

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA**

**ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO NA PREDIÇÃO DE UNIDADES PRELIMINARES  
DE MAPEAMENTO DE SOLOS: INTEGRAÇÃO DE ATRIBUTOS  
TOPOGRÁFICOS EM SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E REDES  
NEURAS ARTIFICIAIS**

CURITIBA  
2010

**CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA**

**ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO NA PREDIÇÃO DE UNIDADES PRELIMINARES  
DE MAPEAMENTO DE SOLOS: INTEGRAÇÃO DE ATRIBUTOS  
TOPOGRÁFICOS EM SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E REDES  
NEURAS ARTIFICIAIS**

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

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Chisato Oka-Fiori

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro Santos

CURITIBA  
2010

“Vivendo, se aprende;  
mas o que se aprende, mais,  
é só a fazer outras maiores perguntas.”

João Guimarães Rosa  
Grande Sertão: Veredas

Dedico à minha família,  
em especial à minha esposa Clotilde  
e à minha mãe Raquel

## AGRADECIMENTOS:

À Universidade Federal do Paraná por proporcionar o ambiente de formação;

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPR pela oportunidade de aprendizado;

À CAPES pela bolsa de fomento concedida nos três primeiros anos do curso;

Aos professores que compartilharam seus conhecimentos nas disciplinas cursadas;

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Chisato Oka-Fiori pela orientação no doutoramento e tese, pelo tempo e dedicação dispensados e pela amizade cultivada;

Ao Professor Dr. Leonardo José Cordeiro Santos por participar da banca de qualificação da tese com importantes contribuições sugeridas, pela coorientação e amizade cultivada;

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ambrosina Helena Ferreira Gontijo Pascutti por participar das bancas de qualificação e defesa da tese e pelas importantes contribuições sugeridas;

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Bianca Carvalho Vieira, ao Prof. Dr. Angelo Evaristo Sirtoli e ao Prof. Dr. Tony Vinicius Moreira Sampaio, por participarem da banca de defesa da tese e pelas importantes contribuições sugeridas;

À secretaria de Pós-Graduação em Geografia da UFPR, na pessoa de Luiz Carlos Zem, pela competência no exercício de sua função, pela disposição em ajudar e amizade cultivada e Paula pela disposição e simpatia;

Ao Projeto Falhas, na pessoa do Professor Dr. Alberto Pio Fiori, por ceder o uso de *software's* de geoprocessamento, computadores e a infraestrutura do Núcleo de Geoprocessamento;

Ao amigo Ângelo pelas discussões sobre solos e o acompanhamento nos trabalhos de campo;

Ao amigo Claudionor pelo auxílio nas deduções matemáticas e aplicações operacionais em MatLab;

Ao amigo Edenilson pelas sugestões e amizade cultivada;

Ao colega Talles e ao Prof. Luiz Cláudio de Paula Souza pelo auxílio nas análises laboratoriais de solo;

Ao colega Mosar pelo auxílio com as Redes Neurais Artificiais e aplicações em MatLab;

Aos colegas de Pós-Graduação pelo convívio que propiciou o amadurecimento científico;

À minha família pelo apoio, compreensão pelos momentos de ausência e conforto nos momentos difíceis, especialmente à minha mãe Raquel, exemplo de coragem e perseverança;

À minha amada esposa Clotilde pelo carinho, apoio, incentivo e compreensão pelos momentos de ausência, também pelo auxílio na diagramação do trabalho;

Aos amigos: Clarice, Godoy e Milani pela amizade cultivada e aprendizado;

