setor norte	2,34	2,96
Setor sul	4,55	2,51
<b>VARIÂNCIA</b>		
<i>Área de estudo</i>	13,13	1,65
Setor norte	5,47	8,73
Setor sul	20,67	6,28
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO</b>		
<i>Área de estudo</i>	9,2%	2,8%
Setor norte	4,7%	5,2%
Setor sul	14,0%	6,7%

<sup>31</sup> O desvio padrão e as outras duas técnicas utilizaram apenas os valores da UM-01 para executar o seu cálculo, haja vista que a dispersão será a mesma caso analise-se os valores UM-02.

GRÁFICO 12 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO PELA INTEGRAÇÃO DOS MODELOS PREDITIVOS



Ao analisar a média aritmética, nota-se que nos três modelos de predição a classe UM-02 foi a mais valorizada nas espacializações, tanto por TC quanto por RL, entretanto essa classe predita por tabulação cruzada apresentou maior proporção de área (chegando a 60% no total da área de estudo em detrimento dos 54% por RL), corroborando com as informações dos dois mapeamentos preexistentes.

Os valores de desvio padrão, variância e coeficiente de variação permitem explicitar que há uma maior divergência entre os modelos preditos por tabulação cruzada na área de estudo (coeficiente de variação para a AE coloca 9,2% para TC enquanto que para RL chega apenas em 2,8%). Conforme o GRÁFICO 12, o setor norte apresentou valores maiores de dispersão nas RL para os três parâmetros estatísticos porém o setor sul apresentou variação maior de TC, o que influenciou os dados da AE.

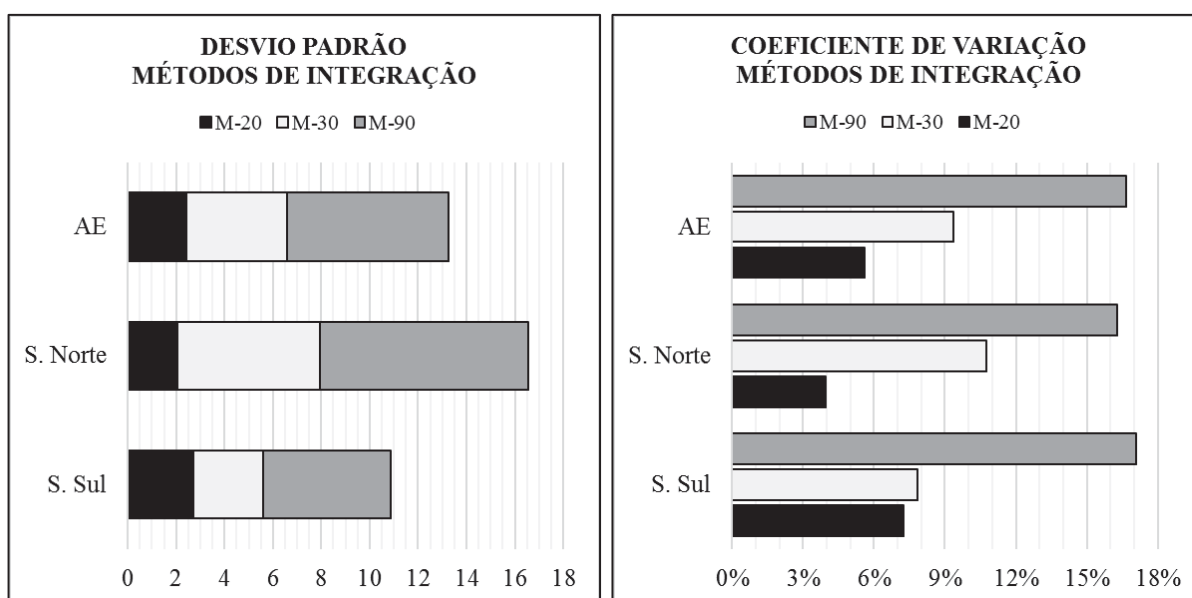
Assim sendo, é possível reafirmar que as observações referentes a quantificação das áreas das UM nas predições de TC (TABELA 15 e GRÁFICO 5), na qual os valores da UM-02 chegaram a 58,2 e 58,7% para os modelos M20 e M30 respectivamente e 72% para o M90. Ainda é importante lembrar que o desenho dos polígonos também é bastante diferente entre os três modelos de predição, tendo em vista que o M90 gerou polígonos mais generalizados e menos detalhados em função da resolução espacial.

A segunda análise feita neste item ocorreu entre os três modelos preditivos, realizada a partir da integração dos valores dos dados (TC e RL). A TABELA 25 e o GRÁFICO 13 permitem a observação dessas diferenças.

TABELA 25 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS PREDITIVOS PELA INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS TC E RL

MODELO PREDITIVO	M20	M30	M90
<b>MÉDIA ARITMÉTICA</b>			
Área de estudo	UM-01= 43,6% UM-02= 56,4%	UM-01= 44,3% UM-02= 55,7%	UM-01= 40,0% UM-02= 60,0%
Setor norte	UM-01= 52,2% UM-02= 47,8%	UM-01= 54,7% UM-02= 45,3%	UM-01= 52,7% UM-02= 47,3%
Setor sul	UM-01= 37,3% UM-02= 62,7%	UM-01= 36,8% UM-02= 63,2%	UM-01= 31,0% UM-02= 69,0%
<b>DESVIO PADRÃO</b>			
Área de estudo	2,44	4,14	6,66
Setor norte	2,07	5,89	8,58
Setor sul	2,71	2,89	5,29
<b>VARIÂNCIA</b>			
Área de estudo	5,96	17,15	44,39
Setor norte	4,29	34,69	73,54
Setor sul	7,33	8,34	27,99
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO</b>			
Área de estudo	5,6%	9,4%	16,6%
Setor norte	4,0%	10,8%	16,3%
Setor sul	7,3%	7,9%	17,1%

GRÁFICO 13 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS PREDITIVOS PELA INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS TC E RL



Pela média aritmética é notificado que na área de estudo, setor norte e sul, os valores tanto da UM-01 quanto da UM-02 são parecidos para o modelo M20 e M30 e discrepantes se comparados com o M90. Assim sendo, os valores de dispersão por desvio padrão apresentam

um aumento proporcionalmente a resolução espacial. Por exemplo, para a AE, o DP é de 2,44 para o M20, 4,14 para o M30 e 6,66 para o M90, evidenciando que apesar de métodos de integrações diferentes, um modelo digital do terreno permite elaborar atributos topográficos consistentes e chegar a resultados aproximados. Ainda foi observado que tanto por variância quanto por coeficiente de variação, os dados se dispersam da mesma maneira.

Ao comparar por setores, o M20 e o M90 tiveram a menor discrepância dos dados para o setor norte, enquanto que a variação entre os dois métodos para o modelo de 30 teve menor valor para o setor sul.

A comparação entre as predições de tabulação cruzada e das regressões logísticas, foi feita por acurácia geral e o índice Kappa (TABELA 26).

TABELA 26 - CONCORDÂNCIA ENTRE TABULAÇÃO CRUZADA E REGRESSÕES LOGÍSTICAS

<b>MODELO</b>	<b>M20</b>	<b>M30</b>	<b>M90</b>
<b>ÁREA DE ESTUDO</b>			
Acurácia Geral	0,83	0,79	0,69
Índice Kappa	0,66	0,58	0,35
<b>SETOR NORTE</b>			
Acurácia Geral	0,83	0,83	0,70
Índice Kappa	0,66	0,66	0,40
<b>SETOR SUL</b>			
Acurácia Geral	0,84	0,77	0,68
Índice Kappa	0,65	0,50	0,24

Modelos digitais do terreno conseguem detalhar mais os mapeamentos, os dados revelam que o modelo digital do terreno de 20 metros foi o que teve a melhor concordância entre os dois métodos na área de estudo, atingindo 0,66 do índice Kappa, seguido do modelo de elevação de 30 metros, com 0,58 e por fim o de 90 metros com 0,35. Nota-se que para os dois índices de concordância o setor norte obteve valores maiores que os do setor sul, sobretudo quando comparado com o M90 que chegou ao índice Kappa de 0,24, evidenciando deste modo as diferenças que ocorrem entre os métodos de integração ao usar este tipo de modelo de elevação.

## 5.7 VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE (ACURÁCIA) DOS MAPEAMENTOS

Para a conferência da qualidade dos seis modelos preditos (TC e RL), foi usado como comparação o mapeamento pedológico de Fasolo *et al.* (1988) e o Mapa de Solos do Estado do

Paraná EMBRAPA (2007). Os parâmetros de análise (verificação) de qualidade foram: matrizes de erro, acurácia geral, acurácia do mapeador e do usuário e o índice Kappa.

Os seis modelos preditos foram comparados, por meio de tabulação cruzada com os dois trabalhos preexistente, gerando, portanto, doze análises. A primeira etapa deste processo de verificação foi a elaboração de quadros organizados em forma de matrizes de erros. Esses quadros apresentam ainda a quantidade de *pixels* corretamente classificados para cada uma das classes de unidades de mapeamento, ou seja, quantos pixels foram corretamente classificados entre o mapeamento preexistente e a predição observada. Deste modo, foi possível também estipular em porcentagem os valores de acurácia do usuário e do mapeador assim como os índices de acurácia geral e Kappa.

#### 5.7.1 Acurácia das predições por tabulação cruzada

O QUADRO 15, o QUADRO 16 e o QUADRO 17 apresentam as matrizes de erro dos três modelos preditos por TC comparados com o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988), enquanto que o QUADRO 18, o QUADRO 19 e o QUADRO 20 compara esses mesmos três modelos com o mapeamento da EMBRAPA (2007).

QUADRO 15 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDT 20 (TC) COM MAPA DE FASOLO

CLASSES		PREDIÇÃO: TC - MDT 20			
		UM-01	UM-02	$\Sigma$ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: FASOLO	UM-01	1.435.764	467.246	1.903.010	75,45%
	UM-02	701.158	2.035.864	2.737.022	74,38%
	$\Sigma$ coluna	2.136.922	2.503.110	$\Sigma$ Total = 4.640.032	Kappa = 0,49
	AU	67,19%	81,33%	AG = 0,75	C% = 74,82 D% = 25,18

QUADRO 16 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 30 (TC) COM MAPA DE FASOLO

CLASSES		PREDIÇÃO: TC - MDE 30			
		UM-01	UM-02	∑ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: FASOLO	UM-01	655.866	190.397	846.263	77,50%
	UM-02	359.805	856.213	1.216.018	70,41%
	∑ coluna	1.015.671	1.046.610	∑ total = 2.062.281	Kappa = 0,46
	AU	64,57%	81,81%	AG = 0,73	C% = 73,32 D% = 26,68

QUADRO 17 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 90 (TC) COM MAPA DE FASOLO

CLASSES		PREDIÇÃO: TC - MDE 90			
		UM-01	UM-02	∑ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: FASOLO	UM-01	61.039	33.272	94.311	64,72%
	UM-02	32.452	102.380	134.832	75,93%
	∑ coluna	93.491	135.652	∑ total = 229.143	Kappa = 0,41
	AU	65,29%	75,47%	AG = 0,71	C% = 71,32 D% = 28,68

Essas matrizes de erros puderam revelar que a predição do M20 apresentou melhor correlação com o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988), com sua AG chegando a 0,75 e o índice Kappa em 0,49, sendo justificado pela proximidade de escala de mapeamento. Destaca-se os valores de acertos da classe UM-02, atingindo os 81% de acurácia de usuário. Deve-se destacar que porções mapeadas a mais pela predição são aquelas que no mapeamento preexistente podem apresentar carência de informação. Como exemplo os fundos de vale com valores de atributos topográficos pertencentes a UM-02 e que no mapeamento de Fasolo *et al.* (1988) consta como UM-01. Assim, faz-se necessário o trabalho de campo para averiguar a informação e calibrar melhor o modelo.

O modelo de predição M30 apresentou resultados de qualidade abaixo do M20, podendo ser explicado pela resolução espacial do modelo de elevação e pela suavização das drenagens, conforme discutido anteriormente. Ao analisar a AU, a classe UM-01 teve 64% de

acerto, evidenciando que o modelo, mesmo que em valor de área tenha sido semelhante ao M20, a posição das classes na vertente variou ao ponto de influenciar nesta análise de acurácia.

O modelo de 90 metros teve a pior acurácia entre os três, atingindo o valor do índice Kappa de 0,41 e a AG de 0,71. Pelas figuras anteriormente apresentadas foi possível observar que esta resolução espacial é mais indicada para mapeamentos com escala de detalhe menores (mapeamentos regionais). Os erros analisados pelas acurácias de mapeador e usuário permitem afirmar que houve as mesmas proporções de pixels classificados corretamente para as duas análises, ou seja, as superestimações dos mapeamentos onde a classe UM-01 deveria mapear como UM-02 e onde a classe UM-02 deveria mapear como UM-01.

Os quadros seguintes (QUADRO 18, QUADRO 19 e QUADRO 20) apresentam as matrizes de erros para o mapeamento da EMBRAPA (2007).

QUADRO 18 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDT 20 (TC) COM MAPA DA EMBRAPA

CLASSES		PREDIÇÃO: TC - MDT 20			
		UM-01	UM-02	∑ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: EMBRAPA	UM-01	<b>6.114.038</b>	4.226.555	10.340.593	59,13%
	UM-02	2.814.519	<b>8.216.772</b>	11.031.291	74,49%
	∑ coluna	8.928.557	12.443.327	<b>∑ total = 21.371.884</b>	<b>Kappa = 0,34</b>
	AU	68,48%	66,03%	<b>AG = 0,67</b>	<b>C% = 67,05 D% = 32,95</b>

QUADRO 19 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 30 (TC) COM MAPA DA EMBRAPA

CLASSES		PREDIÇÃO: TC - MDE 30			
		UM-01	UM-02	∑ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: EMBRAPA	UM-01	<b>2.811.381</b>	1.784.332	4.595.713	61,17%
	2	1.114.903	<b>3.787.812</b>	4.902.715	77,26%
	∑ coluna	3.926.284	5.572.144	<b>∑ total = 9.498.428</b>	<b>Kappa = 0,39</b>
	AU	71,60%	67,98%	<b>AG = 0,69</b>	<b>C% = 69,48 D% = 30,52</b>

QUADRO 20 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 90 (TC) COM MAPA DA EMBRAPA

CLASSES		PREDIÇÃO: TC - MDE 90			
		UM-01	UM-02	$\Sigma$ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: EMBRAPA	UM-01	247.947	262.827	510.774	48,54%
	UM-02	120.320	424.236	544.556	77,90%
	$\Sigma$ coluna	368.267	687.063	$\Sigma$ total = 1.055.330	Kappa = 0,27
	AU	67,33%	61,75%	AG = 0,64	C% = 63,69 D% = 36,31

O intuito de se fazer uma comparação dos modelos preditos com este mapeamento é que, para o estado do Paraná, esta base pedológica é a informação com maior detalhe cartográfico. Tendo em vista que os modelos preditivos são na escala 1:100.000, quando se comparar os mesmos com o mapeamento da EMBRAPA (2007) os resultados da verificação de qualidade foram inferiores em relação aos verificados com os de Fasolo *et al.* (1988).

A primeira constatação é que o modelo de 30 metros apresentou, de um modo geral, os melhores indicativos de qualidade, haja vista que o M20 consegue mapear as unidades de um modo mais detalhado ao longo das vertentes, divergindo das informações presentes no mapeamento da EMBRAPA (2007). Este fato pode ser notado a partir da acurácia do mapeador para a classe UM-01 para o M20 que tem um valor de apenas 59%, ou seja, mapeou porções de UM-02 em áreas mapeadas pela EMBRAPA de UM-01.

A predição realizada a partir do modelo de elevação de 90 metros apresentou, assim como no mapeamento de Fasolo *et al.* (1988), os piores índices de qualidade. Ocorreu a mesma situação com a AM que apesar da resolução espacial ser de 90 e buscar porções mais generalizadas, como fundos de vales, foi possível realizar um mapeamento com um certo grau de detalhe, e com isso teve um valor de 48% de acerto. Essa discordância proporcionou um valor menor do índice Kappa, atingindo o de 0,27 que é considerada na literatura apresentada um valor qualidade de nível razoável.

#### 5.7.1.1 Verificação de qualidade entre os atributos topográficos discretizados e o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988)

Na tentativa de entender quais foram os atributos topográficos que tiveram maior e menor influência no mapeamento, para cada modelo preditivo foi realizada a quantificação dos

acertos e erros (números de *pixels*) por meio da tabulação cruzada entre o atributo topográfico em questão com os dados do mapeamento de Fasolo *et al.* (1988). Para tal comparação, foram gerados os índices Kappa e de acurácia geral.

A verificação de qualidade foi efetuada apenas para este mapeamento, pois o processo de discretização dos atributos topográficos foi pautado, dentre outras variáveis, na análise da distribuição dos solos deste mapeamento nas vertentes da área de estudo (que é o mapeamento mais detalhado para a região de estudo). Deste modo foram elaborados o QUADRO 21, o QUADRO 22 e QUADRO 23, para os modelos de 20, 30 e 90 metros respectivamente e o GRÁFICO 14 que sintetiza as informações.

QUADRO 21 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS AT DISCRETIZADOS (M20)

CLASSES UM (M20)		CLN		IPT		IRG		ITM		PLA	
		01	02	01	02	01	02	01	02	01	02
MAP. FASOLO	01	1864830	36609	1748223	153121	1804596	96748	1900537	807	363428	1537916
	02	2152355	586238	1540187	1198501	1773450	965238	2639681	99007	1201762	1536926
	VQ	AG = 0,53	K= 0,17	AG = 0,64	K= 0,32	AG = 0,60	K= 0,27	AG = 0,43	K= 0,03	AG = 0,41	K= -0,25

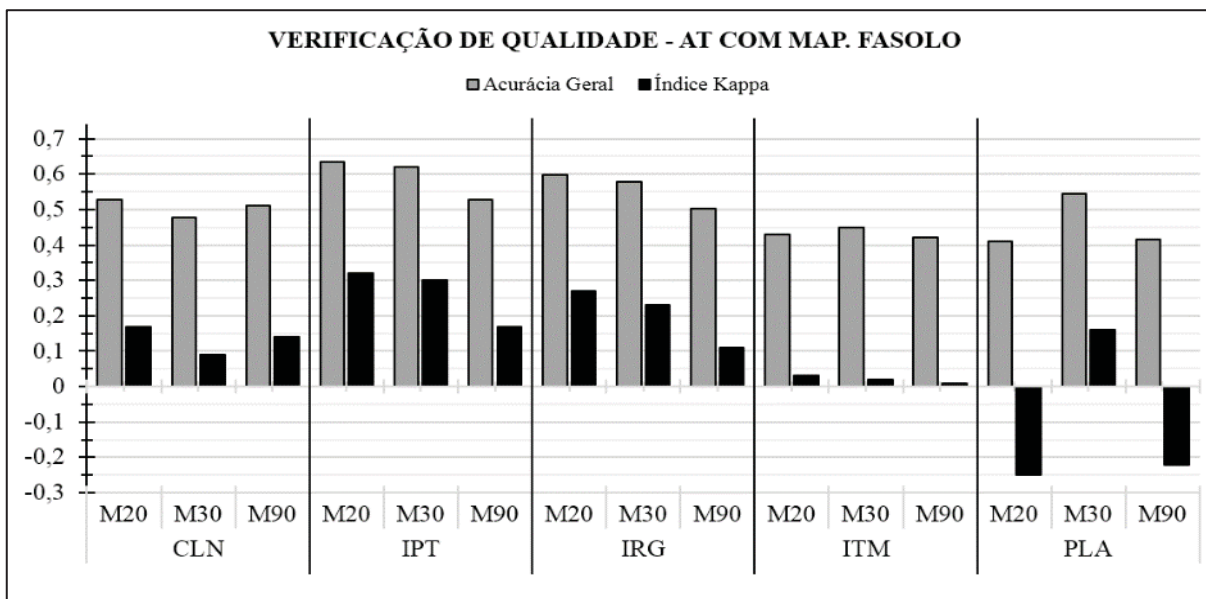
QUADRO 22 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS AT DISCRETIZADOS (M30)

CLASSES UM (M30)		CLN		IPT		IRG		ITM		PLA	
		01	02	01	02	01	02	01	02	01	02
MAP. FASOLO	01	824405	20662	795247	49820	776569	68479	732993	112074	703576	141472
	02	1059838	157376	732166	485048	799838	417395	1022705	194509	798448	418785
	VQ	AG = 0,48	K= 0,09	AG = 0,62	K= 0,30	AG = 0,58	K= 0,23	AG = 0,45	K= 0,02	AG = 0,54	K= 0,16

QUADRO 23 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS AT DISCRETIZADOS (M90)

CLASSES UM (M90)		CLN		IPT		IRG		ITM		PLA	
		01	02	01	02	01	02	01	02	01	02
MAP. FASOLO	01	91745	2190	91839	2096	83478	10457	93376	572	23859	70053
	02	109899	25309	105849	29359	103614	31594	132325	2870	63954	71277
	VQ	AG = 0,51	K= 0,14	AG = 0,53	K= 0,17	AG = 0,50	K= 0,11	AG = 0,42	K= 0,01	AG = 0,42	K= -0,22

GRÁFICO 14 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS AT DISCRETIZADOS (FASOLO)



De acordo com os dados apresentados, o atributo topográfico que teve a melhor correlação foi o IPT. Os dois parâmetros de verificação de qualidade puderam evidenciar esta informação, porém o índice Kappa consegue distinguir melhor os modelos que tiveram menor acurácia e mapearam incorretamente a classe de UM, pois não leva em conta apenas a contagem dos *pixels*, mas sim os erros de inclusão e omissão associados.

O atributo IRG também teve uma correlação satisfatória pois ficou evidente que para o contexto geomorfológico local, ele é capaz de mapear com mais eficácia que o atributo clinografia, tendo em vista que este é gerado localmente, enquanto que o IRG é gerado a partir de análises de vizinhança, conseguindo desta maneira mapear porções contínuas e que não sejam generalizadas pelo método de área mínima mapeável. Importante salientar que para estes dois atributos os melhores índices de qualidade se apresentam nos modelos preditivos de 20 metros e os piores de 90.

O índice ITM pouco contribuiu nas três predições, pois mesmo tendo índices de acurácia geral relativamente próximos dos IPT e IRG, teve uma quantidade de pixels erroneamente classificados muito alta (classe UM-01 do mapeamento preexistente mapeado como classe de UM-02), fazendo com que o índice Kappa para as três predições apresentasse valores menores que 0,1.

O atributo plano de curvatura apresentou os piores índices de qualidade, chegando a apresentar índices Kappa negativo (M20 e M90), pois mapeou áreas de topo e fundo de vale na mesma UM. Acredita-se que mesmo assim este índice contribuiu nas predições mapeando

porções da vertente que os outros índices têm dificuldade, como terços inferiores de vertentes com características convergentes.

A partir dos valores dos índices de verificação de qualidade (acurácia geral e índice Kappa), foram realizadas análises de estatística descritiva acerca dos dados apresentados, foram utilizados seguintes os parâmetros: média aritmética, desvio padrão variância e coeficiente de variação. A TABELA 27 apresenta resultados gerados a partir da integração dos três modelos preditos.

TABELA 27 – COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE QUALIDADE DOS MODELOS PARA OS AT

AT	ACURÁCIA GERAL	ÍNDICE KAPPA
<b>MÉDIA ARITMÉTICA</b>		
CLN	0,51	0,13
IPT	0,59	0,26
IRG	0,56	0,20
ITM	0,43	0,02
PLA	0,46	-0,10
<b>DESVIO PADRÃO</b>		
CLN	0,03	0,04
IPT	0,06	0,08
IRG	0,05	0,08
ITM	0,02	0,01
PLA	0,08	0,23
<b>VARIÂNCIA</b>		
CLN	0,0007	0,0016
IPT	0,0033	0,0066
IRG	0,0025	0,0069
ITM	0,0002	0,0001
PLA	0,0058	0,0522
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO</b>		
CLN	5,3%	30,3%
IPT	9,7%	30,9%
IRG	9,0%	41,0%
ITM	3,5%	50,0%
PLA	16,7%	-221,2%

É possível observar que a média aritmética dos três modelos apresentou os maiores valores para o atributo índice de posição topográfica, com acurácia geral de 0,59 e índice Kappa de 0,26. As melhores correlações foram as apresentadas no IRG e CLN, e as piores para o ITM e PLA.

Os valores de desvio padrão e variância do índice Kappa foram semelhantes, com exceção do atributo plano de curvatura com o valor de DP de 0,23 entre os três modelos

preditivos. Pelo coeficiente de variação é possível notar o tanto que este atributo variou nos seus valores entre os três modelos preditivos, pois o seu valor foi de -221%.

A TABELA 28 apresenta a comparação dos valores dos índices de verificação de qualidade feita pela integração dos atributos topográficos, a fim de observar em qual dos três modelos preditivos há os maiores valores, e quais as medidas de variação dos mesmos.

Nota-se que o modelo de elevação de 30 metros apresentou os maiores valores de média aritmética dos cinco atributos topográficos. Este valor pode ser explicado com o M20 e o M90 cujos valores do plano de curvatura foram negativos para o índice Kappa.

Assim sendo, os modelos de 20 e 90 metros apresentaram uma maior variação dos dados, na qual pelo desvio padrão pode-se observar que o modelo de 30 apontou o menor valor, assim como para a variância e o coeficiente de variação. Importante ressaltar que no M20, este coeficiente apresentou valor de 211% e o M90 de 377%.

TABELA 28 – COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE QUALIDADE DOS AT PARA OS MODELOS

<b>MODELO PREDITIVO</b>	<b>ACURÁCIA GERAL</b>	<b>ÍNDICE KAPPA</b>
<b>MÉDIA ARITMÉTICA</b>		
M20	0,52	0,11
M30	0,53	0,16
M90	0,48	0,04
<b>DESVIO PADRÃO</b>		
M20	0,10	0,23
M30	0,07	0,11
M90	0,05	0,16
<b>VARIÂNCIA</b>		
M20	0,0098	0,0523
M30	0,0050	0,0123
M90	0,0029	0,0251
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO</b>		
M20	19,1%	211,8%
M30	13,3%	69,2%
M90	11,3%	377,0%

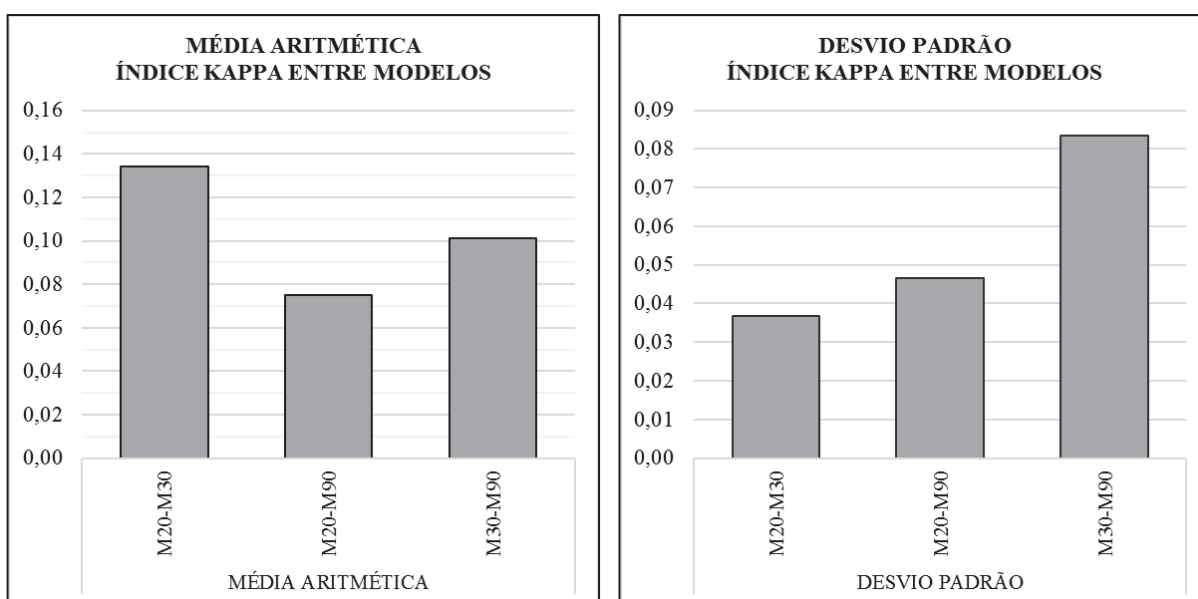
A última análise deste item teve a finalidade de exibir quais modelos possuem as melhores médias aritméticas nos índices de verificação de qualidade e os modelos que variam mais entre eles por desvio padrão, ou seja, foi comparado o modelo de 20 metros com o de 30, o de 20 metros com 90 e o de 30 metros com o de 90 (TABELA 29).

TABELA 29 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS AT ENTRE OS MODELOS PREDITIVOS

MÉDIA ARITMÉTICA			DESVIO PADRÃO		
M20-30	M20-90	M30-90	M20-30	M20-90	M30-90
<b>ACURÁCIA GERAL</b>					
0,53	0,50	0,50	0,01	0,03	0,04
<b>ÍNDICE KAPPA</b>					
0,13	0,08	0,10	0,04	0,05	0,08

Observa-se que pelo viés do índice Kappa (GRÁFICO 15), as melhores médias ocorrem quando se integram os modelos de 20 e 30 metros, enquanto que as piores ficaram entre os modelos 20 e 90 metros. A diferença de resolução espacial pode explicar essas informações, assim como a diferença entre a comparação de M20-90 seja maior que a M30-90, tendo em vista que estes são dois modelos de elevação, enquanto o M20 é único MDT em questão. Ainda em relação a variação dos dados, o desvio padrão apresentou a menor variação entre a comparação M20-30.

GRÁFICO 15 – MÉDIA ARITMÉTICA E DESVIO PADRÃO – ÍNDICE KAPPA ENTRE OS MODELOS DE PREDIÇÃO (M20-M30, M20-M90 E M30-M90)



### 5.7.2 Acurácia das predições por regressões logísticas

Assim como por tabulação cruzada, foi efetuada a avaliação por matriz de erros, da qualidade da informação gerada pelo método de regressões logísticas. Para o QUADRO 24, o QUADRO 25 e o QUADRO 26 foram apresentados os resultados para as comparações dos modelos preditos com o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988).

QUADRO 24 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDT 20 (RL) COM MAPA DE FASOLO

CLASSES		PREDIÇÃO: RL - MDT 20			
		UM-01	UM-02	$\Sigma$ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: FASOLO	UM-01	<b>1.513.836</b>	389.139	1.902.975	79,55%
	UM-02	809.461	<b>1.927.596</b>	2.737.057	70,43%
	$\Sigma$ coluna	2.323.297	2.316.735	$\Sigma$ total = <b>4.640.032</b>	<b>Kappa = 0,48</b>
	AU	65,16%	83,20%	<b>AG = 0,74</b>	<b>C% = 74,17</b> <b>D% = 25,83</b>

QUADRO 25 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 30 (RL) COM MAPA DE FASOLO

CLASSES		PREDIÇÃO: RL - MDE 30			
		UM-01	UM-02	$\Sigma$ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: FASOLO	UM-01	<b>676.453</b>	169.853	846.306	79,93%
	UM-02	418.247	<b>797.728</b>	1.215.975	65,60%
	$\Sigma$ coluna	1.094.700	967.581	$\Sigma$ total = <b>2.062.281</b>	<b>Kappa = 0,44</b>
	AU	61,79%	82,45%	<b>AG = 0,71</b>	<b>C% = 71,48</b> <b>D% = 28,52</b>

QUADRO 26 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 90 (RL) COM MAPA DE FASOLO

CLASSES		PREDIÇÃO: RL - MDE 90			
		UM-01	UM-02	$\Sigma$ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: FASOLO	UM-01	<b>72.322</b>	21.988	94.310	76,69%
	UM-02	45.324	<b>89.509</b>	134.833	66,39%
	$\Sigma$ coluna	117.646	111.497	$\Sigma$ total = <b>229.143</b>	<b>Kappa = 0,42</b>
	AU	61,47%	80,28%	<b>AG = 0,71</b>	<b>C% = 70,62</b> <b>D% = 29,38</b>

O método das regressões logísticas permitiu gerar modelos preditivos acurados e apresentou resultados satisfatórios em relação aos índices de qualidade que foram proporcionais a sua resolução espacial, ou seja, o modelo com melhores índices de qualidade foi o M20. Este apresentou acurácia geral de 0,74 e índice Kappa com 0,48. Este valor foi influenciado pelo valor da acurácia do usuário para a classe UM-01, ou seja, 65% desta classe foi mapeada como UM-02. A mesma análise pode ser feita para os outros dois modelos, sendo que os piores índices de qualidade são observados no M90 (como o Kappa de 0,42).

O QUADRO 27, o QUADRO 28 e o QUADRO 29 apresentam a síntese das informações das análises de qualidade para o mapeamento da EMBRAPA (2007). Cabe destacar que os resultados apresentados foram os esperados, ou seja, valores menores que o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988). Neste, foi observada a dinâmica inversa, sendo que a qualidade dos modelos foi inversamente proporcional a sua resolução espacial, apresentando o M90 como o modelo preditivo com melhores índices de qualidade.

QUADRO 27 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDT 20 (RL) COM MAPA DA EMBRAPA

CLASSES		PREDIÇÃO: RL - MDT 20			
		UM-01	UM-02	∑ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: EMBRAPA	UM-01	<b>6.600.806</b>	3.738.546	10.339.352	63,84%
	UM-02	3.077.454	<b>7.955.078</b>	11.032.532	72,11%
	∑ coluna	9.678.260	11.693.624	<b>∑ total = 21.371.884</b>	<b>Kappa = 0,36</b>
	AU	68,20%	68,03%	<b>AG = 0,68</b>	<b>C% = 68,11 D% = 31,89</b>

QUADRO 28 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 30 (RL) COM MAPA DA EMBRAPA

CLASSES		PREDIÇÃO: RL - MDE 30			
		UM-01	UM-02	∑ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: EMBRAPA	UM-01	<b>3.060.491</b>	1.534.246	4.594.737	66,61%
	UM-02	1.415.226	<b>3.488.465</b>	4.903.691	71,14%
	∑ coluna	4.475.717	5.022.711	<b>∑ total = 9.498.428</b>	<b>Kappa = 0,38</b>
	AU	68,38%	69,45%	<b>AG = 0,69</b>	<b>C% = 68,95 D% = 31,05</b>

QUADRO 29 – MATRIZ DE ERROS –PREDIÇÃO DO MDE 90 (RL) COM MAPA DA EMBRAPA

CLASSES		PREDIÇÃO: RL - MDE 90			
		UM-01	UM-02	$\Sigma$ linha	AM
MAPEAMENTO PREEXISTENTE: EMBRAPA	UM-01	331.963	177.621	509.584	65,14%
	UM-02	133.193	412.553	545.746	75,59%
	$\Sigma$ coluna	465.156	590.174	$\Sigma$ total = 1.055.330	<b>Kappa = 0,41</b>
	AU	71,37%	69,90%	AG = 0,71	C% = 70,55 D% = 29,45

Através das regressões logísticas, a qualidade das predições foi coerente de acordo a escala do mapeamento da EMBRAPA (2007), por ser menos detalhado que o de Fasolo *et al.* (1988), tendo em vista que os melhores índices foram os apresentados pelo M90, com AG de 0,71 e índice Kappa de 0,41.

O modelo de 20 metros, por ter detalhado mais as feições das duas unidades de mapeamento, acabou tendo os menores índices entre os três modelos preditos.

#### 5.7.2.1 Verificação de qualidade dos pontos de controle

Pela verificação de qualidade do mapeamento, foi possível fazer uma relação de quantos pontos de controle (tanto pseudoamostras quanto amostras) acertam a sua informação de unidade de mapeamento com a do mapa preditivo final.

É possível verificar a quantidade de acertos das 1.200 pseudoamostras (validação cruzada) e das 43 amostras (validação), de acurácia geral e índice Kappa para os três mapeamentos preditivos realizados a partir das regressões logísticas através da TABELA 30.

TABELA 30 – VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE POR VALIDAÇÃO CRUZADA E VALIDAÇÃO

TÉCNICA	QUALIDADE	SETOR NORTE	SETOR SUL	AE			
<b>M20</b>							
Validação cruzada	<i>Pseudoamostras</i>	600	Acertos = 532 Erros = 68	600	1200	Acertos = 1079 Erros = 121	
	AG	0,89		0,91			Acertos = 547 Erros = 53
	Kappa	0,77		0,80			
Validação	<i>Amostras</i>	17	Acertos = 15 Erros = 2	26	43	Acertos = 37 Erros = 6	
	AG	0,88		0,85			Acertos = 22 Erros = 4
	Kappa	0,75		0,70			
<b>M30</b>							
Validação cruzada	<i>Pseudoamostras</i>	600	Acertos = 518 Erros = 82	600	1200	Acertos = 1038 Erros = 162	
	AG	0,86		0,87			Acertos = 520 Erros = 80
	Kappa	0,71		0,69			
Validação	<i>Amostras</i>	17	Acertos = 15 Erros = 2	26	43	Acertos = 34 Erros = 9	
	AG	0,88		0,73			Acertos = 19 Erros = 7
	Kappa	0,75		0,49			
<b>M90</b>							
Validação cruzada	<i>Pseudoamostras</i>	600	Acertos = 513 Erros = 87	600	1200	Acertos = 1036 Erros = 164	
	AG	0,86		0,87			Acertos = 523 Erros = 77
	Kappa	0,70		0,70			
Validação	<i>Amostras</i>	17	Acertos = 15 Erros = 2	26	43	Acertos = 36 Erros = 7	
	AG	0,88		0,81			Acertos = 21 Erros = 5
	Kappa	0,75		0,63			

Apesar dos resultados dessa verificação terem sido bastante análogos, os valores de AG foram praticamente todos acima de 0,8) e os do índice Kappa podem ser considerados bons, muito bons ou até excelentes (de acordo com QUADRO 12). As predições que tiveram os melhores índices de qualidade na validação cruzada (pseudoamostras) e na validação (amostras) foram as verificações do modelo de 20 metros (setores norte, sul e total da AE), sendo que nas pseudoamostras, o setor norte mostrou valores maiores em detrimento do setor sul. Em se tratando das amostras o resultado da verificação foi o oposto, com o setor norte apresentando valores maiores. Essas informações podem ser constatadas no GRÁFICO 16 analisadas sob o viés da estatística descritiva no GRÁFICO 17.

GRÁFICO 16 – VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE POR SETORES E TOTAL - PONTOS DE CONTROLE

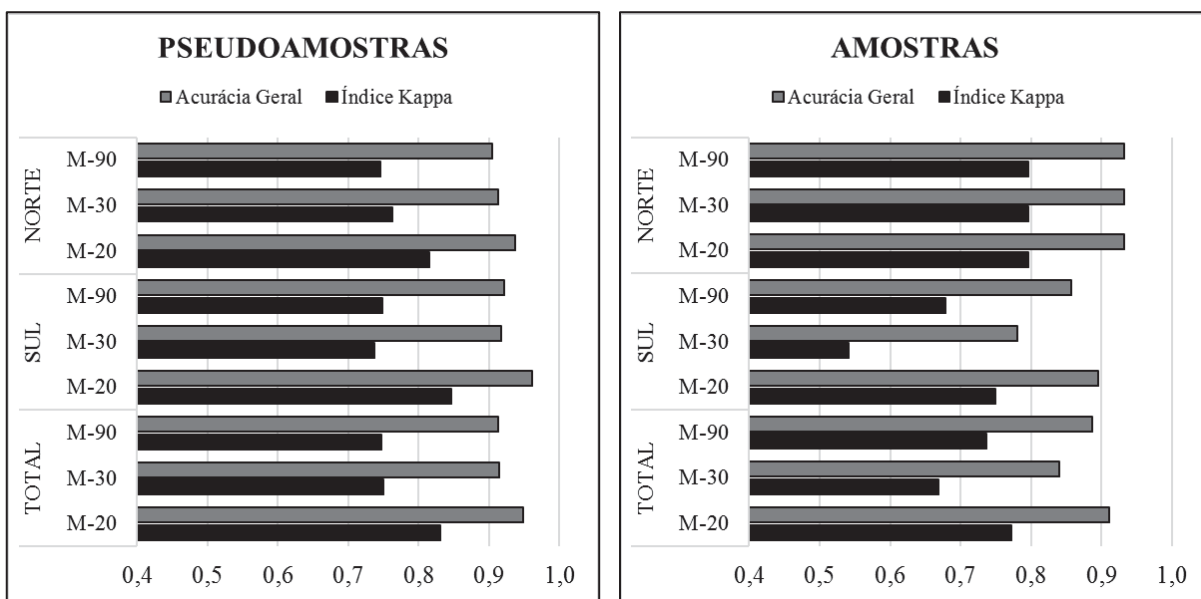
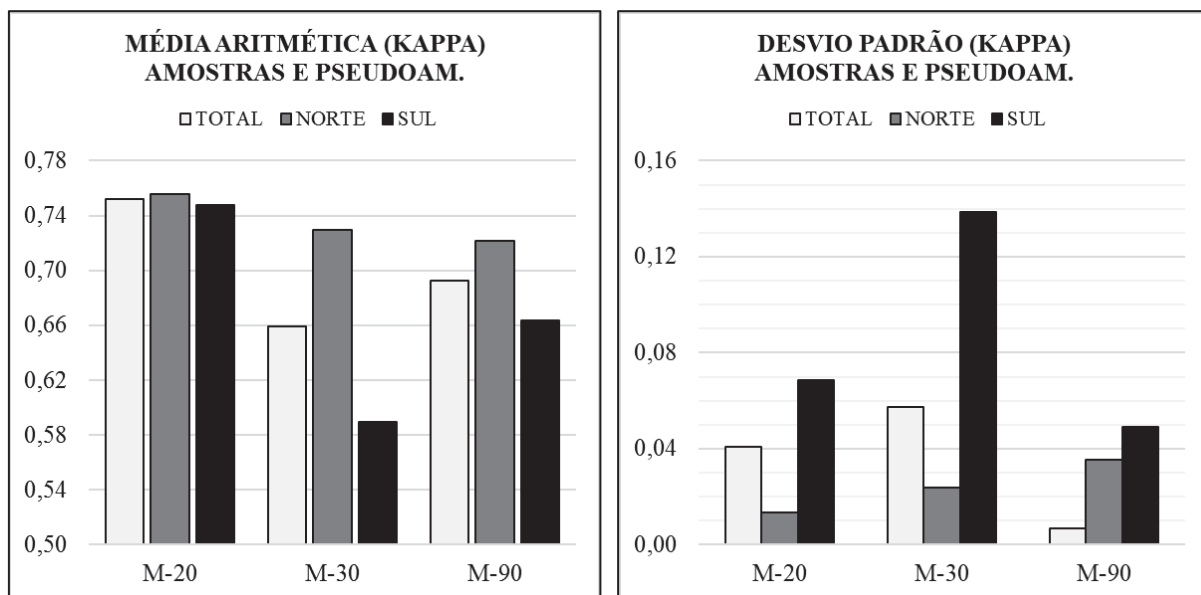


GRÁFICO 17 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE ENTRE AS PREDIÇÕES



Para finalizar esta conferência de qualidade foi feita uma média aritmética entre os resultados do índice Kappa das duas validações e os resultados apontam que nas três predições, o setor norte apresentou os índices mais elevados. Também foi possível observar que o modelo de 20 metros teve os melhores índices, tanto nos setores norte e sul quanto na somatória total. Por ter tido um índice baixo no setor sul, o modelo de 30 ficou com valores totais inferiores ao modelo de 90. Cabe reforçar a informação de que no setor sul tiveram mais pontos, e os pontos próximos dos limites das UM são mais suscetíveis a se intersectar com as informações da unidade oposta.

Também foi calculado o desvio padrão entre os valores somados das pseudoamostras e das amostras e o modelo de 30 apresentou os maiores valores para o setor sul, tendo em vista que o acerto de amostras gerou um índice Kappa de 0,4 e pseudoamostras de 0,6, destacando assim a maior variação entre os dados. As validações do M90 foram as com menor dispersão entre as informações.

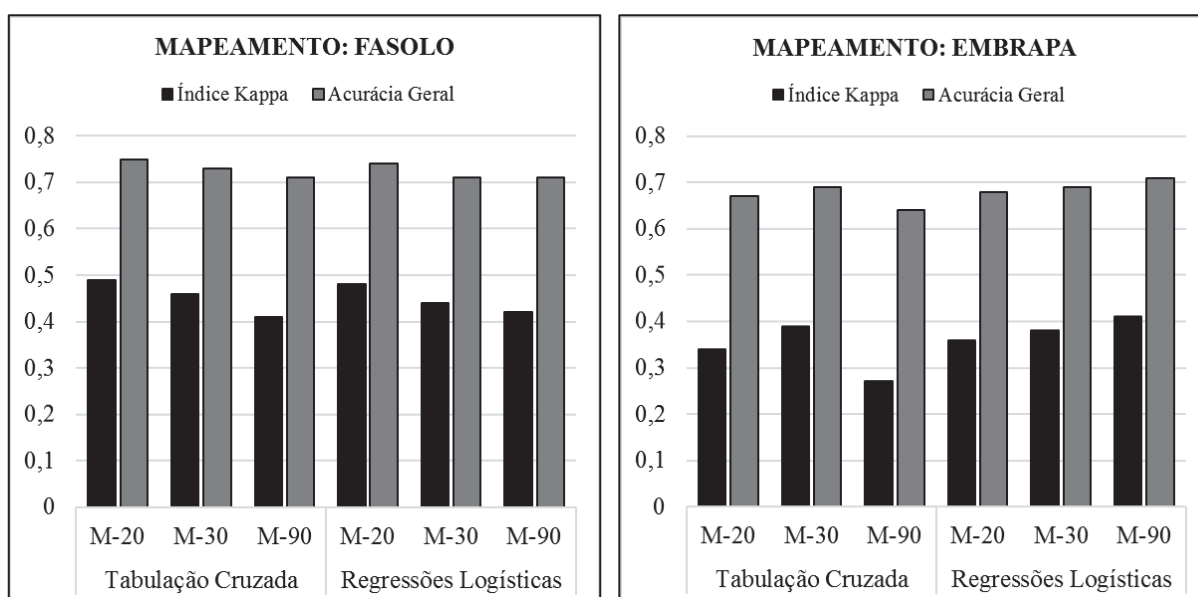
### 5.7.3 Análise comparativa entre os modelos gerados pelos métodos de integração e entre os mapeamentos preexistentes

Após realizada a verificação da qualidade dos seis modelos preditos (em relação aos dois mapeamentos preexistentes selecionados para comparação por meio de matrizes de erros), foi elaborada a TABELA 31 e o GRÁFICO 18 com as informações dos valores referentes ao índice Kappa e a acurácia geral para a área de estudo (setores norte e sul somados).

TABELA 31 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS MODELOS PREDITOS (ÁREA DE ESTUDO)

MÉTODO DE INTEGRAÇÃO	TABULAÇÃO CRUZADA			REGRESSÕES LOGÍSTICAS		
MODELO DIGITAL	M-20	M-30	M-90	M-20	M-30	M-90
<b>FASOLO</b>						
Índice Kappa	0,49	0,46	0,41	0,48	0,44	0,42
Acurácia geral	0,75	0,73	0,71	0,74	0,71	0,71
<b>EMBRAPA</b>						
Índice Kappa	0,34	0,39	0,27	0,36	0,38	0,41
Acurácia geral	0,67	0,69	0,64	0,68	0,69	0,71

GRÁFICO 18 – VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS MODELOS PREDITOS (ÁREA DE ESTUDO)

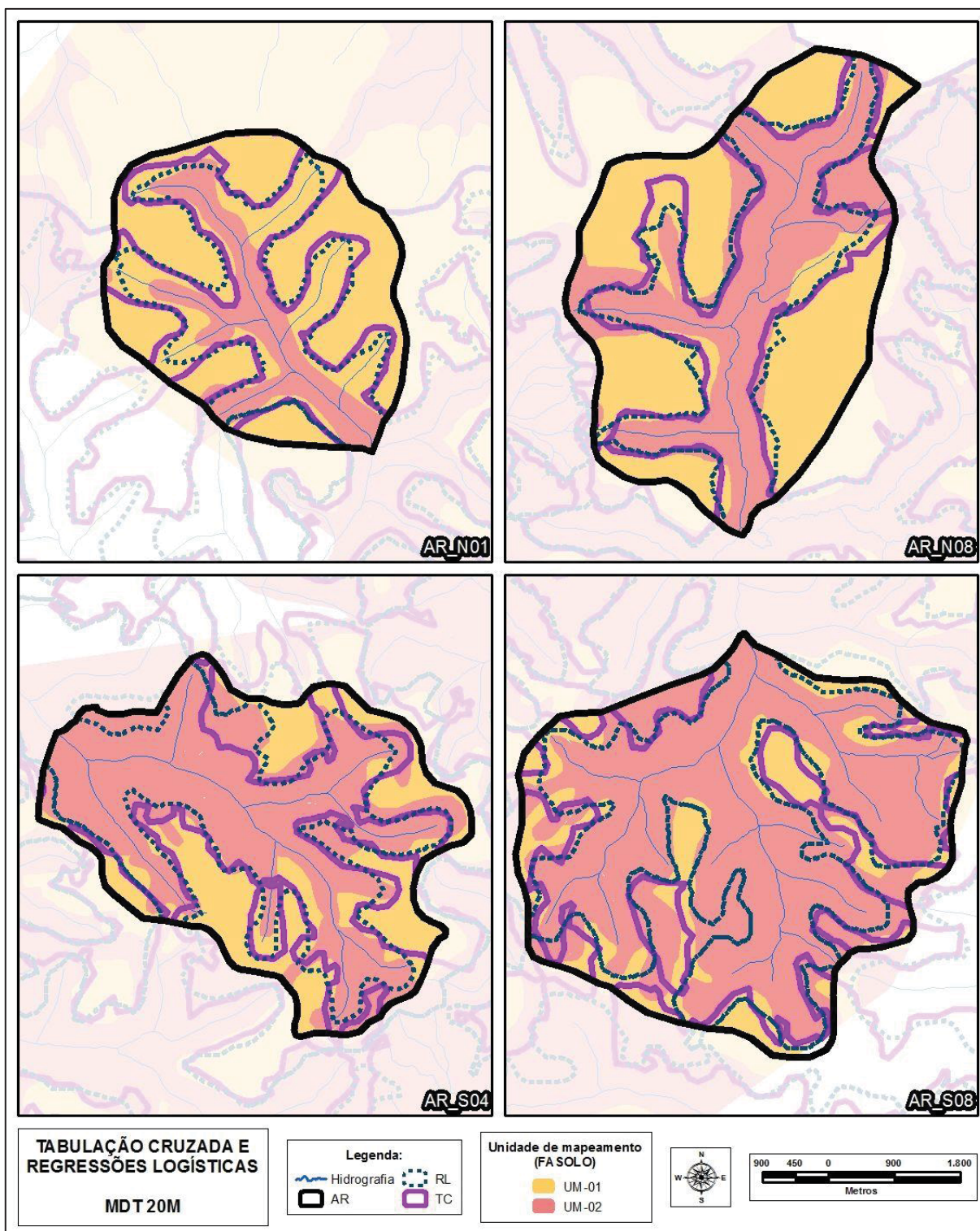


Os dados que são obtidos por acurácia geral consideram apenas a quantidade de acertos e erros, não levando em conta a variação dos erros de inclusão e omissão, por isso o índice Kappa acaba ilustrando melhor quais os modelos tiveram essa variação. Ainda é importante destacar que por questões de escala, foi esperado que na análise da verificação de qualidade dos modelos com o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988), os resultados fossem melhores que do mapeamento da EMBRAPA (2007).