Aos amigos geógrafos: Germano, Deuseles, Wilson, Adilson, Marlus, Barão, Laércio e suas esposas, pela companhia nos momentos descontraídos de lazer e confraternização.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE QUADROS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA.....	22
2.1. MODELOS DE PAISAGEM SOLOS-RELEVO.....	22
2.2. APLICAÇÕES DE MODELOS DAS RELAÇÕES SOLO-RELEVO.....	28
2.3. MODELOS DE PREDIÇÃO DE SOLOS COM MAPEAMENTO DIGITAL.....	31
2.4. ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS.....	38
2.5. REDES NEURAS ARTIFICIAIS.....	42
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	46
3.2. MÉTODOS.....	46
3.2.1. Digitalização dos dados cartográficos.....	46
3.2.2. Obtenção do MDT.....	46
3.2.3. Cálculo dos atributos topográficos.....	47
3.2.3.1. Atributos topográficos primários.....	50
3.2.3.2. Atributos topográficos secundários.....	51
3.2.4. Relação entre unidades de solos e atributos topográficos.....	54
3.2.4.1. Organização dos mapas de solos.....	54
3.2.4.2. Discretização dos atributos topográficos.....	54
3.2.4.3. Sobreposição dos mapas convencionais com os atributos topográficos.....	57
3.2.5. Métodos adotados para identificação de unidades preliminares de solos.....	57
3.2.5.1. Método de integração dos atributos topográficos por tabulação cruzada.....	57
3.2.5.2. Integração dos atributos topográficos por RNA.....	60
3.2.5.2.1. Levantamento de amostras para a RNA.....	60
3.2.5.2.2. Arquitetura e algoritmo de aprendizado da RNA.....	62
3.2.5.2.3. Classificação das unidades preliminares por RNA.....	64
3.2.5.2.4. Avaliação de influência das variáveis nas unidades de solo.....	64
3.2.5.2.5. Generalização.....	66

3.2.5.3. Validação dos mapas preliminares com pontos de controle e apoio de campo..	66
3.2.5.4. Comparação entre as unidades de solos classificados por tabulação cruzada e RNA com mapas de solo convencionais	66
4. ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO COM UNIDADES DE SOLO	70
4.1. MAPEAMENTOS DE SOLOS PRÉ-EXISTENTES NA ÁREA DE ESTUDO	70
4.2. RELAÇÃO ENTRE UNIDADES DE SOLO E ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS	73
4.2.1. Hipsometria	73
4.2.2. Declividade	77
4.2.3. Perfil de Curvatura	81
4.2.4. Plano de Curvatura	84
4.2.5. Índice de Corrente de Máximo Fluxo	88
4.2.6. Índice de Umidade	91
4.2.7. Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos	94
5. MAPEAMENTO DE UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS	98
5.1. PREDIÇÃO POR TABULAÇÃO CRUZADA	98
5.2. PREDIÇÃO POR REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	106
5.2.1. Análise de validação cruzada múltipla da RNA	111
5.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS UNIDADES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA, TABULAÇÃO CRUZADA E OS MAPEAMENTOS PRÉ-EXISTENTES	122
5.3.1. Comparação entre as unidades de solos dos mapas pré-existentes	123
5.3.2. Comparação entre o mapa preliminar de solos obtido por tabulação cruzada com os mapas pré-existentes 01 e 02	125
5.3.3. Comparação entre o mapa preliminar de solos classificado por RNA com os mapas convencionais 01 e 02	131
5.3.4. Comparação entre as unidades de solos classificadas por RNA e tabulação cruzada	136
6. CONCLUSÕES	139
7. REFERÊNCIAS	142