Sendo assim, a predição que obteve, em relação ao primeiro mapeamento, a melhor VQ através do índice Kappa, foi a predição realizada a partir do MDT de 20 metros por tabulação cruzada e em seguida por regressões logísticas, destacando o fato dos modelos digitais do terreno gerados a partir do método Topogrid conseguem criar superfícies hidrologicamente consistentes (aprofundamento dos vales), haja vista que os modelos digitais de elevação suavizam essas informações.

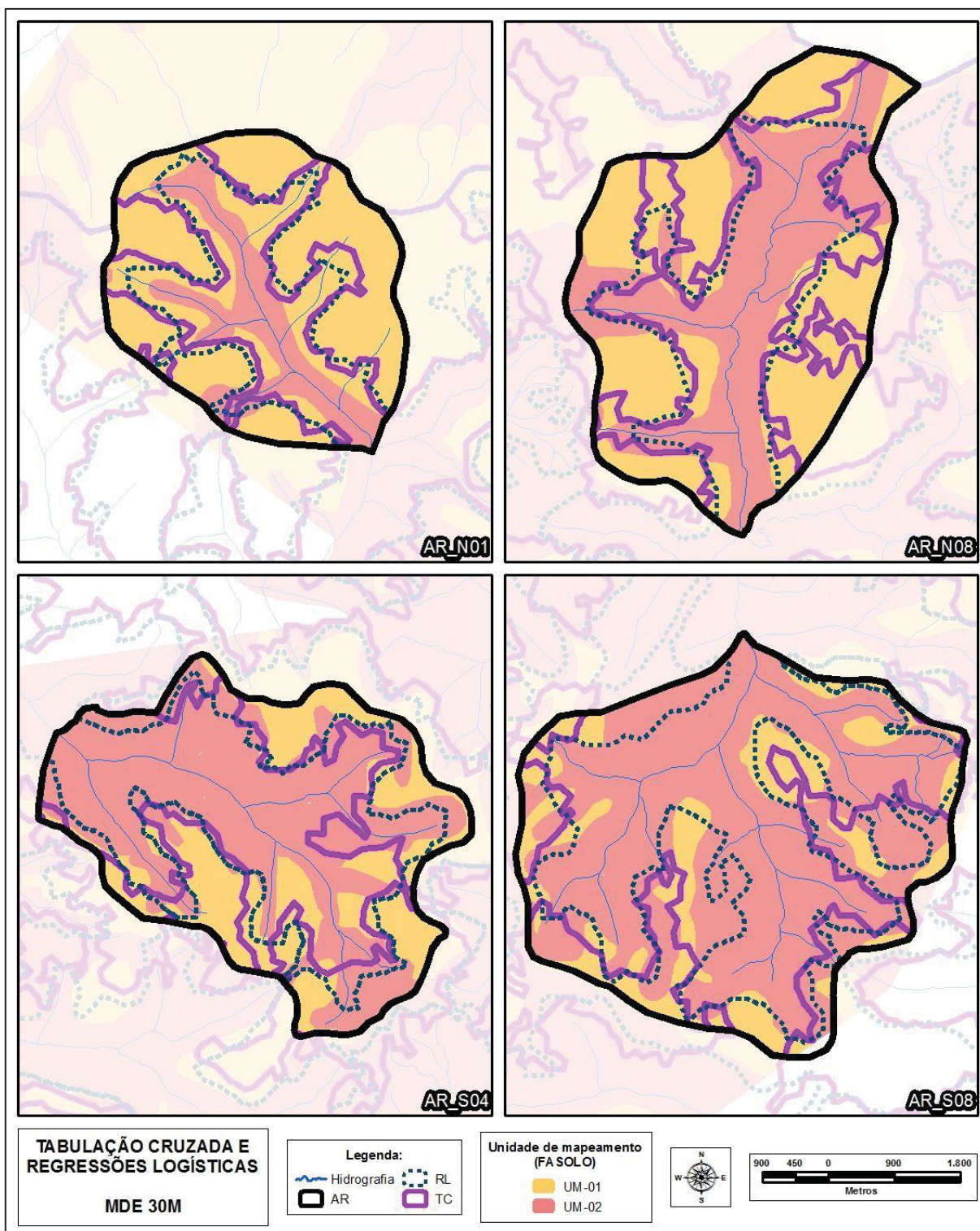
Os MDE podem mapear as matas ciliares nos fundos dos vales e com isso mascaram as informações das características do terreno, que através da elaboração dos atributos topográficos influenciam nas predições. A FIGURA 60 ilustra as diferenças entre a os limites das duas UM (juntamente com as informações do mapeamento preexistente) preditos por tabulação cruzada e regressões logísticas para o modelo digital do terreno de 20 metros.

FIGURA 60 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO E MAP. DE FASOLO (M20)



As predições a partir dos modelos de elevação de 30 metros, tanto por TC quanto por RL (FIGURA 61), pela verificação de qualidade se classificaram melhor que os dois modelos de 90 metros, evidenciando desta maneira que quanto menor a resolução espacial, melhor são os resultados de qualidade dos modelos preditos.

FIGURA 61 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO E MAP. DE FASOLO (M30)



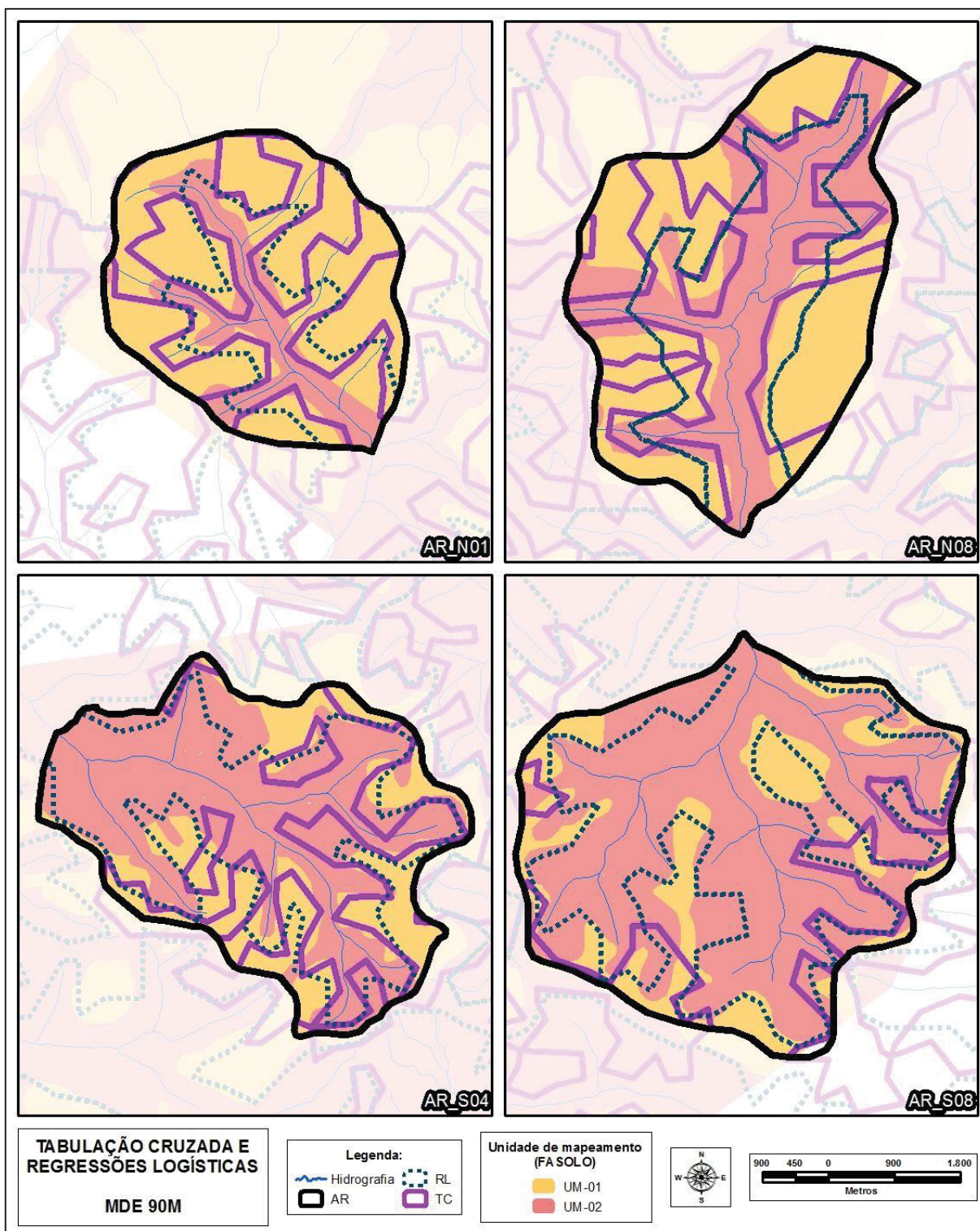
Outro fator que merece consideração é que tanto nas predições de 20 metros quanto nas de 30, o método de tabulação cruzada apresentou os melhores resultados. Tal fato pode ser explicado pelo viés do conhecimento tácito, tendo em vista que o processo de discretização dos atributos topográficos é realizado acima de tudo pelo conhecimento empírico da distribuição

dos solos nas vertentes da área de estudo. Ou seja, esse conhecimento é adquirido não somente pela leitura dos trabalhos de mapeamento e gênese dos solos realizados na região, mas acima de tudo, por meio de trabalhos de campo.

Apenas a predição do M90 por RL teve qualidade melhor que da TC, refletindo a dificuldade de se manipular as informações presentes nos atributos topográficos elaborados para este tipo de modelo de elevação. Conforme a FIGURA 62 é possível observar ainda as diferenças existentes entre os polígonos gerados pelos dois métodos de integração.

Nota-se que mesmo sendo o mesmo modelo de elevação, a predição por tabulação cruzada criou polígonos menos condizentes com a real distribuição dos solos da região, notado principalmente pelas arestas criadas e também por generalizar as informações ao se comparar com a predição por TC.

FIGURA 62 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO E MAP. DE FASOLO (M90)



Para efeito de visualização, a FIGURA 63 e a FIGURA 64 ilustram as porções onde ocorreram os erros e os acertos, tomando como exemplo a predição M20 por RL nas dezesseis áreas de referência (setores norte e sul) ao ser comparada com o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988).

As áreas de fundo de vale e de terços superiores de vertente (e até mesmo topos), foram as porções da vertente com maior quantidade de acertos, tendo em vista que essas são áreas contidas no centro dos polígonos preditos. Em outras palavras, a maior quantidade de erros ocorre nas porções limites entre as duas unidades de mapeamento em questão.

FIGURA 63 – ACERTOS E ERROS RL (M20) – AR NORTE

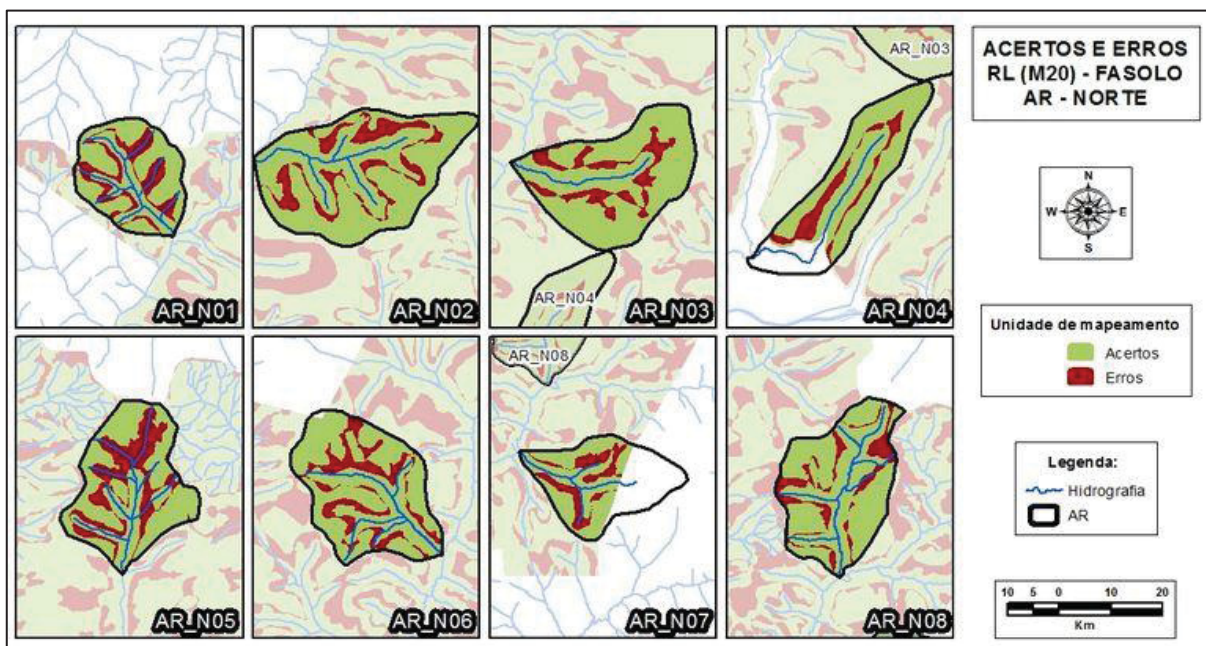
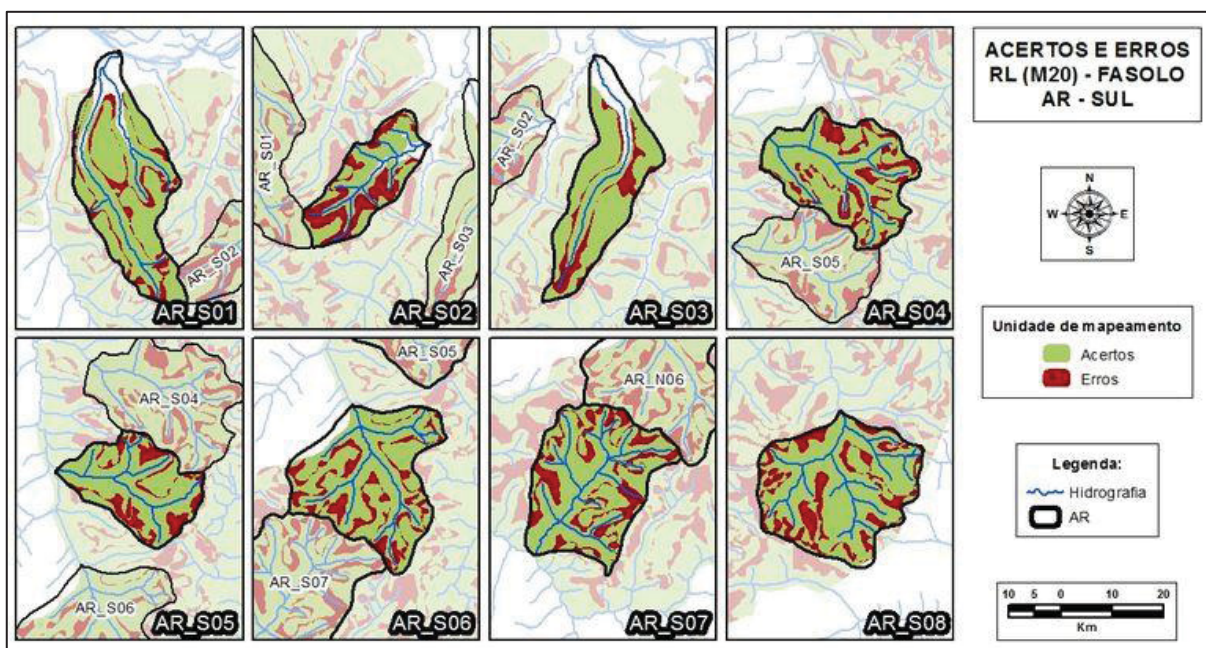


FIGURA 64 – ACERTOS E ERROS RL (M20) – AR SUL



Nesse mesmo contexto, a FIGURA 65, a FIGURA 66 e a FIGURA 67 permitem avaliar de forma mais detalhada quais as porções tiveram os acertos das UM em relação a esse mesmo mapeamento preexistente. Foram usadas as três predições realizadas por regressões logísticas para que pudesse ser feita uma comparação entre as mesmas. Cabe destacar que para cada comparação, foi gerado um *grid* a partir do *shapefile* do mapeamento com a respectiva resolução espacial.

Na AR\_N01 fica evidente o ganho de informação que a predição proporciona, pois no mapeamento preexistente as áreas a leste da bacia contêm as mesmas características geomorfológica (observada pelas curvas de nível) e que foi mapeada como UM-01.

Assim sendo, a análise de qualidade pode ficar comprometida pois muitas vezes o erro pode ser considerado um ganho de informações. Para tanto, necessita-se trabalhos de campo para verificar por análises consistentes qual classe de solo (SiBCS) é encontrada nesta porção.

O setor norte possui menos áreas com erros de omissão em comparação com o setor sul, evidenciando que pode haver uma supervalorização da classe UM-02 neste setor, pois é possível notar que alguns topos estão mapeados nesta classe, o que se mostra incoerente com os trabalhos de mapeamento supramencionados.

Ainda é possível perceber nessas três figuras a generalização das informações conforme o tamanho dos modelos preditos, tendo o M20 com um detalhamento maior que o M30 e o M90.

FIGURA 65 – ACERTOS E ERROS RL (M20) – AR

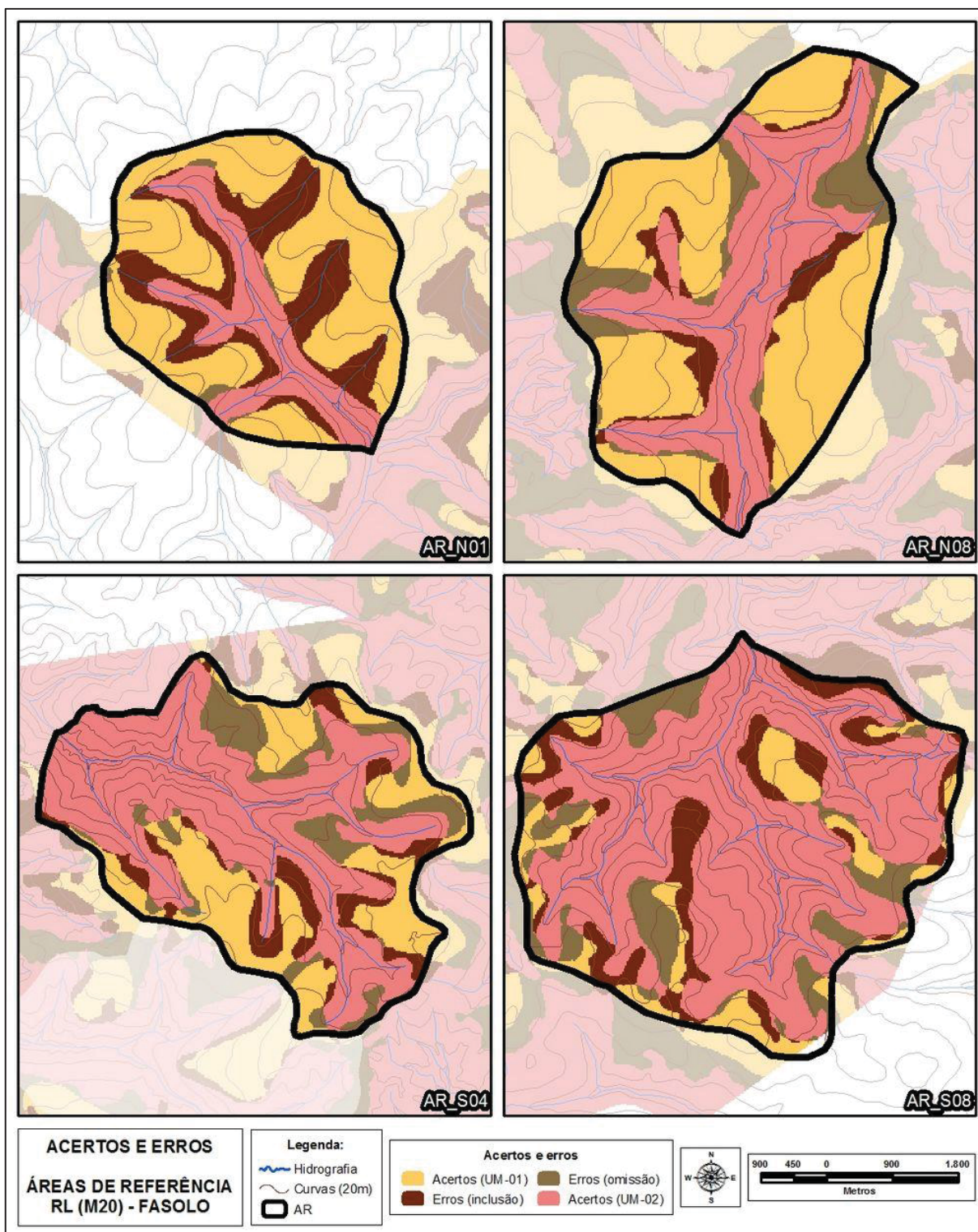


FIGURA 66 – ACERTOS E ERROS RL (M30) – AR

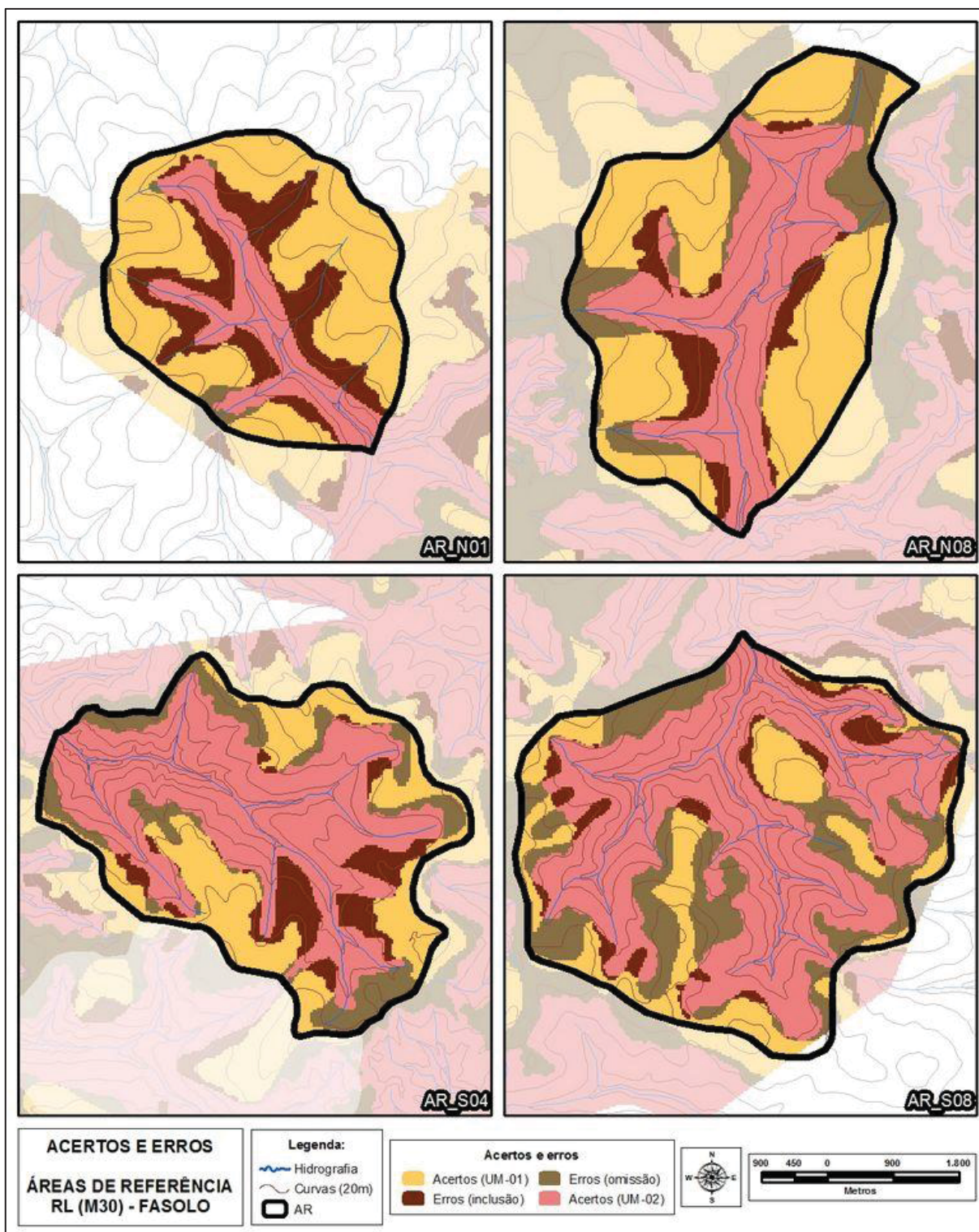
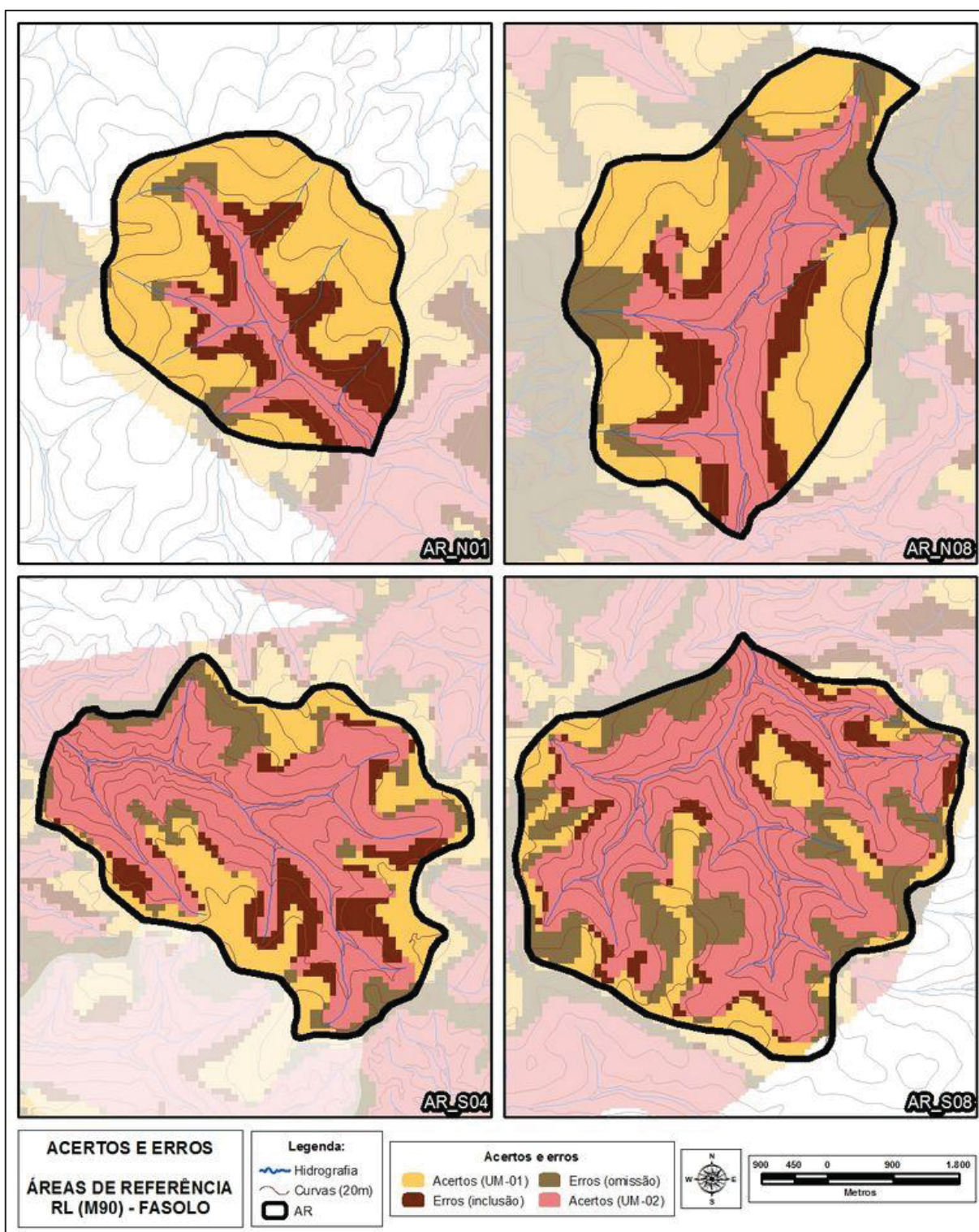


FIGURA 67 – ACERTOS E ERROS RL (M90) – AR

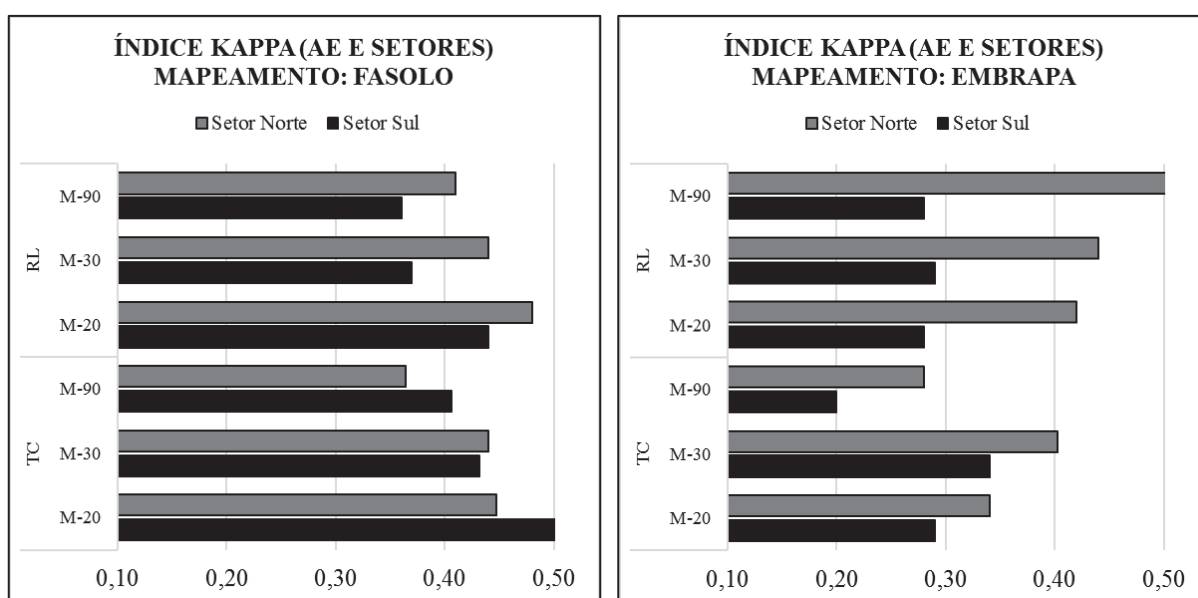


Também foi feita uma análise comparativa entre os setores norte e sul, tendo por base os valores do índice Kappa para os seis modelos preditivos gerados pelos dois métodos de integração (TABELA 32 e GRÁFICO 19).

TABELA 32 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES

MÉTODO DE INTEGRAÇÃO	TABULAÇÃO CRUZADA			REGRESSÕES LOGÍSTICAS		
	MODELO DIGITAL	M-20	M-30	M-90	M-20	M-30
<b>FASOLO</b>						
Área de estudo	0,49	0,46	0,41	0,48	0,44	0,42
Setor norte	0,45	0,44	0,36	0,48	0,44	0,41
Setor sul	0,52	0,43	0,41	0,44	0,37	0,36
<b>EMBRAPA</b>						
Área de estudo	0,34	0,39	0,27	0,36	0,38	0,41
Setor norte	0,34	0,40	0,28	0,42	0,44	0,51
Setor sul	0,29	0,34	0,20	0,28	0,29	0,28

GRÁFICO 19 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES - FASOLO E EMBRAPA



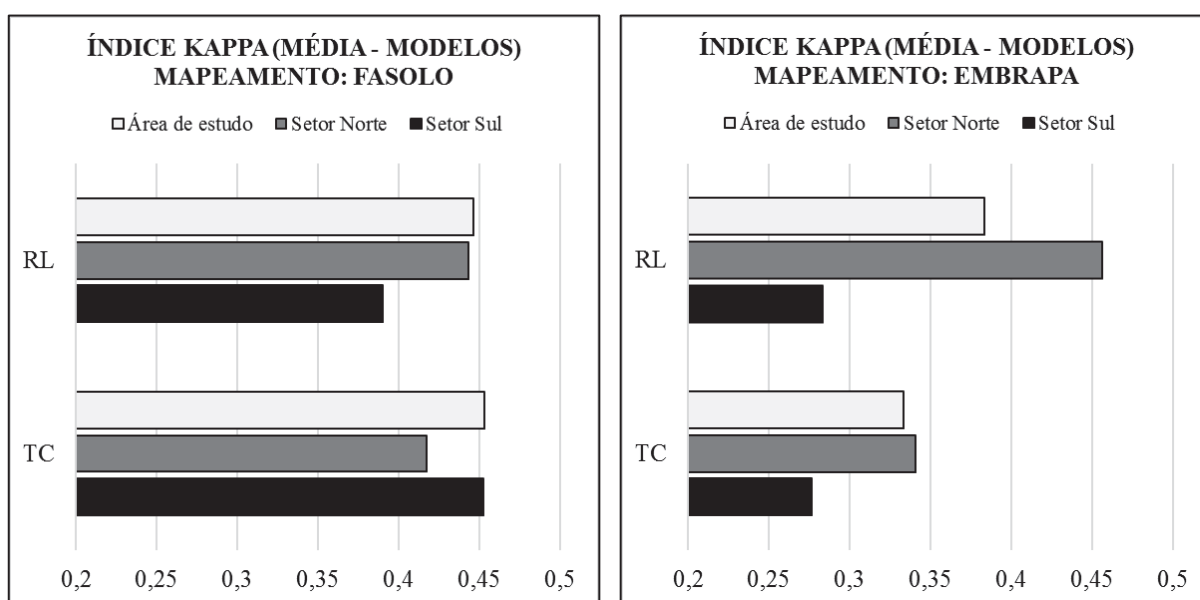
Ao se comparar com o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988), o setor norte dos modelos preditos pelo método das regressões logísticas, receberam as melhores classificações no índice Kappa ressaltando mais uma vez que o M20 obteve o maior valor. Para o método da tabulação cruzada, este modelo também foi o melhor classificado, contudo o setor sul teve melhores resultados (com exceção do M30), que podem ser observados pelo cálculo da média aritmética entre os três modelos na TABELA 33 e no GRÁFICO 20.

Comparando as predições com o mapeamento da EMBRAPA (2007), houve para as seis análises uma melhor classificação no setor norte, com destaque para o M90 de RL que atingiu o valor do índice Kappa de 0,51 (sendo o maior de todas as análises), ressaltando que este modelo mais generalizado condiz com a escala do mapeamento preexistente. Contudo, por tabulação cruzada os valores foram baixos para os dois setores (0,28 e 0,20 respectivamente).

TABELA 33 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES (MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE MODELOS)

MÉTODO DE INTEGRAÇÃO	TABULAÇÃO CRUZADA	REGRESSÕES LOGÍSTICAS
<b>FASOLO</b>		
Área de estudo	0,45	0,45
Setor norte	0,42	0,44
Setor sul	0,45	0,39
<b>EMBRAPA</b>		
Área de estudo	0,33	0,38
Setor norte	0,34	0,46
Setor sul	0,28	0,28

GRÁFICO 20 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES (MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE MODELOS) - FASOLO E EMBRAPA

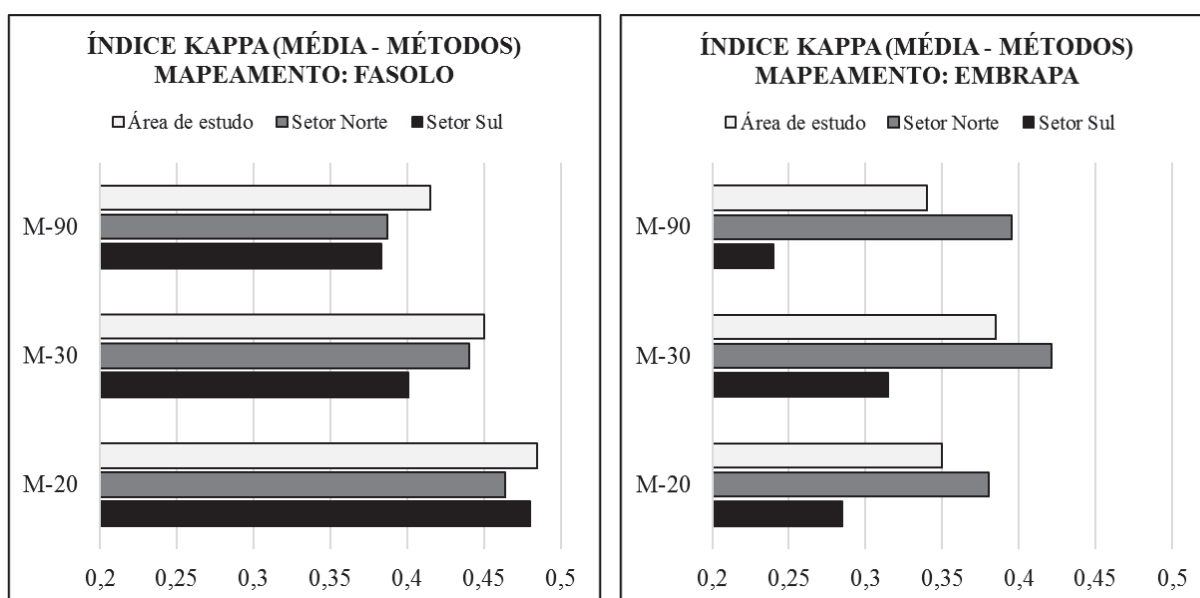


Ao ser efetuada a média aritmética dos dados do índice Kappa dos dois métodos de integração dos atributos topográficos (TABELA 34 e GRÁFICO 21) foi reforçada a informação que em comparação com o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988) o modelo com melhores índices é o M20, sendo os piores índices pertencentes ao modelo M90. Em contrapartida, para o mapeamento da EMBRAPA (2007) as médias apontam que a predição com índice Kappa mais alto é o M30. O M90 recebeu valores muito baixos para o setor sul, em detrimento da predição por tabulação cruzada para este setor ter recebido o índice 0,20 (TABELA 32), cujo valor seja considerado de ruim a péssimo pela literatura.

TABELA 34 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES (MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO)

MODELO DIGITAL	M-20	M-30	M-90
<b>FASOLO</b>			
Área de estudo	0,48	0,45	0,42
Setor norte	0,46	0,44	0,39
Setor sul	0,48	0,40	0,38
<b>EMBRAPA</b>			
Área de estudo	0,35	0,39	0,34
Setor norte	0,38	0,42	0,40
Setor sul	0,29	0,32	0,24

GRÁFICO 21 – ÍNDICE KAPPA POR SETORES (MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO) - FASOLO E EMBRAPA



#### 5.7.4 Análise estatística descritiva do índice Kappa entre os modelos preditos e os mapeamentos preexistentes

A última análise efetuada teve o intuito de revelar a média aritmética e a dispersão (desvio padrão, variância e coeficiente de variação) dos valores do índice Kappa entre os métodos de integração (TABELA 35 e GRÁFICO 22).

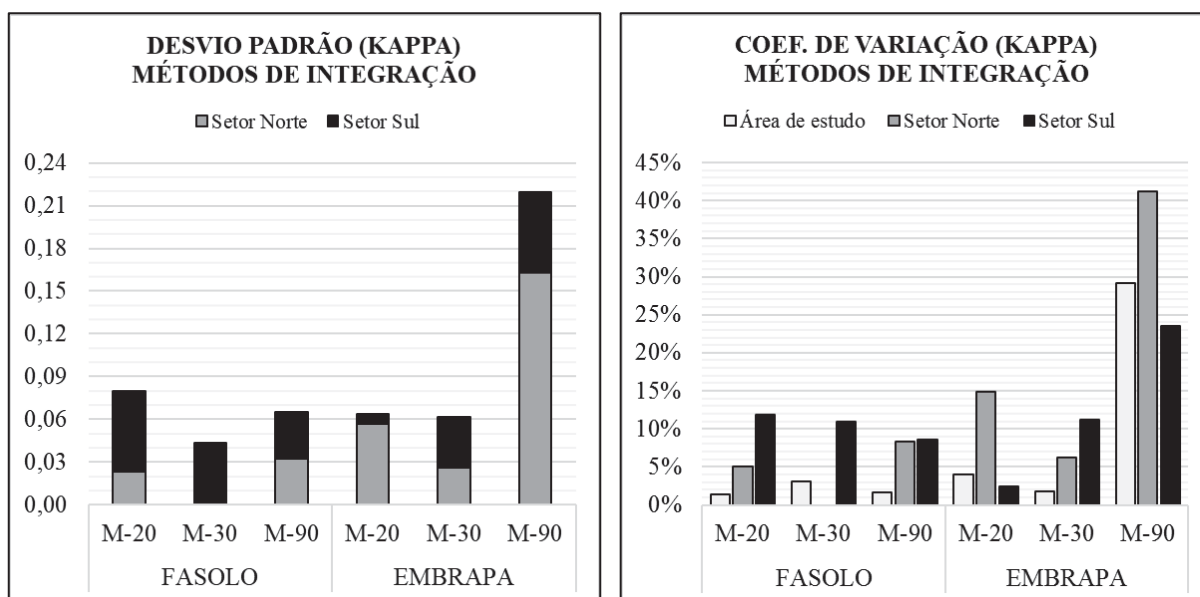
Os dados apresentam certa homogeneidade, mas com dispersão maior no setor sul. Nota-se que em relação ao mapeamento de Fasolo *et al.* (1988), para os modelos M20, M30 e M90, os valores de desvio padrão foram de 0,06, 0,04 e 0,03 respectivamente, enquanto que para o setor norte foram de 0,02, 0,00 e 0,03.

Todavia, para o mapeamento da EMBRAPA (2007) o M90 apresentou dispersão maior no setor norte que os outros modelos sobretudo pelo desvio padrão e coeficiente de variação permitindo concluir que para esta resolução espacial, a escolha do método de integração pode gerar resultados bastante discrepantes entre eles, diferentemente das previsões geradas pelo M20 e M30, pois, entre elas há diferença proporcionalmente menor entre os dados.

TABELA 35 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA – MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO

MAPEAMENTO PREEXISTENTE	FASOLO			EMBRAPA		
	M-20	M-30	M-90	M-20	M-30	M-90
<b>MODELO DIGITAL</b>						
<b>MÉDIA ARITMÉTICA</b>						
Área de estudo	0,48	0,45	0,42	0,35	0,39	0,34
Setor norte	0,46	0,44	0,39	0,38	0,42	0,40
Setor sul	0,48	0,40	0,38	0,29	0,32	0,24
<b>DESVIO PADRÃO</b>						
Área de estudo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,10
Setor norte	0,02	0,00	0,03	0,06	0,03	0,16
Setor sul	0,06	0,04	0,03	0,01	0,04	0,06
<b>VARIÂNCIA</b>						
Área de estudo	0,00004	0,00020	0,00005	0,00020	0,00005	0,00980
Setor norte	0,00054	-	0,00104	0,00320	0,00069	0,02645
Setor sul	0,00323	0,00191	0,00108	0,00005	0,00125	0,00320
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO</b>						
Área de estudo	1,3%	3,1%	1,7%	4,0%	1,8%	29,1%
Setor norte	5,0%	0,0%	8,3%	14,9%	6,2%	41,2%
Setor sul	11,8%	10,9%	8,6%	2,5%	11,2%	23,6%

GRÁFICO 22 – DP E COEF. DE VARIAÇÃO DO ÍNDICE KAPPA – MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO

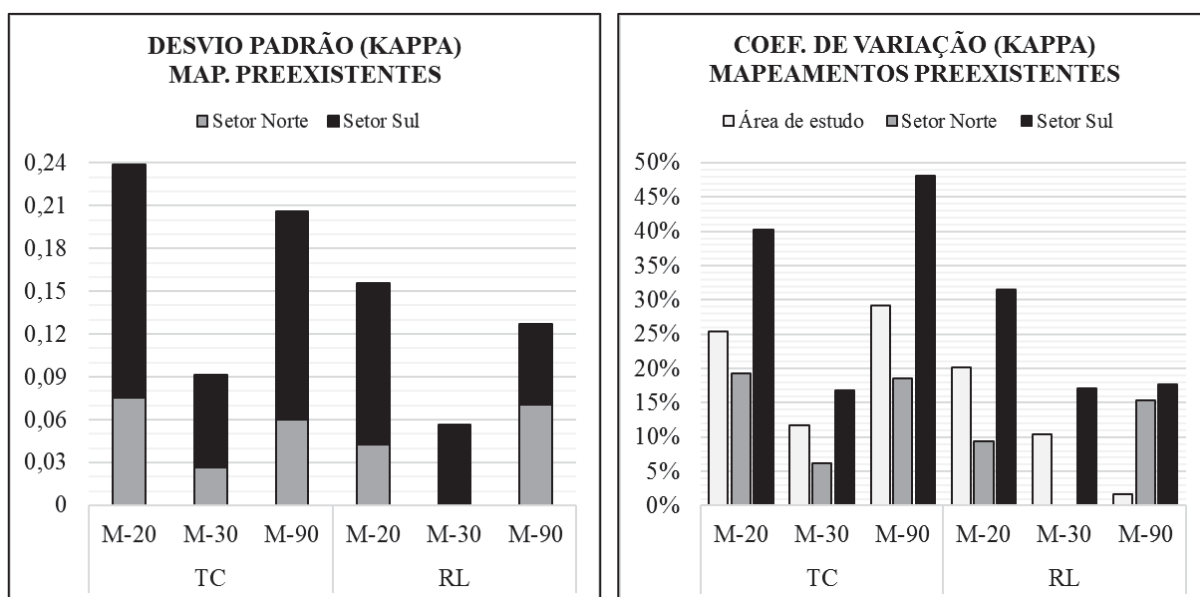


Deste modo, foi utilizada a mesma lógica de análise de dispersão das informações do índice Kappa, contudo foi usada para os dois mapeamentos preexistentes (TABELA 36 e GRÁFICO 23).

TABELA 36 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA – MODELOS PREDITIVOS

MÉTODO DE INTEGRAÇÃO	TABULAÇÃO CRUZADA			REGRESSÕES LOGÍSTICAS		
MODELO DIGITAL	M-20	M-30	M-90	M-20	M-30	M-90
<b>MÉDIA ARITMÉTICA</b>						
Área de estudo	0,41	0,43	0,34	0,42	0,41	0,42
Setor norte	0,39	0,42	0,32	0,45	0,44	0,46
Setor sul	0,41	0,39	0,30	0,36	0,33	0,32
<b>DESVIO PADRÃO</b>						
Área de estudo	0,11	0,05	0,10	0,08	0,04	0,01
Setor norte	0,08	0,03	0,06	0,04	0,00	0,07
Setor sul	0,16	0,06	0,15	0,11	0,06	0,06
<b>VARIÂNCIA</b>						
Área de estudo	0,01112	0,00245	0,00980	0,00720	0,00180	0,00005
Setor norte	0,00573	0,00069	0,00356	0,00180	0,00000	0,00500
Setor sul	0,02655	0,00421	0,02132	0,01281	0,00320	0,00320
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO</b>						
Área de estudo	25,4%	11,6%	29,1%	20,2%	10,3%	1,7%
Setor norte	19,2%	6,2%	18,5%	9,4%	0,0%	15,4%
Setor sul	40,2%	16,8%	48,2%	31,4%	17,1%	17,7%

GRÁFICO 23 – DP E COEF. DE VARIAÇÃO DO ÍNDICE KAPPA – MAPEAMENTOS PREEXISTENTES



O M30 é o modelo preditivo que apresenta menor variação dos dados nos dois mapeamentos preexistentes, tendo em vista que no setor norte os índices Kappa foram exatamente os mesmos. Também é importante destacar que o setor sul apresentou maior variação dos dados.

Para os modelos de 20 e 90 metros preditos por tabulação cruzada, houve grande dispersão das informações, sobretudo o M90 que teve valores muito discrepantes por apresentar índice Kappa baixo para o mapeamento de Fasolo *et al.* (1988).

## 6 CONCLUSÕES

O mapeamento digital de solos, por meio da integração de atributos topográficos, demonstrou potencial para compreender as relações solo-relevo e para a predição da distribuição das unidades de mapeamento na paisagem do noroeste do estado do Paraná em escala regional. O uso de ferramentas de SIG, bem como o método de tabulação cruzada e regressões logísticas múltiplas multinominais possibilitam essa integração dos AT.

A etapa de definição do tamanho do *pixel* para o modelo digital do terreno (20 metros), foi fundamental para que os resultados obtidos por este modelo fossem satisfatórios conforme as verificações de qualidade em relação a mapas pedológicos preexistentes. Destaca-se a importância de se ter uma base cartográfica corrigida, pois erros e ruídos comprometem a qualidade do mapeamento final, como curvas e pontos cotados com valores incoerentes ou até mesmo a hidrografia que tenha sido vetorizada no sentido oposto do fluxo, ou seja, em direção a montante. Ainda se ressalta que o uso da técnica da área mínima mapeável foi essencial para padronizar a escala de apresentação dos produtos cartográficos, pois feições detalhadas incondizentes com a escala proposta foram generalizadas.

A escolha de atributos topográficos foi essencial para que o mapeamento fosse coerente, pois deve-se conhecer suas potencialidades em relação a espacialização dos solos a serem preditos. Por exemplo, o índice de posição topográfica e o índice topográfico de umidade modificado se mostrou satisfatório no mapeamento de porções da paisagem com solos característicos da planície fluvial. Solos localizados nessas planícies, como Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Organossolos, são difíceis de serem mapeados em campo, principalmente pela dificuldade de acesso e com isso a pedometria se mostra como uma ferramenta muito útil, uma vez que pelo mapeamento preditivo foi possível espacializar os solos da área de planície fluvial, utilizando a integração desses dois atributos topográficos.

As áreas de referência têm a necessidade de serem representativas para toda a área de estudo, pois os padrões de relevo encontrados podem indicar mudança nas classes de solo. Em regiões como o noroeste do Paraná onde há homogeneidade geológica (rochas areníticas) e geomorfológica (relevos suavemente ondulados ou até mesmo planos), foi encontrado facilidade na determinação das AR, porém os limites entre as classes de unidades de mapeamento se mostraram bastante sutis, o que torna difícil o processo de discretização. Novamente, destaca-se o papel de atributos topográficos como o IPT que teve a melhor classificação na verificação de qualidade, em relação aos outros quatro atributos topográficos),

pois ele consegue discernir porções da vertente onde há possibilidade de se encontrar Latossolos (topos e terços superiores) e Argissolos (terços médios e interiores).

O uso de modelos digitais de elevação tem potencial para a aplicação de trabalhos em mapeamentos digitais de solos, sobretudo quando a base cartográfica disponível para a geração de um MDT é apresentada em escalas de pouco detalhe. Contudo, os sensores remotos detectam objetos que se encontram acima do solo, comprometendo desta forma, algumas características das vertentes, como os fundo de vales com mata ciliares preservadas, pois, nessas ocasiões os MDE acabam suavizando a topografia. Em contrapartida, os MDT gerados pelo método Topogrid criaram superfícies hidrológicamente consistentes, ou seja, representam melhor nos modelos as feições topográficas dos fundos de vales.