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	18
FIGURA 1.2 – MOSAICO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS DA ÁREA DE ESTUDO .....	20
FIGURA 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DE QUATRO FORMAS DE VERTENTES SEGUNDO A CURVATURA	24
FIGURA 2.2 - FLUXO DA ÁGUA NO PLANO DE CURVATURA (SETAS PONTILHADAS) E FLUXO DA ÁGUA NO PERFIL DA CURVATURA DAS VERTENTES (SETAS CONTÍNUAS).....	25
FIGURA 2.3 – MODELOS DIDÁTICOS ILUSTRATIVOS QUE REPRESENTAM AS FORMAS DAS VERTENTES EM PERFIL E PLANO DE CURVATURA .....	25
FIGURA 2.4 - NOVE UNIDADES HIPOTÉTICAS DO MODELO DE SEGMENTO DE VERTENTES .....	26
FIGURA 2.5 – TIPOS DE REDES NEURAIIS .....	44
FIGURA 3.1 – REPRESENTAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS .....	48
FIGURA 3.2 – GRADE REGULAR DA SUPERFÍCIE DO SOLO (a), JANELA COM NOVE NODOS (b), JANELA COM NOVE <i>PIXELS</i> (c).....	49
FIGURA 3.3 – VIZINHANÇA 3X3 LOCAL .....	50
FIGURA 3.4 – MODELO DIGITAL (a); DIREÇÃO DO FLUXO (b); ÁREA ESPECÍFICA DE CONTRIBUIÇÃO ( $A_c$ ), ACUMULAÇÃO DO FLUXO OU ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (c) .....	52
FIGURA 3.5 - HISTOGRAMA E DISCRETIZAÇÃO DAS CLASSES DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS .....	56
FIGURA 3.6 - AMOSTRAS DE TREINAMENTO E VERIFICAÇÃO DA RNA .....	60
FIGURA 3.7 – EXEMPLO DE COLETA DE AMOSTRAS COM CINCO PIXELS.....	62
FIGURA 3.8 – ARQUITETURA DA RNA <i>PERCEPTRON MULTICAMADAS</i> UTILIZADA.....	63
FIGURA 3.9 – GRÁFICO DE CONVERGÊNCIA DA RNA NOS TESTES DE VALIDAÇÃO CRUZADA ...	65
FIGURA 4.1 – MAPEAMENTO 01 .....	71
FIGURA 4.2 – MAPEAMENTO 02 .....	72
FIGURA 4.3 – MAPA DE HIPSOMETRIA DA BACIA DO ARROIO DO CORVO .....	74
FIGURA 4.4 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX NAS CLASSES HIPSOMÉTRICAS .....	75
FIGURA 4.5 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS NAS CLASSES HIPSOMÉTRICAS	76
FIGURA 4.6 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS NAS CLASSES HIPSOMÉTRICAS...	77
FIGURA 4.7 - MAPA DE DECLIVIDADE DA BACIA DO ARROIO DO CORVO.....	78
FIGURA 4.8 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX NAS CLASSES DE DECLIVIDADE.....	79
FIGURA 4.9 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS NAS CLASSES DE DECLIVIDADE .....	80
FIGURA 4.10 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS NAS CLASSES DE DECLIVIDADE	80
FIGURA 4.11 – MAPA DO PERFIL DE CURVATURA DA BACIA DO ARROIO DO CORVO .....	82
FIGURA 4.12 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX COM O PERFIL DE CURVATURA .....	83
FIGURA 4.13 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O PERFIL DE CURVATURA .....	84
FIGURA 4.14 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS COM O PERFIL DE CURVATURA	84
FIGURA 4.15 – MAPA DO PLANO DE CURVATURA DA BACIA DO ARROIO DO CORVO .....	85
FIGURA 4.16 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX COM O PLANO DE CURVATURA .....	86

FIGURA 4.17 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O PLANO DE CURVATURA .....	87
FIGURA 4.18 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS COM O PLANO DE CURVATURA .....	87
FIGURA 4.19 - MAPA DO ÍNDICE DE CORRENTE DE MÁXIMO FLUXO .....	88
FIGURA 4.20 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX COM O ICMF .....	89
FIGURA 4.21 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O ICMF .....	90
FIGURA 4.22 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS COM O ICMF .....	90
FIGURA 4.23 - MAPA DO ÍNDICE DE UMIDADE .....	91
FIGURA 4.24 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX COM O ÍNDICE DE UMIDADE .....	92
FIGURA 4.25 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O ÍNDICE DE UMIDADE .....	93
FIGURA 4.26 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS COM O ÍNDICE DE UMIDADE .....	94
FIGURA 4.27 - MAPA DO ÍNDICE DE CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	95
FIGURA 4.28 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX COM O ICTS .....	96
FIGURA 4.29 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O ICTS .....	97
FIGURA 4.30 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O ICTS .....	97
FIGURA 5.1 - UNIDADES GEOMÓRFICAS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS .....	99
FIGURA 5.2 - MAPA DE UNIDADES PRELIMINAR DE SOLO OBTIDO POR MEIO DE TABULAÇÃO CRUZADA ENTRE OS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS .....	101
FIGURA 5.3 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLES PARA VERIFICAÇÃO DAS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA.....	104
FIGURA 5.4 - MAPA DE UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADOS POR RNA .....	107
FIGURA 5.5 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE DE CAMPO PARA VERIFICAÇÃO DO MAPA DAS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDOS POR RNA .....	108
FIGURA 5.6 - PERFIL DE ORGANOSSOLO REFERENTE AO PONTO 48 .....	108
FIGURA 5.7 - PERFIL DE GLEISSOLO REFERENTE AO PONTO 49 .....	109
FIGURA 5.8 - PERFIL DE LATOSSOLO REFERENTE AO PONTO 31 .....	109
FIGURA 5.9 - PERFIL DE CAMBISSOLO REFERENTE AOS PONTOS 29 E 30 .....	110
FIGURA 5.10 - SUBTRAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PRIMÁRIOS E GEOLOGIA NA RNA .....	112
FIGURA 5.11 - SUBTRAÇÃO DAS VARIÁVEIS DOS ATRIBUTOS SECUNDÁRIOS NA RNA .....	118
FIGURA 5.12 - SUBTRAÇÃO DA VARIÁVEL GEOLOGIA NA RNA .....	120
FIGURA 5.13 - INTEGRAÇÃO NA RNA DAS MESMAS VARIÁVEIS ADOTADAS NA DELIMITAÇÃO DE UNIDADES PRELIMINARES DO MÉTODO POR TABULAÇÃO CRUZADA .....	121
FIGURA 5.14 - MAPAS DE SOLOS CONVENCIONAIS EM NÍVEL DE ORDEM .....	124
FIGURA 5.15 - ANÁLISE DE CONCORDÂNCIA DOS MAPEAMENTOS PRÉ-EXISTENTES .....	125
FIGURA 5.16 - COMPARAÇÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA COM OS MAPEAMENTOS 01 E 02 .....	126
FIGURA 5.17 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES DE CAMBISSOLOS DOS MAPAS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA .....	129
FIGURA 5.18 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES DE LATOSSOLOS DOS MAPAS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA .....	130
FIGURA 5.19 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES O+G DOS MAPAS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA.....	130