A comparação da resolução espacial entre os modelos preditos visando a qualidade da informação, é proporcional ao tamanho do pixel, ou seja, quanto menor a célula, melhor a qualidade do mapeamento. Os modelos preditos pelo MDE de 90 metros apresentaram resultados mais genéricos, apropriado para escala de menor detalhe. Essas predições também apresentaram polígonos com bastante arestas, que são incompatíveis com as nuances da topografia.

Foi verificado ainda que esse modelo de elevação gera resultados distintos de espacialização das duas classes de UM conforme a escolha do método de integração, sendo refletida nos índices de qualidade e na diferença da quantificação das suas áreas. Essas diferenças foram menores ao se comparar as duas predições geradas pelo MDT 20 e pelo MDE 30.

Também foi analisado pela estatística descritiva uma menor dispersão de dados dos modelos preditos por RL do que por TC, ou seja, quando o pesquisador controla a tomada de decisões (processo de discretização dos AT), fica suscetível a encontrar maiores variações nos histogramas de análise, o que fica evidenciado na espacialização das classes de UM nos modelos preditivos. Pelo fato de nas regressões logísticas a base de dados (pontos de controle) serem as mesmas para as predições a partir dos três modelos, as diferenças se apresentam menores.

Neste sentido, para o método das regressões logísticas, a quantidade dos pontos de controle foi essencial para que os modelos pudessem alcançar índices de qualidade aceitáveis. É importante salientar que muito embora os testes de validação apresentassem que os pontos inseridos tiveram uma acurácia considerada satisfatória, a carência de mais pontos de controle de campo comprometeu parcialmente as análises de validação dos modelos, pois quanto mais informação, melhor são as análises da espacialização das unidades de mapeamento.

Os mapeamentos preexistentes tiveram bastante importância no tocante da análise de verificação de qualidade dos seis modelos preditos, pois ambos são apresentados em escalas diferentes, proporcionando uma gama maior de discussões. Importante destacar que o ideal é a utilização de um mapa de referência com escala detalhada que abrangesse toda a área de estudo e não apenas de alguns municípios.

Entretanto, pela carência deste tipo de informação no Brasil, o mapeamento digital de solos se mostra uma ferramenta com grande potencial para auxiliar os mapeamentos pedológicos de um modo geral, servindo como subsídio para atividades como o planejamento ambiental, podendo auxiliar em medidas que diminuam a intensificação dos processos erosivos.

Os mapeamentos digitais de solos partem da premissa da inter-relação entre os solos e o relevo e esta tese conseguiu demonstrar que mesmo em regiões onde essa relação seja menos perceptível, em função das características do relevo plano e suavemente ondulado, foi possível apresentar mapeamentos consistentes e que atinjam um teor de qualidade aceitável pela escala final apresentada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo, Ed. Unisinos, 165p. 2003.
- ÁVILA, F. F. **Análise da cobertura pedológica em uma topossequência na bacia do córrego dos Pereiras - Depressão de Gouveia/MG**. Belo Horizonte, 135 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- BAILEY, N.; CLEMENTS, T., LEE, J. T.; THOMPSON, S. Modelling soil series data to facilitate targeted habitat restoration: A polytomous logistic regression approach. **Journal of Environmental Management**, v.67, p.395-407, 2003.
- BERRY, J. K. Cartographic Modeling: The Analytical Capabilities of GIS. In: GOODCHILD, M.; PARKS, B.O., STEYAERT, L.T., **Environmental Modeling with GIS**. Oxford, Oxford University Press, pp. 58-74, 1993.
- BÖHNER, J.; SELIGE, T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. In: Böhner, J., McCloy, K.R., Strobl, J. [Eds.]: Göttinger Geogr. **SAGA - Analyses and Modelling Applications**. Abh, n. 115, 2006.
- BÖNISCH, S.; ASSAD, M. L. L.; MONTEIRO, A. M. V.; CAMARA, G. Representação e propagação de incertezas em dados de solo: II – Atributos numéricos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. vol.28, n.1 pp. 33-47, 2004.
- BOULET, R.; CHAUVEL, A.; HUMBEL, F. X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et cartographie en pédologie. I – Prise en compte l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique: les étude de toposéquences et leurs principaux apport à la connaissance des sols. **Cah. Orstom**. Paris, França. Série Pédologie. v. XIX, n. 4. p. 309-322. 1982
- BUI, E. N. Soil survey as a knowledge system. **Geoderma**, vol. 120, p. 17–26, 2004.
- BURROUGHS, P. A.; BOUMAB, J.; YATES, S. R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, n. 3, p. 311-326, 1994.
- BUSSAB, W.O.; MORETTIN P.A. **Estatística Básica**, Ed. Saraiva, São Paulo, 9 ed. 576p. 2017.
- CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JÚNIOR, J. Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos de pedológicos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 1, 2006.
- CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.], 2005.  
Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 26 jul. 2017.
- CASTRO, S.S. **Sistemas de transformação pedológica em Marília. SP: B Latossólicos e B texturais**, São Paulo. 274 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Departamento de Geografia da FFLCH, Universidade de São Paulo, 1989.

CEDDIA, M. B. Mapeamento de solos no nosso tempo. **Newsletter da Comissão de Pedometria da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. n.2, 2013.

Disponível em: <<https://sites.google.com/site/pedometria/home>>. Acesso em: 02 ago. 2017.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná : Curitiba, 2004. 210p.

CHATTERJEE, S.; HADI, A. S. **Regression analysis by example**. 5.ed. New York, John Willey & Sons, 375p, 2006.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. Ed. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 2011.

COELHO, F. F. **Comparação de métodos de mapeamento digital de solos através de variáveis geomorfológicas e sistemas de informações geográficas**. Porto Alegre, 2010, 80 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Programa de pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Centro estadual de pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COELHO, F. F.; GIASSON, E. Métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.10. Outubro, 2010.

COUTO, E. V. **Evolução denudacional de longo prazo e a relação solo-relevo no Noroeste do Paraná**. Curitiba, 112 f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2015.

COUTO, E. V.; SANTOS, L. J. C.; DE SORDI, MICHAEL VINICIUS; BOURLES, D.; BRAUCHER, R.; SALGADO, A. A. R.; LEANNI, L.; FERREIRA, J. H. D. Changes of the base levels in the Ivaí and Paraná Rivers confluence zone (Southern Brazil): Denudational reflexes in the evolution of the upstream drainage network. **Zeitschrift Fur Geomorphologie**, p. 1-18, 2018.

CRIVELENTI, R.C., COELHO R.M., ADAMI S.F., OLIVEIRA, S.R.M. Mineração de dados para inferência de relações solo-paisagem em mapeamentos digitais de solo. **Pesq. agropec. bras.** Brasília, v.44, n.12, p. 1707-1715, 2009.

CUNHA, J. E.; CASTRO, S. S.; SALOMAO, F. X. T. Comportamento erosivo de um sistema pedológico de Umuarama, noroeste do estado do Paraná. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v.23, n.4, pp. 943-951, 1999.

CUNHA, J. E.; NOBREGA, M. T.; CASTRO, S.S. Infiltração da água no solo no sistema pedológico Campus do Arenito, cidade gaúcha, noroeste do estado do Paraná. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v.32, n.5, p. 1837-1848, 2008.

DALMOLIN, R. S. D. e TEN CATEN, A. Mapeamento Digital: nova abordagem em levantamento de solos. **Investigación Agraria**, v. 17, p. 77-86, 2015.

DE BIASI, Mário. A carta clinográfica: Os Métodos de Representação e sua Confecção. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 6, p. 45-53, 1992.

DEBELLA-GILO, M.; ETZELMULLER, B. Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway. **Catena**, v.77, p.8-18, 2009.

DOBOS, E.; MICHELI, E.; BAUMGARDNER, M. F.; BIEHL, L.; HELT, T. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. **Geoderma**, v.97, p.367-391, 2000.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modelling: Acquisition, Manipulation and Applications**. Artech House, Inc., Norwood-Massachusetts. 2005.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 5. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) **Mapa de Solos do Estado do Paraná**. Escala 1:250.000. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007.

ESPINDOLA, C. R. **Retrospectiva crítica sobre a pedologia: Um repasse bibliográfico**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

ESRI - ARCGIS HELP 10.3. **Generalizing classified output by removing small isolated regions**. 2018. Disponível em:

<<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/guide-books/extensions/spatial-analyst/image-classification/generalizing-classified-output-by-removing-small-isolated-regions.htm>>.

Acesso em: 16 nov. 2017

FASOLO, P. J.; CARDOSO, A.; CARVALHO, A. D.; HOCHMÜLLER, D.; RAUEN, M. D. J.; & PÖTTER, R. (1988). **Erosão: inventário de áreas críticas no Noroeste do Paraná**. Curitiba, Instituto Agrônomo do Paraná, 1988.

FELIX DA SILVA, M. **Mapeamento pedológico preditivo por pedometria nas bacias hidrográficas dos Rios Tagaçaba, Serra Negra e Guaraqueçaba – Guaraqueçaba – PR**. Curitiba, 150 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2016.

FERNANDES BARROS, O. M. **Análise Estrutural e cartografia detalhada de solos em Marília, estado de São Paulo: ensaio metodológico**. São Paulo, 146 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – FFLCH, Universidade de São Paulo, 1985.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 3, p. 164-76, 1994.

FERNANDES, L.A.; COUTO, E.V.; SANTOS, L.J.C. Três Morrinhos, Terra Rica, PR Arenitos silicificados de dunas do Deserto Caiuá testemunham nível de superfície de aplainamento K-T. In: WINGE, M. et al (edit./org.). **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**, vol. III. Brasília. **Serviço Geológico do Brasil – CPRM** v. III, p. 69-87, 2012.

FIDALSKI, J. Diagnóstico de manejo e conservação do solo e da água na região noroeste do Paraná. **Revista Unimar** 9(3): 845-851, 1997.

FIGUEIREDO, S.R.; GIASSON, E.; TORNQUIST, C.G.; NASCIMENTO, P.C. Uso de regressões logísticas múltiplas para mapeamento digital de solos no planalto médio do RS. R. Bras. Ci. Solo, 32:2779-2785, 2008.

FUMIYA, M. H. **Gênese dos ferricretes e sua relação com transformações da paisagem no noroeste do estado do Paraná**. Curitiba, 113 f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2017.

FUMIYA, M. H.; SANTOS, L. J. C.; MANGUEIRA, C. G. COUTO, E. V. **Revista Brasileira de Geomorfologia**.v.17, n.3, p.465-480, 2016.

GASPARETTO, N.V.L.; NÓBREGA, M.T. E CARVALHO, A. **A reorganização da cobertura pedológica no noroeste do Paraná e as suas relações com o Arenito Caiuá**. In: Encuentro de Geografos de America Latina, 8. 2001, CDRom,Santiago, EGAL. 2001. p. 164 - 169.

GIASSON, E., CLARKE, R.T., INDA JUNIOR, A.V., MERTEN, G.H., TORNQUIST, C.G. Digital soil mapping using multiple logistic regression on terrain parameters in Southern Brazil. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 63, n. 3, p. 262-268, 2006.

GIASSON, E.; FIGUEIREDO, S.R.; TORNQUIST, C.G.; CLARKE, R.T. Digital soil mapping using logistic regression on terrain parameters for several ecological regions in southern Brazil. In: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA SANTOS, M. DE L. (Ed.). **Digital soil mapping with limited data**. New York: Springer-Verlag, p.225-232, 2008.

HARTEMINK, A.E.; McBRATNEY, A.B. & MENDONÇA-SANTOS, M.L. **Digital soil mapping with limited data**. Springer Science+Business Media B.V. 2008.

HENGL, T.; TOOMANIAN, N.; REUTER, H. I.; MALAKOUTI, M.J. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: Lessons from Iran. **Geoderma**, v.140, p.417-427, 2007

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences** 32, 1283–1298, 2006.

HÖFIG, P. **Mapeamento digital de solos e o mapa de solos como ferramenta para classificação de aptidão de uso das terras**. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

HÖFIG, P.; GIASSON, E.; VENDRAME, P. R. S. Mapeamento digital de solos com base na extrapolação de mapas entre áreas fisiograficamente semelhantes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 49, n. 12, p.958-966, 2014.

HUDSON, B. D. The soil survey as a paradigm-based science. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.836–841, 1992.

HUTCHINSON, M. F. **Calculation of hydrologically sound digital elevation models**. Paper presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney, Australia, 1989.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP) **Plano de manejo do Parque Estadual de Amaporá-PR**. Governo do Estado do Paraná, DUC – Departamento de Unidade de Conservação. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Clima do Brasil**. Diretoria de Geociências - DGC / Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais- CREN. Rio de Janeiro, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de geomorfologia**. 2. Ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro, 271 p. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro, 430 p. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Coordenação de Geografia. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias**. Rio de Janeiro, 92 p. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Portal BDIA. **Banco de Dados de Informações Ambientais**. Rio de Janeiro. 2018.

Disponível em:

< <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>>.

Acesso em: 15 dez. 2018.

INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIAS E GEOCIÊNCIAS (ITCG) **Mapa Fitogeográfico do Paraná**. 2009.

IPPOLITI, G. A.; COSTA, L. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FILHO, E. I. F.; GAGGERO, M. R. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de "Mar de Morros" (MG). **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, Apr. 2005.

JARVIS, A.; RUBIANO, J.; NELSON, A.; FARROW, A.; MULLIGAN, M. **Practical use of SRTM data in the tropics – comparisons with digital elevation models generated from cartographic data**. Cali: CIAT, 31p. (Working document, 198). 2004.

KEMPEN, B.; BRUS, D. J.; HEUVELINK, G. B. M.; STOORVOGEL, J. J. Updating the 1:50.000 Dutch soil map using legacy soil data: A multinomial logistic regression approach. **Geoderma**, v.125, p.311-326, 2009.

LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O. Relações pedomorfogeológicas e distribuição de pedoformas na estação ecológica de águas emendadas, Distrito Federal. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, June 2012.

LAGACHERIE, P. **Digital Soil Mapping: A State of art**. In.: HARTEMINK, A.E.; McBATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L. (Ed.), *Digital Soil Mapping with Limited Data*. New York: Springer, p.3-14, 2008.

LAGACHERIE, P.; ROBBEZ-MASSON, J. M.; NGUYEN-THE, N.; BARTHÈS, J. P. Mapping reference area representativity using mathematical soilscape distance. **Geoderma** 101, 105-118. 2001.

LAGACHERIE, P.; VOLTZ, M. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach. **Geoderma**. v.97, p. 187–208, 2000.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 01, p.159-174, 1977.

LARACH, J. O. I.; CARDOSO, A.; CARVALHO, A. P. de; HOCHMÜLLER, D. P.; MARTINS, J. S.; RAUEN, M. de J.; FASOLO, P. J.; PÖTTER, R. O. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR; Curitiba: EMBRAPA-SNLCS, Vol. 2t, 1984.

LEGROS, J. P. **Mapping of the soil**. Enfield: Science Publisher, v. 1, 411 p. 2005

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LEPSCH, I. F. **19 lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LIMA, L. A. S.; NEUMANN, M. R.B.; REATTO, A.; ROIG, H. L. **Mapeamento de Solos: do tradicional ao digital**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Documentos M386, 2013.

LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. **O solo no meio ambiente: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 130 p, 2007.

LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. **Conhecendo os principais solos do Paraná: abordagem para professores do ensino fundamental e médio**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 130 p, 2012.

LOHMANN, M. **Regressão logística e redes neurais aplicadas à previsão probabilística de alagamentos no município de Curitiba, PR**, Curitiba, 231, f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2011.

MANGUEIRA, C. G. **Proposta de Classificação do Nível de Criticidade dos Processos Erosivos da Região Noroeste do Paraná**. Curitiba, 91 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2017.

MANGUEIRA, C. G.; COUTO, E. V.; SANTOS, L. J. C. **Relação solo e relevo na distribuição de formas erosivas no noroeste do Paraná – Brasil**. In: VI Congresso Nacional de Geomorfologia, 2013, Coimbra - PT. VI Congresso Nacional de Geomorfologia: Atas-Proceedings. v. 1. p. 41-44, 2013.

MANGUEIRA, C. G.; GOUDARD, G. **Evolução de processos erosivos e a erosividade das chuvas no noroeste do Paraná**. In: X Simpósio Nacional de Geomorfologia (11º SINAGEO), Maringá-PR. Anais do XI Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2016.

MANOSSO, D. C. C. **A degradação das propriedades físicas dos latossolos vermelhos distróficos em decorrência dos diferentes usos agrícolas em Floraí PR 2006** 107 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, v. 97, n. 3-4, p.293-327, 2000.

McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, p. 3-52, 2003.

MINEROPAR (MINERAIS DO PARANÁ S/A). **Atlas geológico do Estado do Paraná**. 2001. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/atlasgeo.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2018.

MINEROPAR (MINERAIS DO PARANÁ S/A); UFPR (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ) **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná**. 2006. Disponível em: <[http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/Geomorfologicos/atlas\\_geomorfologico.pdf](http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/Geomorfologicos/atlas_geomorfologico.pdf)>. Acesso em: 04 set. 2018.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society American Journal**. v. 57, p. 443-452, 1993.

MOORE, D. S. **A estatística básica e sua prática**. Rio de Janeiro: LTC, 7 ed., 2017.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE : São José dos Campos, 1 ed., 2001.

MOREIRA, A. A.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J. M.; RIBEIRO, C. A. A. S. **Utilização de algoritmos de classificação para o mapeamento do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, a partir de uma imagem do sensor IKONOS II**. XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada - A Geografia Física Aplicada e as dinâmicas de apropriação da natureza, Viçosa (MG), 2009.

MOTTA, T. O. **Área mínima mapeável: qualidade da cartografia ambiental**. Ilhéus, 80 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Sub-área de concentração: Gestão de Bacias Hidrográficas e Zonas Costeiras). Universidade Estadual de Santa Cruz, Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente., 2010.

MOURÃO-JUNIOR, C.A.. Bioestatística: armadilhas e como evitá-las. **Boletim do Centro da Biologia da Reprodução (UFJF)**, v. 26, p. 73-76, 2007.

MUÑOZ, V. A. **Análise geomorfométrica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 112p. (INPE-15796-TDI/1531). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), 2009.

MUNSELL COLOR COMPANY. **Munsell soil color charts**, 2000.

NAKASHIMA, P. **Sistemas pedológicos da região noroeste do Estado do Paraná: distribuição e subsídios para o controle da erosão**. São Paulo, Tese (Doutorado em Geografia Física) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1999.

NANNI, M. R.; ROCHA, H. O. Integration of GIS technology, remote sensing and multivariate analysis in the delimitation of physiographic units for pedological mapping. **Boletim do Instituto de Geociências (Série Científica)**, v. 1, n. 28, p. 129-143, 1997.

NASCIMENTO, F. A. F.; ROCHA, R. T. O.; BRAGATO, R. D.; MATSUSHITA, M. S.; BERTOL, O. J. **Curso de Mapeamento Digital de Solos com uso do QGIS**. Curitiba: Instituto Emater, 2017.

NOWATZKI, A. **Utilização de atributos topográficos no mapeamento preliminar de solos da bacia hidrográfica do rio Pequeno (Antonina/PR)**. Curitiba, 113 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2013.

NOWATZKI, A.; SANTOS, L. J. C. Mapeamento preliminar de solos por pedometria com base em atributos topográficos da bacia hidrográfica do rio Pequeno-PR. **RA'E GA: o Espaço Geográfico em Análise**, v. 32, p. 185-211, 2014.

NOWATZKI, A.; SANTOS, L. J. C.; SILVEIRA, C.T. Potencialidade do Índice de Posição Topográfica no Mapeamento Pedológico Preditivo em uma Sub-Bacia do Rio Capricórnio-PR. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, v. 34, p. 10-20, 2017.

NOWATZKI, A.; OLIVEIRA, J. G.; HUNG, M. N. W. B.; SANTOS, L. J. C. Emprego da pedometria na identificação e delimitação dos solos localizados na planície fluvial do baixo curso da bacia hidrográfica do rio Ivaí (noroeste do Paraná). **Revista de Geografia (Recife)**, v. 35, p. 145-161, 2018

OLIVEIRA, J. G.; NOWATZKI, A.; SANTOS, L. J. C. **Utilização de atributos topográficos na elaboração de um mapa preditivo de solos na sub-bacia do rio do Corvo – Noroeste do estado do Paraná** Edição Especial XVI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Revista Equador, v. 4, nº 3, p. 352-358, 2015.

OLIVEIRA, J. G.; NOWATZKI, A.; SANTOS, L. J. C. Utilização de atributos topográficos no mapeamento de suscetibilidade erosiva na área rural do município de Paranavaí – PR. **Revista Cerrados (Unimontes)**, v. 15, p. 201-209, 2017.

PARANÁ. Resolução Conjunta IBAMA/SEMA/IAP N° 005, de 28 de março de 2008. **Casa Civil Governadoria do Poder Executivo do Estado do Paraná**. Curitiba, PR, 2008.

PINHEIRO, H. S. K.; CHAGAS, C. S.; CARVALHO JUNIOR, W.; ANJOS, L. H. C. Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos. **Pesq. agropec. bras.** [online], vol.47, n.9, pp.1384-1394. 2012.

PRADO, H. (Org.). **Pedologia Fácil**. 2017.

Disponível em: <<http://www.pedologiafacil.com.br/curiosidade.php>>.

Acesso em: 19 jun. 2017.

PRATES, V.; SOUZA, L. C. P.; OLIVEIRA JR, J.C.. Índices para a representação da paisagem como apoio para levantamento pedológico em ambiente de geoprocessamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** (Online), v. 16, p. 408-414, 2012.

QUEIROZ NETO, J. P. Geomorfologia e Pedologia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Vol. 1 p.59-67. São Paulo, 2000.

QUEIROZ NETO, J. P. **O papel da pedogênese no modelado do relevo: busca de novos paradigmas**. In: 6º Seminário latino americano de geografia física, e 2º seminário ibero americano de geografia física, 2, Coimbra, p.1-19, 2010.

QUEIROZ NETO, J. P. Relações entre as vertentes e os solos: revisão de conceitos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 3, 2011.

RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; REDIVO, A.L.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; FERNANDES, N.F. & GOMES, R.A.T. Avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v.4, p.41-49, 2003.

RILEY, S. J.; DeGLORIA, S. D.; ELLIOT, R.. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. **International Journal of Sciences**. n. 1-4, v.5, 1999

RÓZYCKA, M.; MIGOŃ, P.; MICHNIEWICZ, A. Topographic Wetness Index and Terrain Ruggedness Index in geomorphic characterisation of landslide terrains, on examples from the Sudetes, SW Poland. **Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues**, Schweizerbart. [s.l.], p.1-20, 2016.

RUELLAN, A.; DOSSO, M. **Regards sur le sol**. Paris: Les Éditions Foucher, 1993.

SALOMÃO, F. X. T. **Processos erosivos lineares em Bauru: regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural**. São Paulo. 200 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Departamento de Geografia da FFLCH, Universidade de São Paulo. 1994.

SAMUEL-ROSA, A. **Análise de fonte de incerteza na modelagem espacial do solo**. Tese (Doutorado). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.

SAMUEL-ROSA, A. **Funções de predição espacial de propriedades do solo**. Dissertação (Mestrado). Centro de ciências rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SAMUEL-ROSA, A. O que é Pedometria? **Newsletter da Comissão de Pedometria da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. n. 1, 2013.

Disponível em: <<https://sites.google.com/site/pedometria/home>>.

Acesso em: 22 jun. 2017.

SAMPAIO, T.V.M. **Parâmetros morfométricos para melhoria da acurácia do mapeamento da rede de drenagem – uma proposta baseada na análise da bacia hidrográfica do rio Benevente – ES.** Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SAMPAIO, T.V.M.; AUSGUSTIN, C.H.R.R. **Índice de Concentração da Rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v.15(1). p. 47-60, 2014.

SANTOS, L. J. C. **Estudo morfológico da Topossequência da Pousada da Esperança, em Bauru, SP: subsídio para a compreensão da gênese, evolução e comportamento atual dos solos.** São Paulo, 2 vol. São Paulo, 71 p. (Dissertação-Mestrado), Departamento de Geografia-FFLCH-USP. 1995.

SANTOS, L. C. J. **Pedogênese no topo do platô de Bauru (SP): o caso da bacia do córrego da Ponte Preta.** São Paulo. 186 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Departamento de Geografia da FFLCH, Universidade de São Paulo. 2000a.

SANTOS, L. C. J. Contribuição da análise estrutural da cobertura pedológica ao desenvolvimento da ciência do solo **RA'E GA: o Espaço Geográfico em Análise**, n. 4, p. 131-138. 2000b.

SANTOS, L. J. C.; CASTRO, S. Lamelas (bandas onduladas) em argissolo vermelho-amarelo como indicadores da evolução do relevo: o caso das colinas médias do Platô de Bauru (SP). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, p. 43–64, 2006.

SANTOS, L.J.C.; FIORI, C.O.; CANALI, N.E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F; ROSS, J.S. 2006. Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Ano 7, nº 2, 2006.

SANTOS, L. J. C; WESTPHALEN, L. A. Erosão dos Solos no noroeste do Paraná. In: GUERRA, A. J. T; OLIVEIRA, M. C. **Degradação dos solos no Brasil.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014, p.293-317, 2014.

SANTOS, I, KRÜGUER, CM, LEVIS, M, GARCIA, K S **Avaliação de Perdas de Solo por Erosão Hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí** XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Belo Horizonte, 1999.

SANTOS, M. L.; MORAIS, E.S.; SILVEIRA, H.; ALVES, F.C. Estudo do escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Ivaí, Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 3, 2013.