FIGURA 5.20 - COMPARAÇÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA COM OS MAPEAMENTOS 01 E 02 .....	132
FIGURA 5.21 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES DE CAMBISSOLOS DOS MAPEAMENTOS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA .....	134
FIGURA 5.22 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES DE LATOSSOLOS DOS MAPEAMENTOS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA .....	134
FIGURA 5.23 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES DE O+G DOS MAPEAMENTOS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA .....	135
FIGURA 5.24 - COMPARAÇÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA COM AS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA .....	137
FIGURA 5.25 – QUALIDADE E EXATIDÃO ENTRE OS MAPAS PRELIMINARES E PRÉ-EXISTENTES .....	138

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 5.1 – DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE DE CAMPO .....	103
--	-----

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - MATRIZ DE TABULAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS DECLIVIDADE x ICTS	58
TABELA 3.2 - MATRIZ DE TABULAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS ICMF x IU .....	59
TABELA 3.3 - MATRIZ DE TABULAÇÃO PARA OBTENÇÃO DAS UNIDADES GEOMÓRFICAS .....	59
TABELA 3.4 – EXEMPLO DAS AMOSTRAS DE DADOS COLETADAS NO TREINAMENTO E VERIFICAÇÃO DA RNA COM OS VALORES DAS VARIÁVEIS .....	61
TABELA 3.5 - EXEMPLO DE MATRIZ DE ERROS COMPARANDO CLASSES DE SOLOS PREDITAS PELA RNA E O MAPEAMENTO CONVENCIONAL 01 .....	68
TABELA 3.6 – EXEMPLO DOS PARÂMETROS AVALIADOS NA COMPARAÇÃO ENTRE OS MAPAS DE REFERÊNCIA E CLASSIFICADOS .....	69
TABELA 4.1 – CONVERSÃO DE CLASSES DO MAPEAMENTO 01 E SUA DISTRIBUIÇÃO .....	71
TABELA 4.2 – DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SOLO DO MAPEAMENTO 02 .....	72
TABELA 4.3 – RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E HIPSOMETRIA .....	74
TABELA 4.4 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E DECLIVIDADE .....	79
TABELA 4.5 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E PERFIL DE CURVATURA .....	83
TABELA 4.6 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E PLANO DE CURVATURA .....	86
TABELA 4.7 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E ICMF .....	89
TABELA 4.8 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E ÍNDICE DE UMIDADE .....	92
TABELA 4.9 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E ICTS .....	95
TABELA 5.1 – MATRIZ DE SIGNIFICÂNCIA DOS CONJUNTOS AVALIADOS .....	111
TABELA 5.2 – QUALIDADE DE CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O ÍNDICE KAPPA .....	113
TABELA 5.3 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 1 .....	124
TABELA 5.4 - AVALIAÇÃO ENTRE O AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLO OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA COM OS MAPEAMENTOS 01 E 02 .....	126
TABELA 5.5 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 2 .....	127
TABELA 5.6 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 3 .....	128
TABELA 5.7 – ERROS DE INCLUSÃO E OMISSÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA E AS CLASSES DOS MAPEAMENTO 1 E 2 .....	129
TABELA 5.8 - AVALIAÇÃO ENTRE O AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLO CLASSIFICADAS POR RNA COM OS MAPEAMENTOS 01 E 02 .....	131
TABELA 5.9 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 4 .....	132
TABELA 5.10 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 5 .....	133
TABELA 5.11 – ERROS DE INCLUSÃO E OMISSÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA E AS CLASSES DOS MAPAS PRÉ-EXISTENTES .....	133
TABELA 5.12 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 6 .....	136