SANTOS, M. O. **Análise de estabilidade de vertentes por meio da utilização dos métodos de Feições Mínimas do relevo e Fator de Segurança.** São Paulo. 119 p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Departamento de Geografia da FFLCH, Universidade de São Paulo. 2015.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (SEMA)  
**Bacias Hidrográficas do Paraná - Séries Históricas.** Curitiba, 2013.

SOUZA, E. **Mapeamento digital de solos e modelagem da recarga hídrica na Bacia do Rio Doce, Minas Gerais.** 2013. 169 f. Tese (Doutorado em Fertilidade do solo e nutrição de plantas; Gênese, Morfologia e Classificação, Mineralogia, Química,) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SOUZA, E.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BATJES, N. H.; SANTOS, G. R.; PONTES, L. M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola**, v. 73, p. 525-534, 2016.

SHARY, P.; SHARAYA, L.; MITUSOV, A. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma**, v.107, p.1-32, 2002.

SIEFERT, C.; SANTOS, I. Mecanismos de geração de escoamento e áreas hidrologicamente sensíveis: Uma abordagem hidrogeomorfológica para delimitação de Áreas de Preservação Permanente. **Ra'e Ga - O Espaço Geográfico em Análise** [s.l.], v. 24, p.227-257, 2012.

SILVA, L.M.; FIDALSKI J.; BERTOL, O. J. **Disponibilidade de água do solo em uma catena característica do arenito no noroeste do Paraná.** In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 33. Uberlândia, 2011. Anais. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 4p. 1, 2011

SILVA, C. C.; COELHO, R. M.; OLIVEIRA, S. R. M.; ADAMI, S. F. Mapeamento pedológico digital da folha Botucatu (SF-22-Z-B-VI-3): treinamento de dados em mapa tradicional e validação de campo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. vol.37, n.4, 2013.

SILVA, J. M. F.; OKA-FIORI, C.; SILVEIRA, C. T. Índice de Diversidade de Formas de Relevo do Setor Norte da Apa da Serra da Esperança (PR) com Emprego de Técnica de Classificação Geomorfométrica. **Revista do Departamento de Geografia USP**, Volume Especial – Eixo 6, p.112-123, 2017

SILVEIRA, C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: Integração de atributos topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e redes neurais artificiais.** Curitiba, 2010, 153 f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

SILVEIRA, C. T. OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; SIRTOLI, A. V.; SILVA, C. R. Pedometria apoiada em atributos topográficos com operações de tabulação cruzada por álgebra de mapas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 13, n. 2, 2012.

SILVEIRA, C. T. OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; SIRTOLI, A. V.; SILVA, C. R.; BOTELHO, M. F. Soil prediction using artificial neural networks and topographic attributes. **Geoderma** Vol. 172. 165–172, 2013.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. **Classificação morfológica obtida pelo Índice de Posição Topográfica na região central da Serra do Mar paranaense.** In: X Simpósio Nacional de Geomorfologia (10º SINAGEO), 2014, Manaus. Anais do X Simpósio Nacional de Geomorfologia (10º SINAGEO), 2014.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Análise digital do relevo aplicada à cartografia geomorfológica da porção central da serra do mar paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, p. 615-629, 2016.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Análise comparativa entre modelos digitais de elevação com distintas características de processamento e aquisição. **Boletim de Geografia (Online)**, v. 33, p. 106-121, 2016b.

SILVEIRA, R. M. P. **Análise digital do relevo como apoio para a cartografia geomorfológica da porção central da Serra do Mar Paranaense**. Dissertação (Mestrado em Paisagem e Análise Ambiental, Geografia). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia agraria**, v.9, n.3, p.317-329, 2008a.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; C. T.; SILVA, C. R.; RIBEIRO, S. R. A. OKA-FIORI, C. Atributos topográficos secundários no mapeamento de pedoformas. **Geociências**, v.21, n.1, p.63-77, 2008b.

SIRTOLI, A. V. **Mapeamento de Solos Com Auxílio da Geologia, Atributos do Terreno e Índices Espectrais Integrados Por Redes Neurais Artificiais**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008. 114f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. United States Department of Agriculture (USDA), Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C. 1993

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. **Soil survey manual**. United States Department of Agriculture (USDA), Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C. 2017

STRAHLER, A.N. Hypsometric analysis of erosional topography. **Geol. Soc. America Bulletin**, 63, 1952, p. 1117-1142.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, 33(2): 309-319, 1997.

TEN CATEN, A.; QUOOS, J. H. (Org.). Mapeamento Digital de Solos. 2009. Publicada em MundoGeo. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2009/10/21/mapeamento-digital-de-solos/>>.

Acesso em: 09 mai. 2017.

TEN CATEN A.; DALMOLIN, R. S. D.; RUIZ, L. F. C.; SEBEM, E.; PEREIRA, R. S. **Pedometria aplicada à predição de classes de solos utilizando de regressões logísticas múltiplas**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, 2009, Natal. Anais. Natal: INPE, p. 25-30, 2009.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. Regressões Logísticas Múltiplas: fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online], vol.35, n.1, pp.53-62. 2011.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; SANTOS, M. L. M. Componentes principais como preditores no mapeamento digital de classes de solos. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 7, p. 1170-1176, 2011b.

TERASSI, P. M. B.; SILVEIRA, H.; BONIFÁCIO, C. M. Variação da estabilidade de agregados e as suas relações com a vulnerabilidade dos solos ao longo de uma vertente na região noroeste do Paraná. **Boletim de Geografia**, UEM Maringá, v. 32, n. 1, p. 166-176, 2014.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. Produção de um mapa pedológico associando técnicas comuns aos mapeamentos digitais de solos com delineamento manual de unidades de mapeamento. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 950-959, 2015.

TOLEDO M. C. M.; OLIVEIRA S. M. B., MELFI A. J. Intemperismo e Formação do Solo. In: TEIXEIRA W., TOLEDO M. C. M., FAIRCHILD T. R., TAIOLI F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos. cap. 8, 2000.

TOMLIN, D. **Geographic Information Systems and Cartographic Modeling**. Prentice Hall, New York, 1990.

TOMLIN, C. D. **Map algebra: One perspective**. *Landscape and Urban Planning*, 30(1-2), 3-12. 1994.

VALLADARES, G. S.; HOTT, M.C. The Use of GIS and Digital Elevation Model in Digital Soil Mapping – A Case Study from São Paulo, Brazil. In: **Digital Soil Mapping with Limited Data**, A.E. Hartemink et al. (eds.). Springer Science+Business Media B.V. 2008.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.3, p.539-546, 2003.

VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, O, A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v 4, n.1, p.17-29, 2003.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. **Modern Applied Statistics with S**. Fourth edition. Springer, 2002.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. and COOPER, M.. Pedogênese em uma seqüência latossolo-podzólico na borda de um platô na depressão periférica paulista. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, vol.23, n.4, 1999.

WEBSTER, R. The development of pedometrics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, n. 1- 3, p. 1-15, 1994.

WEISS, A. **Topographic Position and Landforms Analysis**. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, 2001.

WESTPHALEN, L. A. **Avaliação e hierarquização da erodibilidade dos solos do Noroeste do Estado do Paraná - Subsídios ao planejamento ambiental**. Curitiba, 111 f. Dissertação

(Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2008.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, p.1-27, 2000.

WORLD REFERENCE BASE (WRB) for soil resources 2014: **International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps** (Update 2015) – Food And Agriculture Organization Of The United Nations (FAO), Rome, 2015

WSL (Org.). **PMSoil: Predictive mapping of soil properties for the evaluation of soil functions at regional scale**: A project funded by National Research Programme NRP 68 - Soil as a Resource. 2013. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL. Disponível em: <[http://www.wsl.ch/fe/waldressourcen/projekte/gis\\_pmsoil/index\\_EN](http://www.wsl.ch/fe/waldressourcen/projekte/gis_pmsoil/index_EN)>. Acesso em: 20 ago. 2016.

ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.12, p.47-56, 1987.

ZINCK, J.A., METTERNICHT, G., BOCCO, G., DEL VALLE, H.F. (Eds.) **Geopedology - An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies**. Springer International Publishing Switzerland, 2016

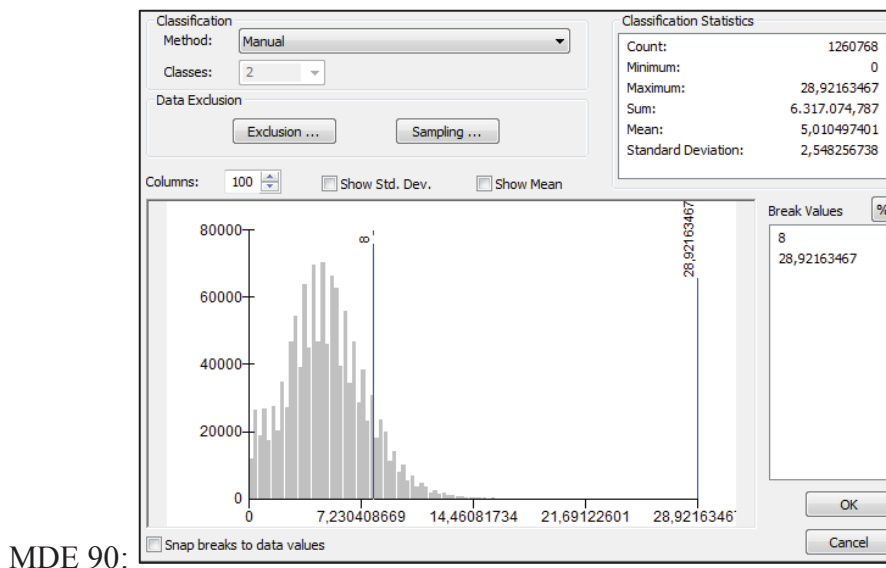
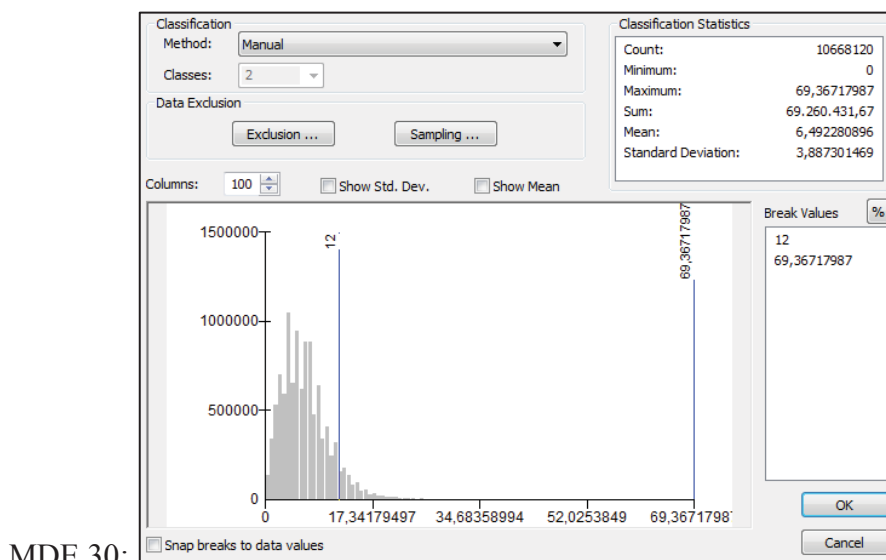
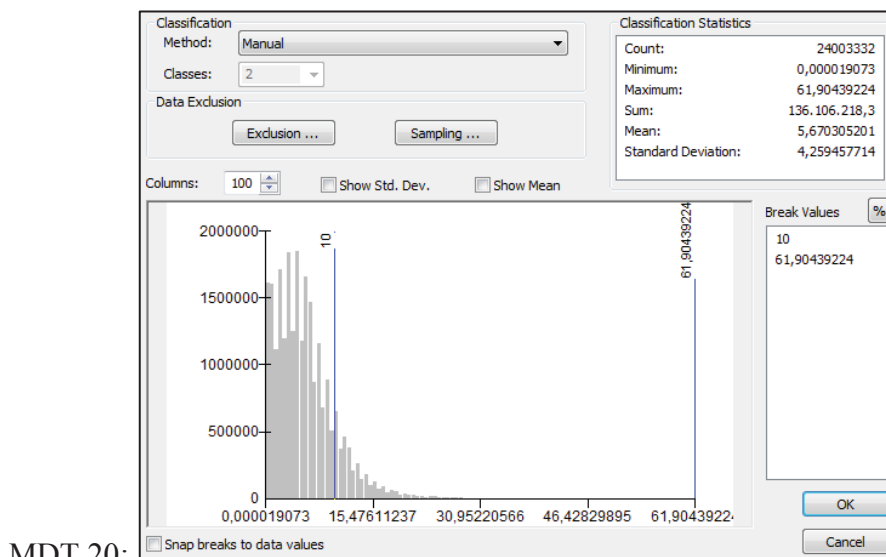
**APÊNDICE A – QUADRO SÍNTESE DAS PRINCIPAIS REFERÊNCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS**

<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>		
<b>TÍTULO</b>	<b>TEMA</b>	<b>AUTORES</b>
<b>Classificação dos solos e suas relações com o relevo</b>	Solos e classificação	EMBRAPA (2018); SOIL SCIENCE DIVISION STAFF (2017); IBGE (2015); WRB/FAO (2015); LEPSCH (2011); ESPINDOLA (2008).
	Relação solo/relevo	LEPSCH (2011); COELHO (2010); QUEIROZ NETO (2011); QUEIROZ NETO (2010); ÁVILA (2009); VALLADARES e HOTT (2008); CAMPOS <i>et al.</i> (2006); CASSETI (2005); MCBRATNEY <i>et al.</i> (2000); QUEIROZ NETO (2000); JENNY (1994).
	Análise estrutural da cobertura pedológica	PRATES <i>et al.</i> (2012); QUEIROZ NETO (2011); QUEIROZ NETO (2010); ÁVILA (2009); CRIVELENTI (2009); ESPÍNDOLA (2008); SANTOS e CASTRO (2006); IPPOLITI <i>et al.</i> (2005); QUEIROZ NETO (2000); SANTOS (2000b); SALOMÃO (1994); CASTRO (1989); FERNANDES BARROS (1985); BOULET <i>et al.</i> (1982).
<b>Passagem lateral Latossolo-Argissolo</b>	Latossolos/Argissolos	EMBRAPA (2018); IBGE (2015); LIMA <i>et al.</i> (2012); LEPSCH (2011); SILVA <i>et al.</i> (2011); TERASSI <i>et al.</i> (2014); CUNHA <i>et al.</i> (2008); SANTOS e CASTRO (2006); LEPSCH (2002); SANTOS (2000a); CUNHA <i>et al.</i> (1999); VIDAL-TORRADO <i>et al.</i> (1999); SANTOS (1995); SALOMÃO (1994); CASTRO (1989); FERNANDES BARROS (1985).
	Sistemas pedológicos do noroeste do PR	COUTO (2015); GASPARETTO <i>et al.</i> (2001); NAKASHIMA (1999).
<b>Mapeamentos pedológicos preditivos</b>	Mapeamentos tradicionais	TESKE, <i>et al.</i> (2015); SILVA <i>et al.</i> (2013); TEN CATEN (2008); LEGROS (2005); McBRATNEY <i>et al.</i> (2003); BRATNEY <i>et al.</i> (2000).
	MDS	NOWATZKI <i>et al.</i> (2018); NASCIMENTO <i>et al.</i> (2017); NOWATZKI <i>et al.</i> (2017); OLIVEIRA <i>et al.</i> (2017); FELIX DA SILVA (2016); SOUZA <i>et al.</i> (2016); DALMOLIN e TEN CATEN (2015); OLIVEIRA <i>et al.</i> (2015); TESKE <i>et al.</i> (2015); NOWATZKI e SANTOS (2014); CEDDIA (2013); LIMA <i>et al.</i> (2013); SAMUEL-ROSA (2013); SOUZA (2013); LACERDA e BARBOSA (2012); PINHEIRO <i>et al.</i> (2012); SILVEIRA <i>et al.</i> (2012); TEN CATEN <i>et al.</i> (2011); TEN CATEN <i>et al.</i> (2011b); COELHO (2010); COELHO e GIASSON (2010); SILVEIRA (2010); TEN CATEN <i>et al.</i> (2010); DEBELLA-GILO e ETZELMULLER (2009); KEMPEN <i>et al.</i> (2009); MUÑOZ (2009); TEN CATEN <i>et al.</i> (2009); FIGUEIREDO <i>et al.</i> (2008); GIASSON <i>et al.</i> (2008); GIASSON <i>et al.</i> (2006); HARTEMINK <i>et al.</i> (2008); LAGACHERIE (2008); SIRTOLI (2008); HENGL <i>et al.</i> (2007); MOURÃO-JUNIOR (2007); CHAGAS (2006); CHATTERJEE e HADI (2006); IPPOLITI <i>et al.</i> (2005); BÖNISCH (2004); BUI (2004); JARVIS <i>et al.</i> (2004); HENGL (2003); McBRATNEY <i>et al.</i> (2003); DOBOS <i>et al.</i> (2000); LAGACHERIE (2001); SHARY <i>et al.</i> (2002); WILSON e GALLANT (2000); McBRATNEY <i>et al.</i> (2000); NANNI e ROCHA (1997); BURROUGHS <i>et al.</i> (1994); WEBSTER (1994); BERRY (1993); MOORE <i>et al.</i> (1993); HUDSON (1992).

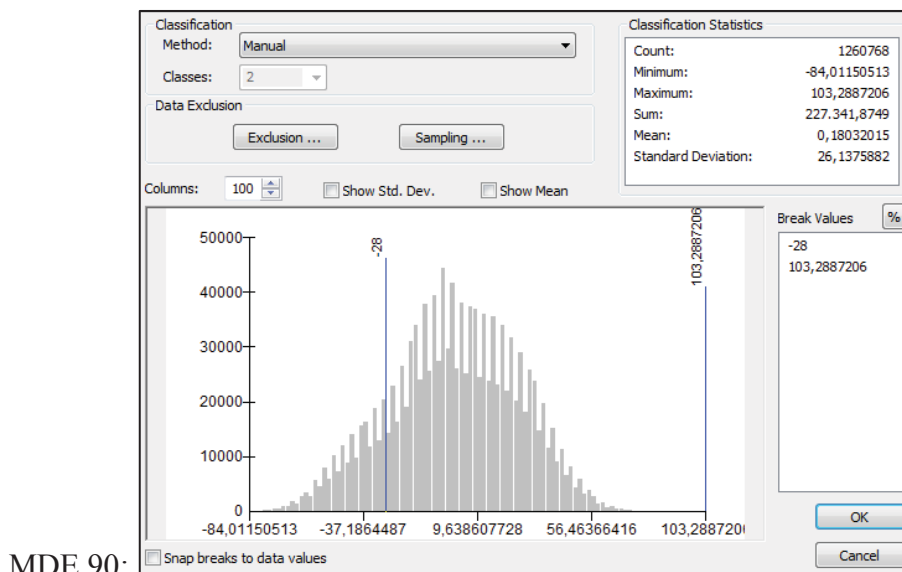
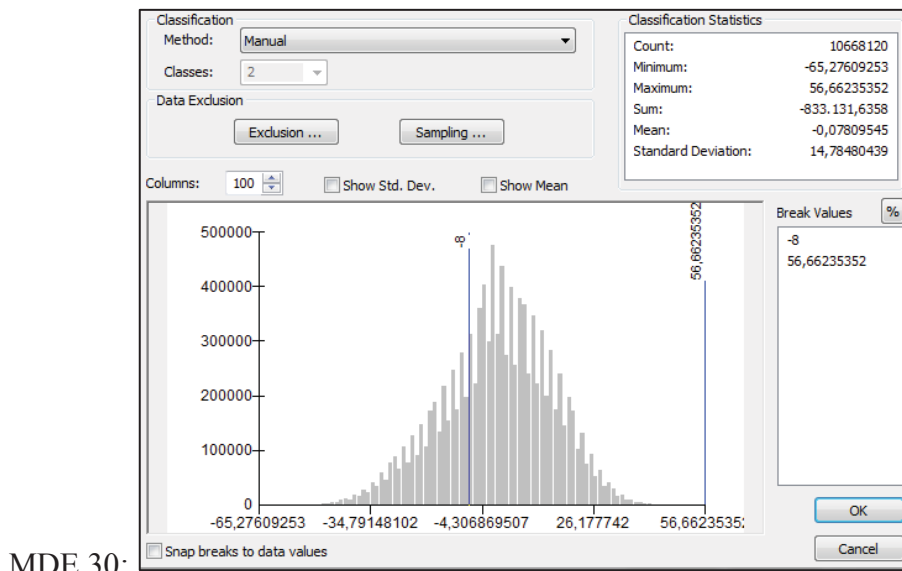
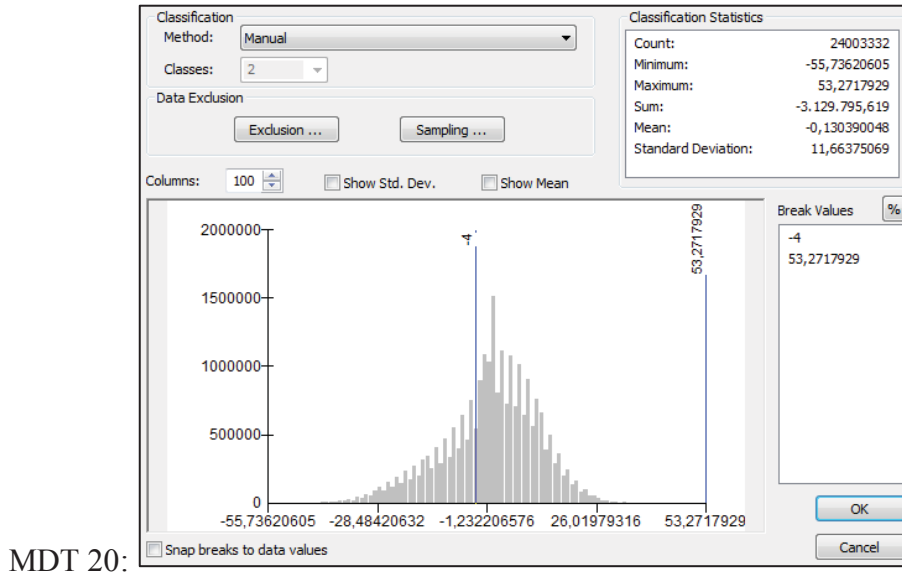
MATERIAIS E MÉTODOS		
TÍTULO	TEMA	AUTORES
<b>Organização da base de dados cartográficos e geração do MDT</b>	Base de dados e MDT	SILVA <i>et al.</i> (2017); SILVEIRA (2015); HENGL (2006); HUTCHINSON (1989).
<b>Modelos digitais de elevação</b>	MDE	SILVEIRA e SILVEIRA (2016b); EL-SHEIMY <i>et al.</i> (2005).
<b>Elaboração de atributos topográficos</b>	AT	HUNG <i>et al.</i> (2017); FUMIYA <i>et al.</i> (2016); RÓŻYCKA <i>et al.</i> (2016); SILVEIRA (2015); SAMPAIO e AUGUSTIN (2014); SILVEIRA e SILVEIRA (2014); NOWATZKI e SANTOS (2014); DE REU <i>et al.</i> (2013); SILVEIRA <i>et al.</i> (2013); NOWATZKI (2013) SIEFERT e SANTOS (2012); SILVEIRA (2010); SAMPAIO (2008); SIRTOLI (2008); BÖHNER e SELIGE (2006); McBRATNEY <i>et al.</i> (2003); RAMOS <i>et al.</i> (2003); VALERIANO (2003); VALERIANO e CARVALHO JUNIOR (2003); WEISS (2001); WILSON e GALLANT (2000); RILEY <i>et al.</i> (1999); TARBOTON (1997); MOORE <i>et al.</i> (1993); DI BIASI (1992); HORN (1981).
<b>Predição das unidades de mapeamento de solos</b>	MDS	IBGE (2015); TESKE <i>et al.</i> (2015); HÖFIG <i>et al.</i> (2014); NOWATZKI e SANTOS (2014); OLIVEIRA <i>et al.</i> (2015); SILVEIRA <i>et al.</i> (2012); TEN CATEN (2011); MOTTA (2010); SILVEIRA (2010); CHATTERJEE e HADI (2006); GIASSON <i>et al.</i> (2006); BUI (2004); TOMLIN (1994).
<b>Seleção de áreas de referência</b>	AR	EMBRAPA (2007); FASOLO <i>et al.</i> (1988).
<b>Mapas preexistentes e pontos de controle</b>	Dados pedológicos	EMBRAPA (2018); IBGE (2015); SILVA <i>et al.</i> (2011); QUEIROZ NETO (2010); ÁVILA (2009); SANTOS e CASTRO (2006); QUEIROZ NETO (2000); NAKASHIMA (1999); CASTRO (1989); FASOLO <i>et al.</i> (1988); FERNANDES BARROS (1985); LARACH <i>et al.</i> (1984); BOULET <i>et al.</i> (1982).
<b>Comparações entre informações espaciais</b>	Verificação de qualidade (acurácia)	NOWATZKI (2013); SILVEIRA (2010); TEN CATEN (2008); HENGL <i>et al.</i> , (2007); CENTENO (2004).

## APÊNDICE B – HISTOGRAMAS DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

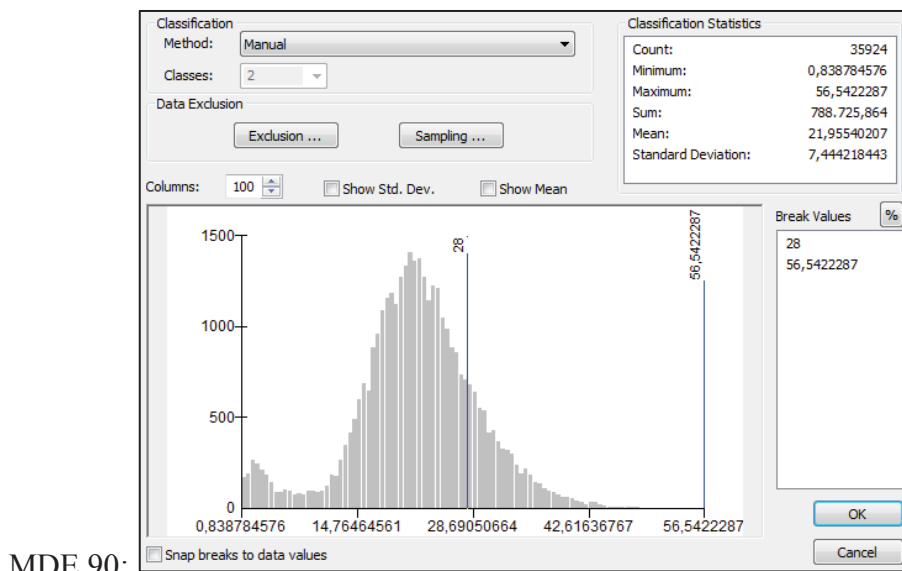
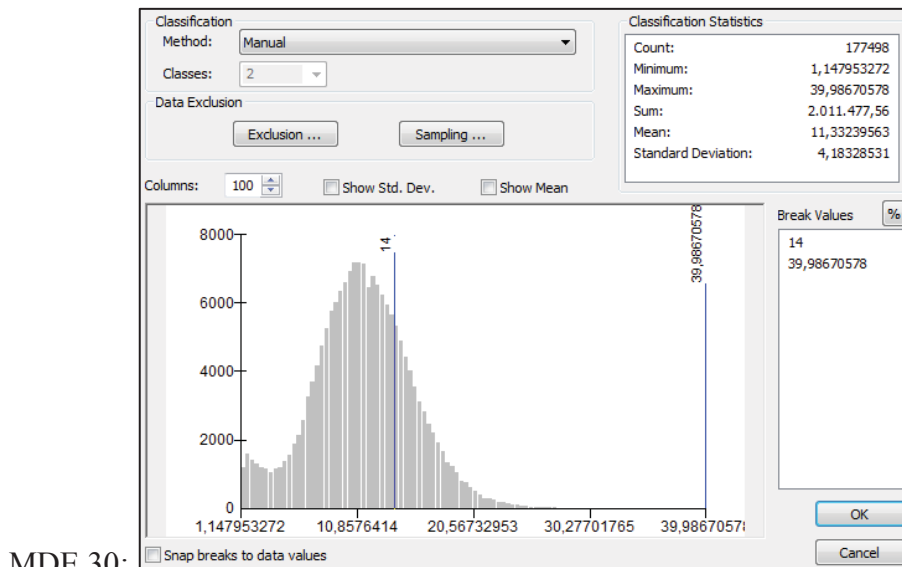
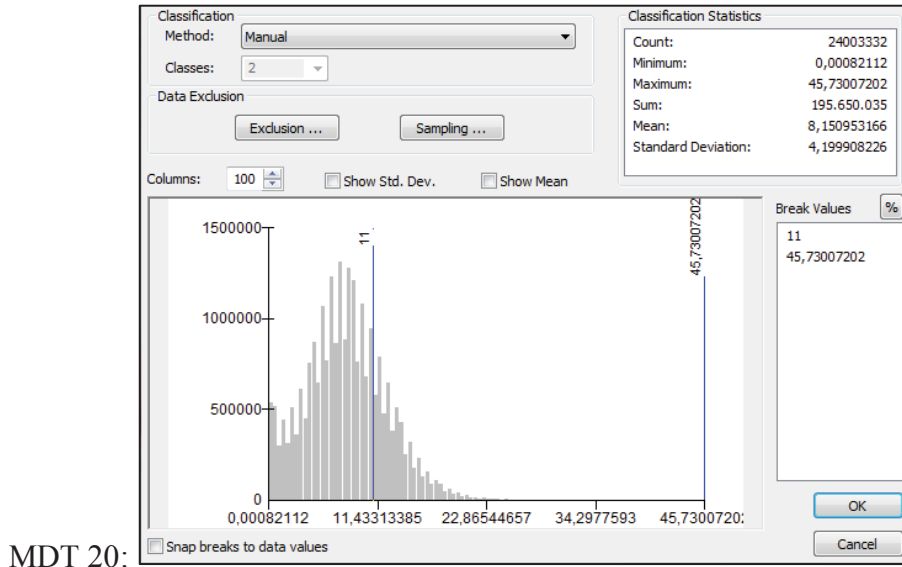
- Clinografia (CLN)



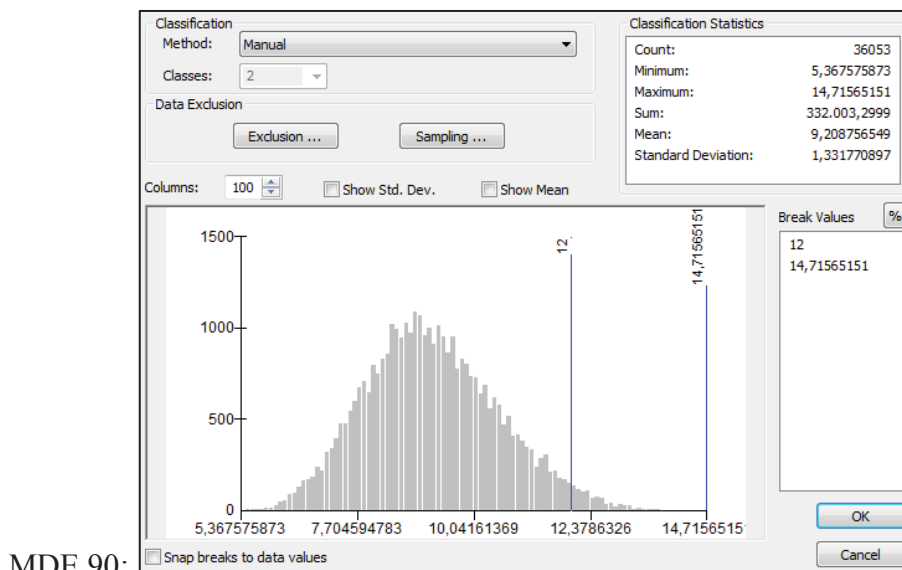
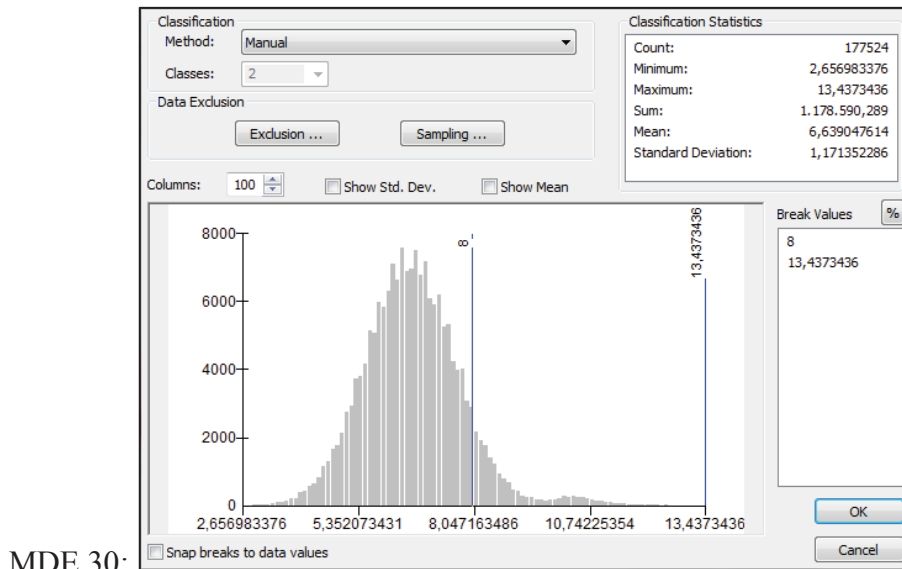
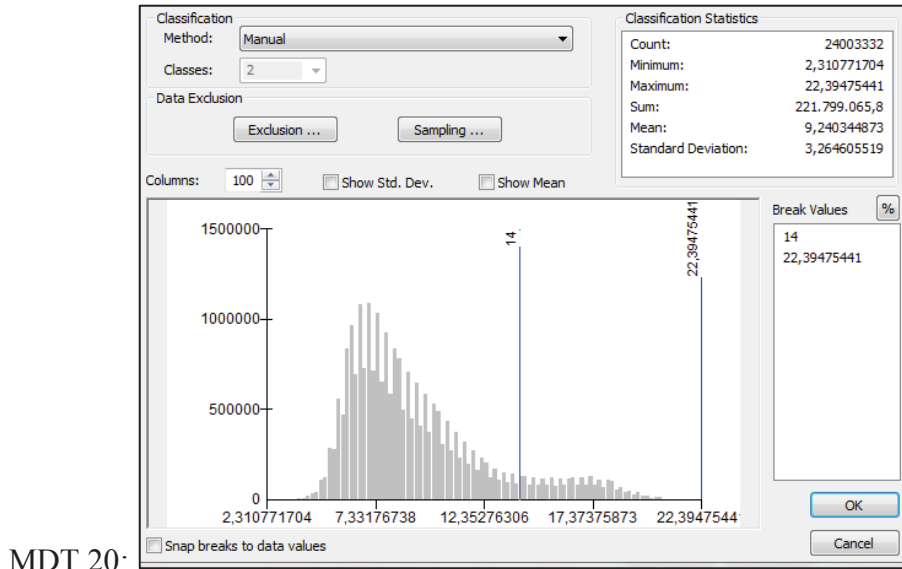
- Índice de posição topográfica (IPT)



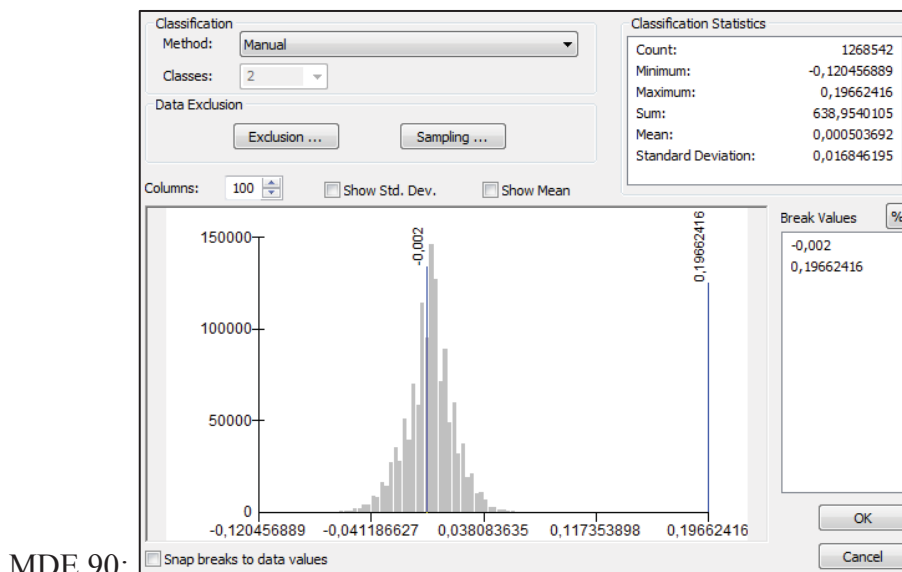
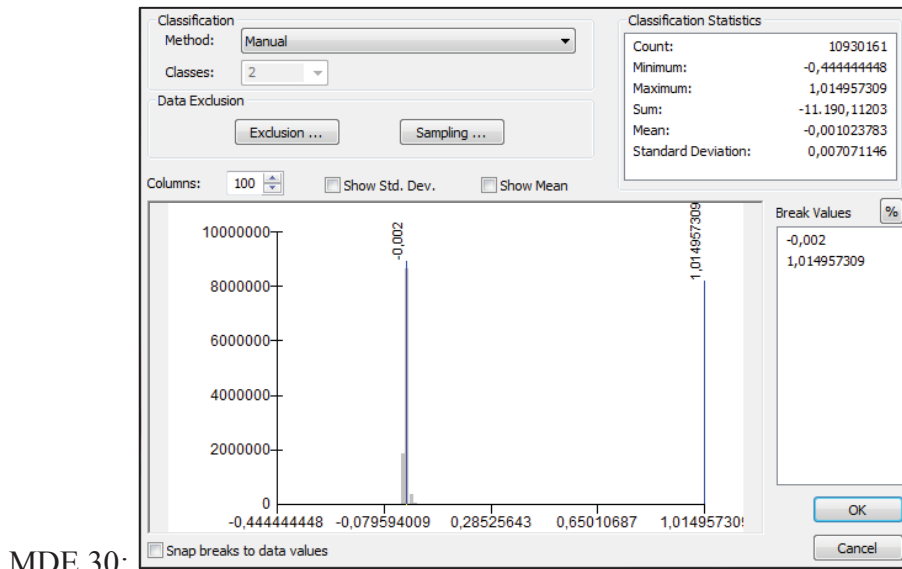
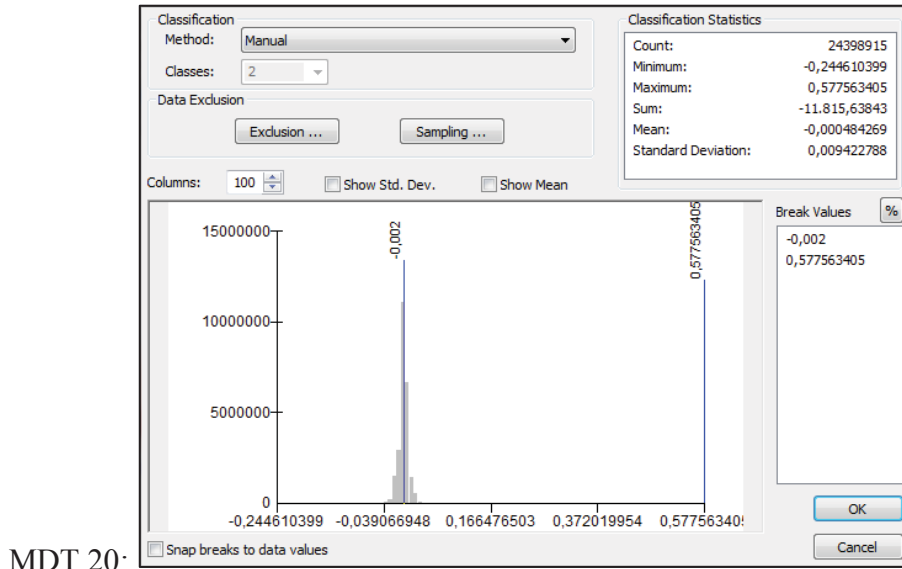
- Índice de rugosidade (IRG)



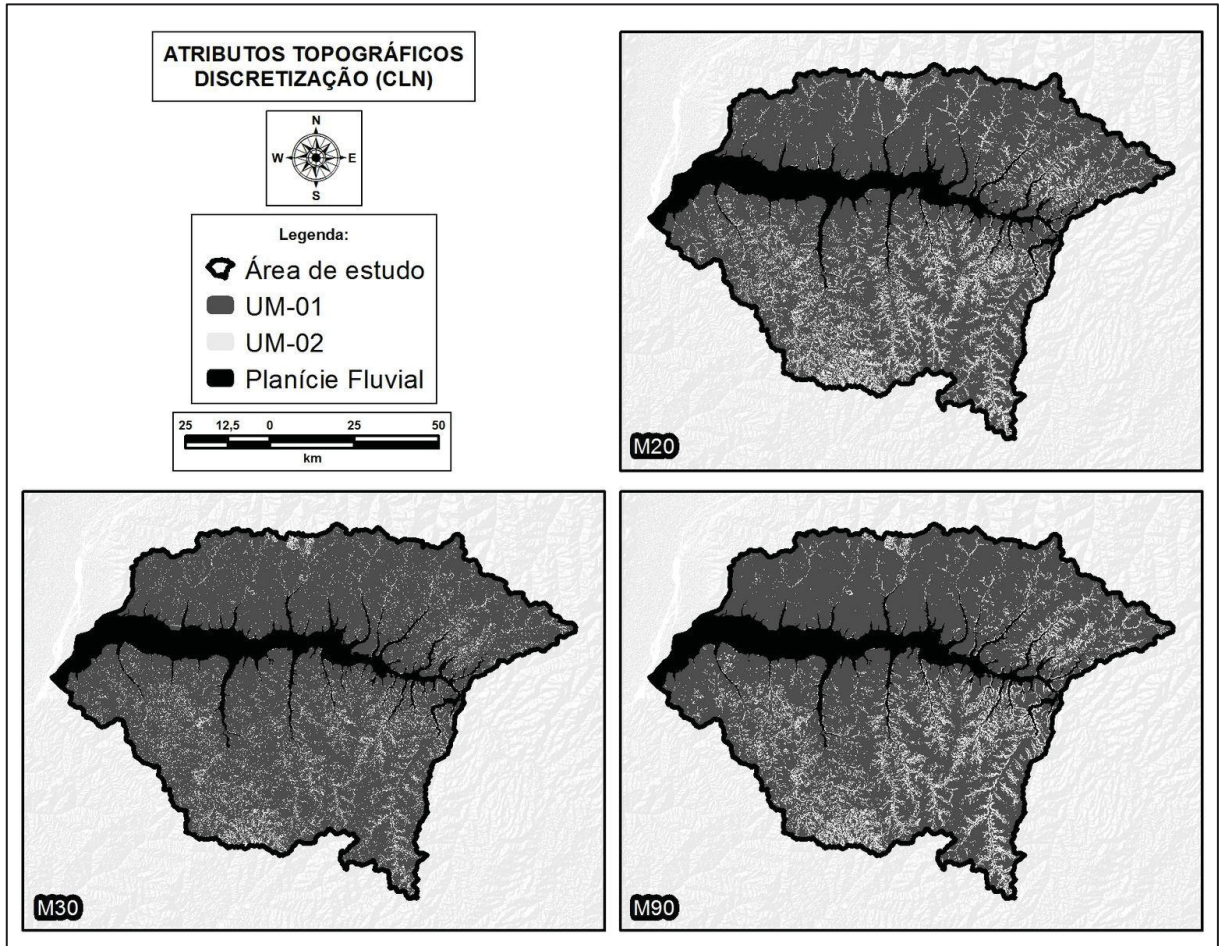
- Índice topográfico de umidade modificado (ITM)

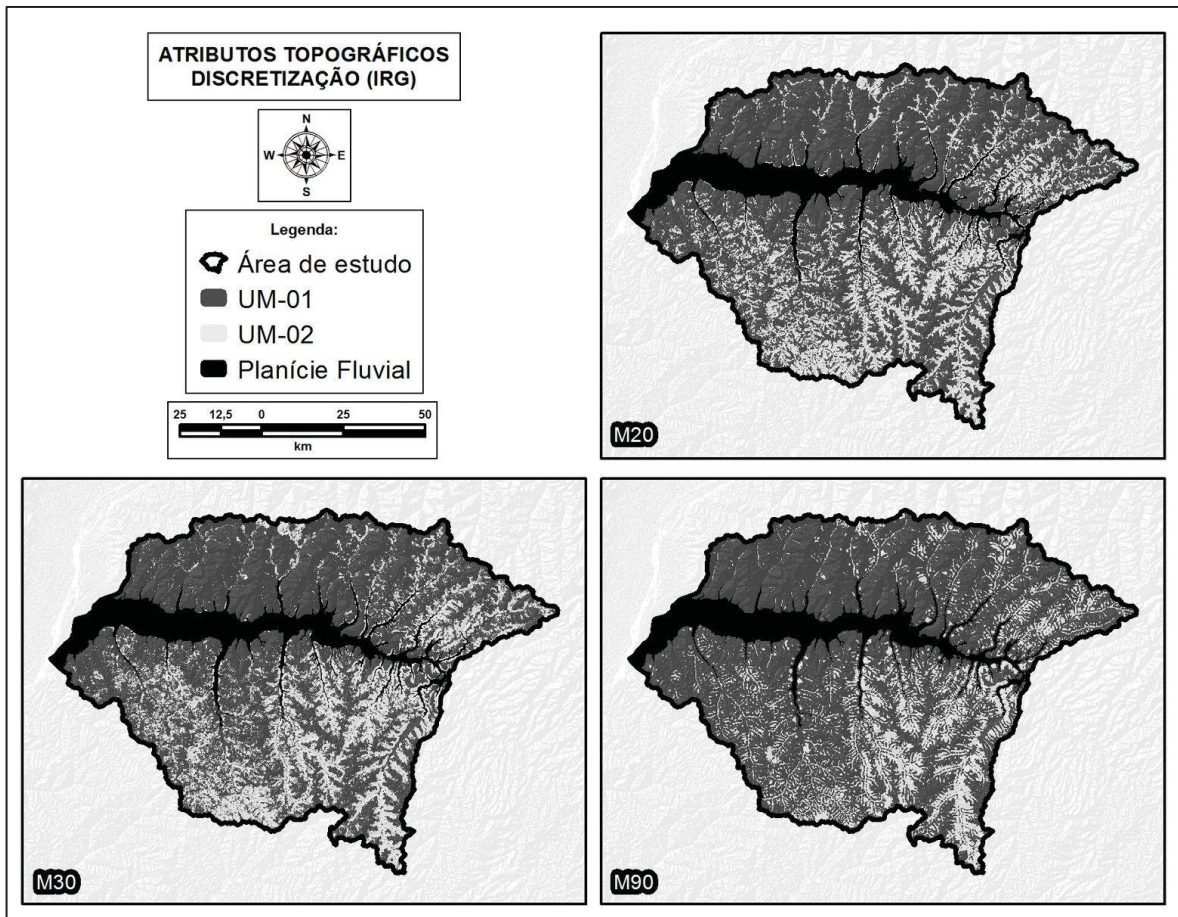
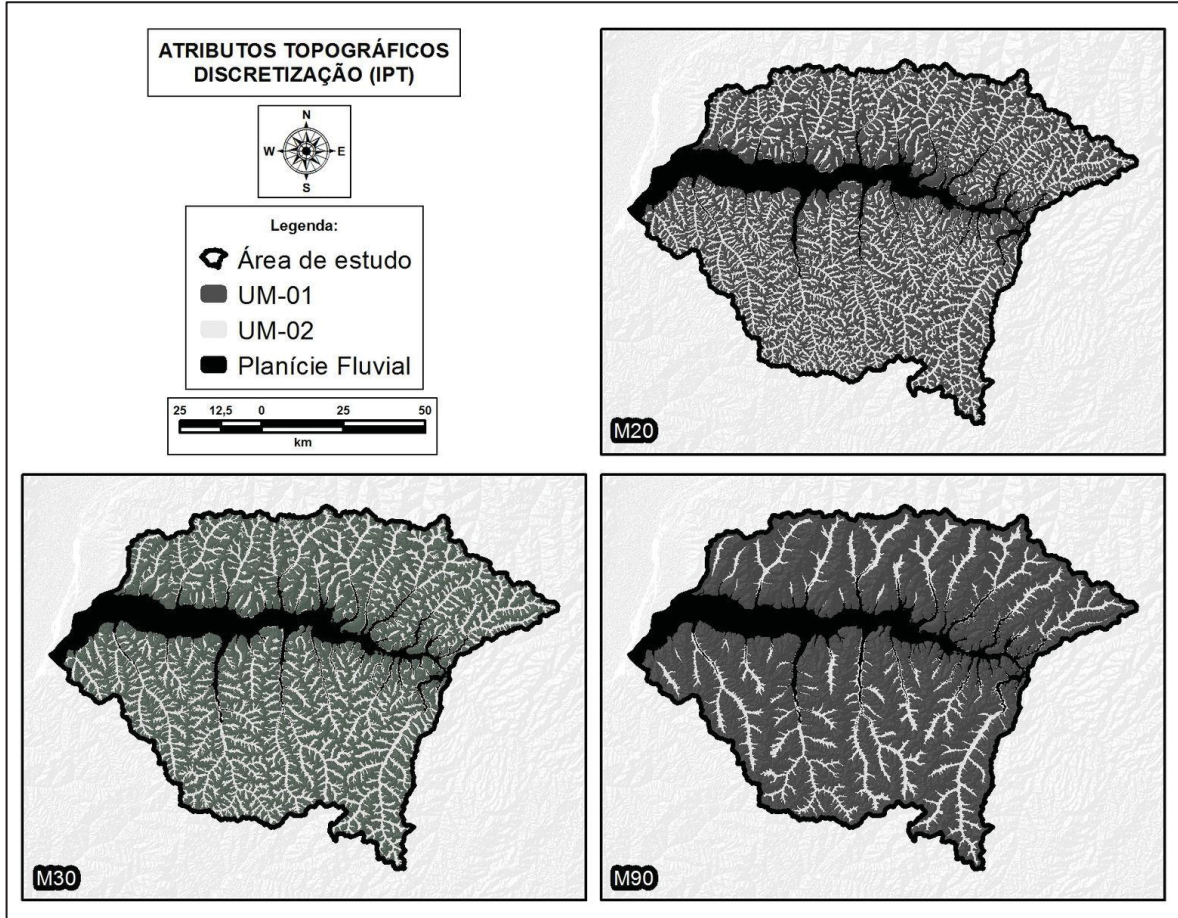


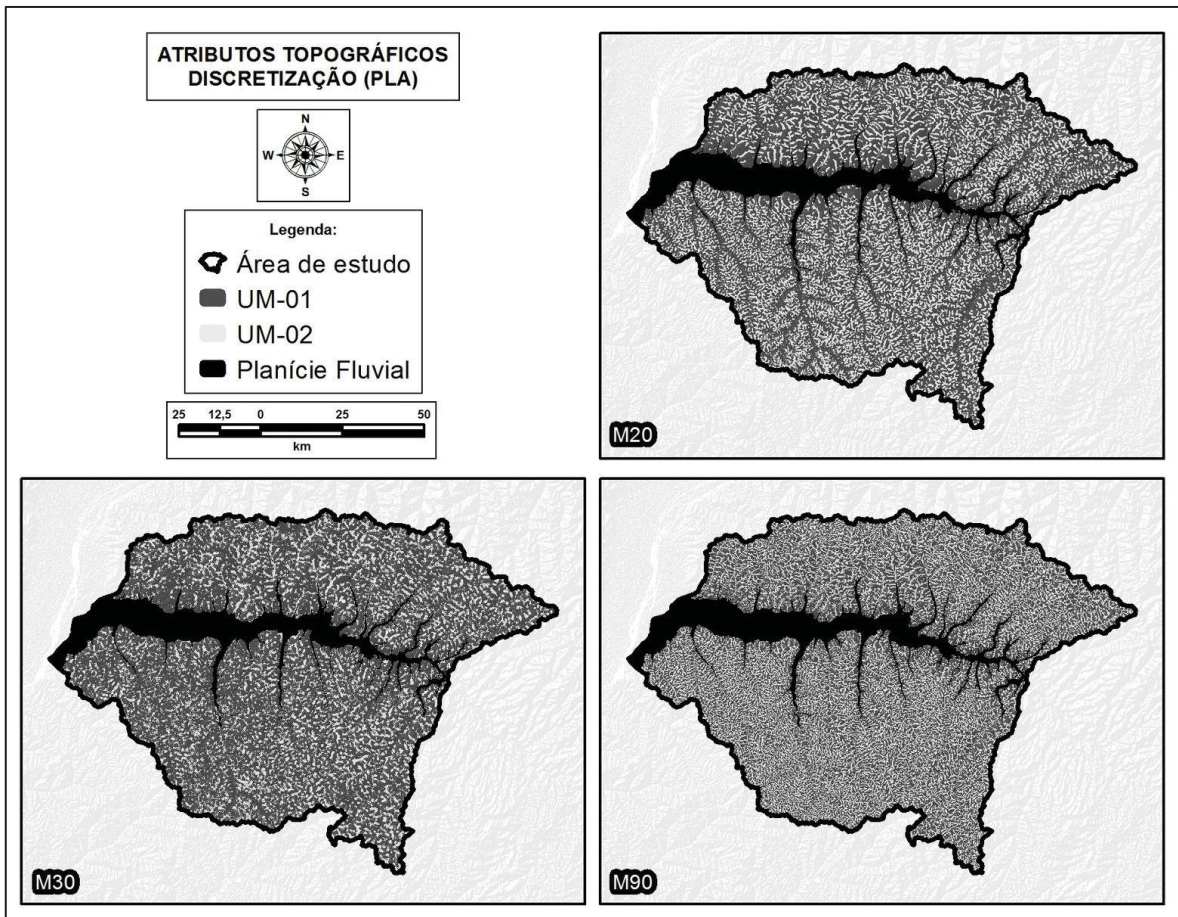
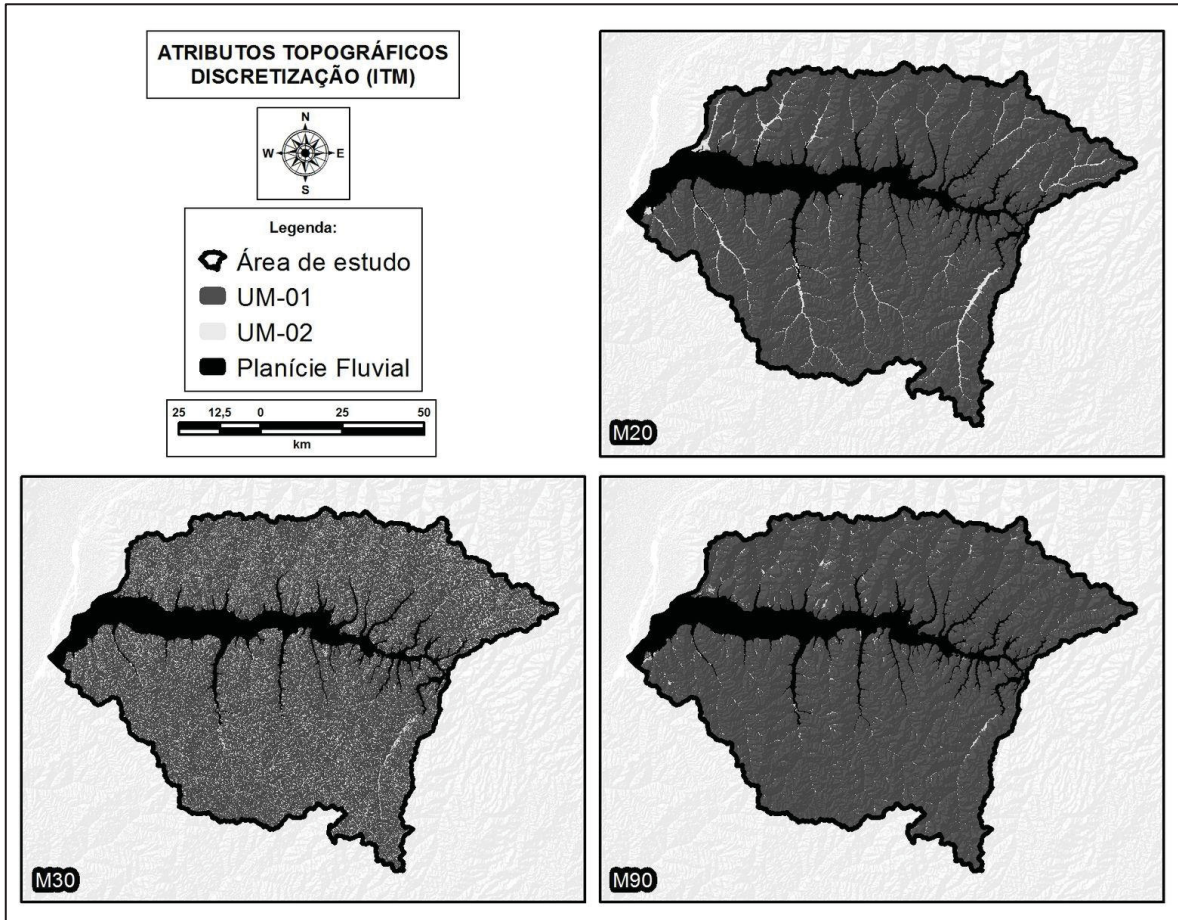
- Plano de curvatura (PLA)



APÊNCICE C – ILUSTRAÇÕES DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS DISCRETIZADOS PARA OS MODELOS M20, M30 E M90







## APÊNDICE D – DADOS LEVANTADOS (OBSERVAÇÕES DE CAMPO)

Este item tem por finalidade exibir as informações relativas às observações de campo (OC) por meio de informações sobre o local de coleta, bem como trazer fotografias que possam ilustrar as condições do terreno e do solo.

- OC 01 - Junho de 2015

Entre os municípios de Guairaçá e Terra Rica (bacia hidrográfica do rio do Corvo) foi feita uma topossequência em uma das vertentes, a fim de recolher informações sobre as mudanças pedológicas na região. As fotografias a seguir ilustram o relevo local, as coletas nas diferentes porções da vertente e as amostras no pedocomparador.

### OBSERVAÇÕES NO TERÇO SUPERIOR DE UMA VERTENTE NA BACIA DO RIO DO CORVO



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS)

### OBSERVAÇÕES NO TERÇO INFERIOR DE UMA VERTENTE NA BACIA DO RIO DO CORVO



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS)

A sub-bacia possui uma área total de 123,86 km<sup>2</sup> e segundo Nakashima (1999), essa bacia se encontra no sistema pedológico SP-II, e tem como características principais de relevo a presença de colinas amplas de topos levemente convexizados, vertentes longas, com mais de 1000m e declividades entre 1 e 2%. Em relação a distribuição dos solos, segundo este autor, há predominância dos Latossolos ao longo das vertentes, com início das transformações laterais somente na baixa vertente, representado pelos Argissolos que terminam no fundo dos vales.

Nas 10 observações realizadas em campo, notou-se que não houve um incremento de argila no horizonte B, portanto, não foi possível caracterizar como um Argissolo. Contudo, foi percebido que as cores nas duas últimas tradagens se enquadram em um Latossolo na cor 5YR (MUNSELL COLOR COMPANY, 2000). Os valores se aproximam do vermelho amarelado, o que aponta um início de transformação lateral nessa vertente, pois nas observações a montante as cores se enquadram em 2,5YR (vermelhos mais escuros e brunados).

PEDOCOMPARADOR COM AS AMOSTRAS DE SOLOS COLETADAS NA OBSERVAÇÃO 01 E AS RESPECTIVAS CORES DAS AMOSTRAS (MUNSELL)



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS)

- OC 02 - Agosto de 2015

Entre os municípios de Cruzeiro do Oeste e Tapejara (bacia hidrográfica do rio Capricórnio) foi feita também uma topossequência em uma das vertentes, a fim de recolher informações sobre as mudanças pedológicas na região.

## VERTENTE DA TOPOSSEQUÊNCIA DA BACIA DO RIO CAPRICÓRNIO



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS)

Nas 7 primeiras (sentido topo- vale) foram encontrados Latossolos, sendo que ao longo de quase 720 metros o material foi muito homogêneo em relação a textura e cor. Na porção baixa da vertente (a cerca de 180 metros de distância do rio) foi encontrado solo com maior presença de Argila no horizonte B, caracterizando os Argissolos nas duas últimas tradagens. Conforme pode ser notado na fotografia acima, o relevo é um pouco mais movimentado em comparação ao terreno encontrado na Observação 01 (bacia do rio do Corvo) e as vertentes são mais curtas. Essas características demonstram a relação existente entre as características da vertente com as classes de solos encontradas tanto nos mapeamentos preexistentes quanto nas observações de campo.

- OC 03 - Novembro de 2015

Essa observação foi realizada no município de Paranavaí. A topossequência foi realizada apenas no terço inferior da vertente e a mesma apresentou a mesma homogeneidade de textura ao longo do perfil nas 9 tradagens realizadas, portanto foi inferido que os mesmos sejam todos Latossolos.

## OBSERVAÇÃO REALIZADA EM PARANAÍ



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS)

- OC 04 - Fevereiro de 2016

A observação 04 foi feita no município de Mirador através do acesso pela PR-180 no trecho que atravessa o rio Ivaí. O intuito dessa observação era de identificar qualquer sinal de hidromorfia nas proximidades do leito do rio e conforme é possível notar na fotografia a seguir, as haviam características de solos hidromórficos (cor e saturação hídrica), afim de validar a setorização dos solos hidromórficos da AE.

## OBSERVAÇÃO REALIZADA EM MIRADOR – PLANÍCIE ALUVIAL DO RIO IVAÍ



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS)

- OC 05 - Dezembro de 2016

Essa observação se refere a uma topossequência realizada dentro da bacia hidrográfica do rio Taquara, na beira da rodovia PR-218, nas proximidades do município de Santa Izabel do Ivaí. Foi notada uma ruptura de declive na qual representou a passagem para um Argissolo. Foram feitas quatro tradagens e teve um incremento de argila nas duas primeiras sendo que na

terceira foi notada uma maior presença de areia. Na quarta tradagens já foi possível observar uma homogeneidade ao longo da tradagens, em relação a cor e textura, representando, portanto, um Latossolo.

#### OBSERVAÇÕES NO TERÇO SUPERIOR DE UMA VERTENTE NA BACIA DO RIO TAQUARA



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS)

#### TERÇO INFERIOR E FUNDO DE VALE DE UMA VERTENTE DO RIO TAQUARA



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS)

- OC 06 - Dezembro de 2016

A segunda foi nas dependências do Parque Estadual de Amaporã, situado na bacia hidrográfica do rio Jurema, município de Amaporã. O parque assume uma importância significativa, pois preserva um dos últimos remanescentes da Florestal Estacional Semicedidual do Terceiro Planalto Paranaense. O Parque Estadual de Amaporã, (antiga Reserva Florestal de Jurema) é uma das poucas áreas de preservação criadas na década de 50 do séc. XX que realmente foram implantadas (IAP, 2015).

Foram feitas 14 observações e em nenhuma delas foi identificado um horizonte B textural.

#### LOCALIZAÇÃO DO PARQUE ESTADUAL DE AMAPORÃ-PR



FONTE: IAP (2015)

As amostras mais próximas do rio apresentaram tonalidades esbranquiçadas e textura muito arenosa, que caracterizam um Neossolos Quartzarênicos, enquanto que as mais distantes da drenagem apresentaram cores avermelhadas.

PEDOCOMPARADOR COM AS AMOSTRAS DO PARQUE ESTADUAL DE AMAPORÃ E LEITO DO RIO JUREMA



FONTE: Laboratório de biogeografia e solos (LABS)

Nota-se as diferentes cores no pedocomparador e as cores esbranquiçadas próximos da drenagem principal da bacia do rio Jurema, evidenciando, portanto, a presença de Neossolos Quartzarênicos.

A partir dos trabalhos preexistentes consultados e as observações de campo, foi gerado o quadro síntese a seguir:

SÍNTESE DO BANCO DE DADOS PEDOLÓGICOS – TP

Trabalhos preexistentes (TP)		
ID	Classe de solo	Fonte dos dados
001	Latossolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
002	Latossolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
003	Latossolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
004	Latossolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
005	Argissolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
006	Argissolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
007	Argissolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
008	Latossolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
009	Latossolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
010	Argissolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
011	Argissolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
012	Argissolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
013	Latossolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
014	Latossolo	(LARACH <i>et al.</i> , 1984)
015	Latossolo	(SILVA <i>et al.</i> , 2011)

Trabalhos preexistentes (TP)		
ID	Classe de solo	Fonte dos dados
016	Argissolo	(SILVA <i>et al.</i> , 2011)
017	Neossolo	(SILVA <i>et al.</i> , 2011)
018	Latossolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
019	Latossolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
020	Latossolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
021	Latossolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
022	Latossolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
023	Latossolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
024	Latossolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
025	Latossolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
026	Argissolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
027	Argissolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
028	Argissolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
029	Argissolo	(CUNHA <i>et al.</i> , 2008)
030	Argissolo	(IBGE, 2018)

SÍNTESE DO BANCO DE DADOS PEDOLÓGICOS – OC

Observações de campo (OC)			
ID	Classe de solo	Fonte dos dados	Amostra (RL)
001	Latossolo	OC 01	Sim
002	Latossolo	OC 01	Sim
003	Latossolo	OC 01	Não
004	Latossolo	OC 01	Não
005	Latossolo	OC 01	Não
006	Latossolo	OC 01	Não
007	Latossolo	OC 01	Não
008	Latossolo	OC 01	Não
009	Latossolo	OC 01	Sim
010	Latossolo	OC 01	Sim
011	Latossolo	OC 02	Sim
012	Latossolo	OC 02	Sim
013	Latossolo	OC 02	Não
014	Latossolo	OC 02	Não
015	Latossolo	OC 02	Não
016	Latossolo	OC 02	Não
017	Latossolo	OC 02	Não
018	Argissolo	OC 02	Sim
019	Argissolo	OC 02	Sim
020	Latossolo	OC 03	Não
021	Latossolo	OC 03	Não
022	Latossolo	OC 03	Não
023	Latossolo	OC 03	Não
024	Latossolo	OC 03	Não

Observações de campo (OC)			
ID	Classe de solo	Fonte dos dados	Amostra (RL)
025	Latossolo	OC 03	Não
026	Latossolo	OC 03	Não
027	Latossolo	OC 03	Não
028	Latossolo	OC 03	Não
029	Solo hidromórfico	OC 04	Não
030	Argissolo	OC 05	Sim
031	Argissolo	OC 05	Sim
032	Argissolo	OC 05	Não
033	Latossolo	OC 05	Não
034	Latossolo	OC 06	Sim
035	Latossolo	OC 06	Sim
036	Latossolo	OC 06	Sim
037	Latossolo	OC 06	Não
038	Latossolo	OC 06	Não
039	Latossolo	OC 06	Não
040	Latossolo	OC 06	Não
041	Latossolo	OC 06	Não
042	Latossolo	OC 06	Não
043	Latossolo	OC 06	Não
044	Latossolo	OC 06	Não
045	Latossolo	OC 06	Não
046	Latossolo	OC 06	Não
047	Latossolo	OC 06	Não

LEGENDA: ID = código usado no *software*; Classe de solo = 1º nível categórico (EMBRAPA, 2015)

## ANEXO A – DESCRIÇÃO DOS ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS DOS PERFIS DE SOLOS DOS TRABALHOS PREEXISTENTES

- TP 01 – Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do paraná

Esse anexo corresponde às informa es das coletas realizadas para a descri o dos solos do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná, (LARACH et al., 1984) realizado pela EMBRAPA, que serviram para alimentar o banco de dados pedológicos desse trabalho. As informa es serão representadas em forma de tabelas ou quadros a seguir, por ordem do ID no arquivo *shapefile*. São 14 pontos de controle com descri o dos solos até o quarto nível categórico (EMBRAPA, 2018), bem como informa es de atributos morfológicos dos perfis, como a textura e os valores da granulometria.

LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico A moderado textura argilosa relevo suave ondulado					
LOCALIZA�O: A 10 km de Marialva, na estrada para Mandaguari, entrando-se 2 km � esquerda, na estrada secundária					
EMBRAPA - Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Tomo I. Londrina 1984. p. 253					
ID do ponto: 001					
HORIZONTE		COMPOSI�O GRANULOMÉTRICA DA TERRA FINA			
SIMBOLO	PROFUNDIDADE (CM)	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
Ap	0-30	2	3	15	80
A3	30-65	2	3	13	82
B1	65-125	2	3	16	79
B2	125-200+	2	4	12	82

LATOSSOLO VREMELHO Distrófico A moderado textura média relevo suave ondulado praticamente plano					
LOCALIZA�O: A 8 km de Guaira�, na estrada para Nova Londrina, entrando-se 1 km � esquerda					
EMBRAPA - Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Tomo I. Londrina 1984. p. 171					
ID do ponto: 002					
HORIZONTE		COMPOSI�O GRANULOMÉTRICA DA TERRA FINA			
SIMBOLO	PROFUNDIDADE (CM)	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
A1	0-15	52	32	5	11
A3	15-35	50	35	2	13
B1	35-65	48	34	2	16
B21	65-120	47	32	3	18
B22	120-230+	47	33	2	18

<b>LATOSSOLO VERMELHO</b> Álico A moderado textura média relevo suave ondulado praticamente plano					
LOCALIZAÇÃO: A 6 km de Itaúna, na estrada para Nova Londrina, mais ou menos 50 metros à direita					
EMBRAPA - Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Tomo I. Londrina 1984. p. 177					
ID do ponto: <b>003</b>					
HORIZONTE		COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA TERRA FINA			
SIMBOLO	PROFUNDIDADE (CM)	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
A1	0-13	49	35	3	13
A3	13-40	45	37	5	13
B1	40-82	46	37	3	14
B21	82-160	45	38	2	15
B22	160-220	49	34	2	15
B23	220-550+	45	36	3	16

<b>LATOSSOLO VERMELHO</b> Álico A moderado textura média relevo suave ondulado praticamente plano					
LOCALIZAÇÃO: A 10 km de Paranavaí, na estrada par Tamborá, aproximadamente 500 metros à direita					
EMBRAPA - Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Tomo I. Londrina 1984. p. 180					
ID do ponto: <b>004</b>					
HORIZONTE		COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA TERRA FINA			
SIMBOLO	PROFUNDIDADE (CM)	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
A1	0-15	50	38	2	10
A3	15-28	46	39	3	12
B1	28-60	46	36	3	15
B21	60-125	42	38	4	16
B22	125-225+	42	37	5	16

<b>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO</b> Distrófico Tb abruptico A moderado textura arenosa/média rel. suave ondulado					
LOCALIZAÇÃO: A 2 km de Cruzeiro do Oeste, na estrada para Umuarama, entrando à direita mais 3,5 km					
EMBRAPA - Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Tomo II. Londrina 1984. p. 512					
ID do ponto: <b>005</b>					
HORIZONTE		COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA TERRA FINA			
SIMBOLO	PROFUNDIDADE (CM)	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
A21p	0-30	60	33	4	3
A22	30-100	59	35	4	2
B2t	10-138	46	28	4	22
B3t	138-172+	42	29	6	23

<b>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO</b> Distrófico Tb A moderado textura arenosa/média relevo ondulado					
LOCALIZAÇÃO: a 10 KM DE Paranavaí, na estrada para Tamboará, entrando 5, km à direita					
EMBRAPA - Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Tomo II. Londrina 1984. p. 506					
ID do ponto: <b>006</b>					
HORIZONTE		COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA TERRA FINA			
SIMBOLO	PROFUNDIDADE (CM)	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
A21p	0-12	40	46	7	7
A22	12-50	39	52	5	4
A23	50-65	37	51	4	8
B21	65-100	30	39	6	25
B22	100-135	30	39	5	26
B3t	135-190+	34	42	6	18

<b>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO</b> Distrófico TB A moderado textura arenosa relevo suave ondulado					
LOCALIZAÇÃO: Nova Aliança do Ivaí, na estrada entre Paranavaí e Nova Aliança do Ivaí, a 4 km desta					
EMBRAPA - Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Tomo II. Londrina 1984. p. 499					
ID do ponto: <b>007</b>					
HORIZONTE		COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA TERRA FINA			
SIMBOLO	PROFUNDIDADE (CM)	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
Ap	0-43	55	34	2	9
B1t	43-65	48	38	1	13
B21t	65-138	53	31	2	14
B22t	138-213	47	37	2	14

<b>LATOSSOLO VERMELHO</b> Eutrófico Argissólico A moderado textura média/argilosa relevo quase plano					
LOCALIZAÇÃO: A 6 km de Itaúna do Sul, na estrada para Diamante do Norte, lado esquerdo					
EMBRAPA - Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Tomo I. Londrina 1984. p. 186					
ID do ponto: <b>008</b>					
HORIZONTE		COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA TERRA FINA			
SIMBOLO	PROFUNDIDADE (CM)	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
A1	0-18	51	13	8	28
B1	18-27	44	13	6	37
B21	27-61	38	12	4	46
B22	61-90	38	12	5	45
B23	90-148+	40	13	4	43

<b>LATOSSOLO VERMELHO</b> Álico A moderado textura média relevo suave ondulado					
LOCALIZAÇÃO: A 12 km de Cianorte, na estrada para Cruzeiro do Oeste					
EMBRAPA - Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Tomo I. Londrina 1984. p. 175					
ID do ponto: <b>009</b>					
HORIZONTE		COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA TERRA FINA			
SIMBOLO	PROFUNDIDADE (CM)	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
A1	0-5	50	30	6	14
A3	5-25	51	34	4	11
B1	25-50	55	31	3	11
B2	50-115	48	36	3	13
B3	115-195+	48	32	4	16

<b>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO</b> Distrófico Tb abruptico A moderado textura arenosa/média relevo ondulado					
LOCALIZAÇÃO: A 2 km de Tapejara, na estrada para Tuneiras do Oeste					
EMBRAPA - Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Tomo II. Londrina 1984. p. 514					
ID do ponto: <b>010</b>					
HORIZONTE		COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA TERRA FINA			
SIMBOLO	PROFUNDIDADE (CM)	AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
A21	0-20	31	57	7	5
A22	20-60	29	60	7	4
B1t	60-100	25	53	8	14
B21t	100-140	20	47	3	30
*	140-147	20	45	3	32
B22t	147-210	20	48	5	27
B3t	210-280	19	55	11	15

<b>ARGISSOLO VERMELHO</b> Distrófico Tb A moderado textura média-argilosa relevo ondulado
LOCALIZAÇÃO: margem do córrego Ipiranga, Cidade Gaúcha
Gasparetto, N. V.; Nakashima, P.; Nóbrega, M. T. - carta de solos de cidade gaúcha
ID DO PONTO: <b>011</b>

<b>ARGISSOLO VERMELHO</b> Distrófico Tb A moderado textura média-argilosa relevo ondulado
LOCALIZAÇÃO: margem do córrego Palmital, Cidade Gaúcha
Gasparetto, N. V.; Nakashima, P.; Nóbrega, M. T. - carta de solos de cidade gaúcha
ID DO PONTO: <b>012</b>

<b>LATOSSOLO VREMELHO</b> A moderado textura média arenosa relevo suave ondulado praticamente plano
LOCALIZAÇÃO: margem do córrego Palmital, Cidade Gaúcha
Gasparetto, N. V.; Nakashima, P.; Nóbrega, M. T. - carta de solos de cidade gaúcha
ID DO PONTO: <b>013</b>

<b>LATOSSOLO VERMELHO</b> A moderado textura média arenosa, relevo suave ondulado praticamente plano
LOCALIZAÇÃO: margem do córrego Palmital, Cidade Gaúcha
Gasparetto, N. V.; Nakashima, P.; Nóbrega, M. T. - carta de solos de cidade gaúcha
ID DO PONTO: <b>014</b>

- TP 02 – Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Arara – Paranavaí, PR.

As informações presentes em Silva *et al.* (2011) se referem a três perfis de solo característicos de uma topossequência do arenito, na Estrada Quatorze, pertencente à Microbacia Arara, do Programa de Gestão Ambiental Integrada em Microbacias (PGAIM), no Município de Paranavaí, Noroeste do Paraná. As classes de solo correspondem ao Latossolo Vermelho típico, Argissolo Vermelho abrupto e Neossolo Quartzarênico.

Conforme apresenta Silva *et al.* (2011), os teores de argila, silte e areia para três classes de solos encontrados na microbacia estão agrupados na seguinte tabela:

Horizonte	Camada	Argila	Silte	Areia
	(cm)	g/kg <sup>-1</sup>		
<b>Latossolo Vermelho típico</b>				
A	0-17	90	20	890
BW1	18-60	130	10	860
BW2	>61	160	10	830
<b>Argissolo Vermelho abrupto</b>				
A	0-41	60	10	930
E	42-50	50	10	940
Bt1	51-100	180	20	800
Bt2	>101	190	20	790
<b>Neossolo Quartzarênico</b>				
A1	0-18	30	20	950
A2	19-100	50	50	900
C	>101	150	40	810