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

$A_c$  – Área de Contribuição ou Área Específica;  
COMEC - Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba;  
EG - Exatidão Global;  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;  
EMQ – Erro Médio Quadrático;  
EP – Exatidão do ponto de vista do produtor;  
EU – Exatidão do ponto de vista do usuário;  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;  
ICTS – Índice capacidade de transporte de sedimentos;  
ICMF – Índice de corrente de máximo fluxo;  
IU – Índice de umidade;  
m – metros;  
MAXVER – Classificador de Máxima Verossimilhança;  
MDE – Modelos Digitais de Elevação;  
MDT – Modelos Digitais do Terreno;  
RNA – Redes Neurais Artificiais;  
SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos;  
SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos;  
SIG – Sistema de Informações Geográficas;  
SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental;  
TIN – Grade numérica triangular (*Triangular Irregular Network*);  
TC – tabulação cruzada;  
UTM – Universal Transversal de Mercator;  
 $\lambda$  – resolução espacial do pixel;  
Z – Elevação (em metros);  
 $\alpha$  – Declividade (em porcentagem);  
 $\beta$  – Declividade (em graus);  
 $\varphi$  – Perfil de curvatura;  
 $\psi$  – Plano de curvatura;  
 $w$  – Índice de umidade;  
 $\tau$  – Índice capacidade de transporte de sedimentos;  
 $\Omega$  – Índice de corrente de máximo fluxo.

## RESUMO

A topografia apresenta estreita relação com os solos em escala local, por isso é possível inferir a distribuição de unidades de solos a partir da análise digital do relevo. Técnicas de geoprocessamento possibilitam a representação paramétrica do relevo a partir de um Modelo Digital do Terreno, do qual são calculados atributos topográficos primários e secundários. Com o objetivo de delimitar unidades preliminares de mapeamento de solos, que auxiliem nos levantamentos pedológicos na bacia do arroio do Corvo/PR, foram utilizados sete atributos topográficos: hipsometria, perfil e plano de curvatura, declividade, índices de corrente de máximo fluxo, umidade e de capacidade de transporte de sedimentos. A discretização das classes desses atributos e sua análise com mapas pré-existentes na área de estudo, possibilitou compreender as relações entre variáveis do relevo e classes de solos presentes. Os quatro últimos apresentaram melhor relação com as unidades de mapeamento de solos pré-existentes, por isso, foram selecionadas para serem sobrepostas com aplicações de SIG por método de Tabulação Cruzada (TC), que resultou na identificação de unidades preliminares de solos. Outra forma de classificação foi realizada pela integração em Rede Neural Artificial (RNA), que resultou num segundo mapa preliminar de solos. A arquitetura da RNA é *perceptron* multicamadas com algoritmo de retropropagação de erros (*backpropagation*). Na camada de entrada foram utilizadas oito variáveis, os atributos topográficos e a geologia; duas camadas escondidas, a primeira com 130 neurônios e segunda com 43; e na camada de saída três neurônios. O aprendizado se deu a partir de 75 amostras de treinamento e 25 de verificação para cada classe de saída. Testes de validação cruzada na RNA mostraram que a retirada de qualquer uma das variáveis do conjunto resultou em pior qualidade de classificação. Para validação dos dois mapas preliminares resultantes de TC e RNA, foram analisadas 53 amostras de campo e conferência *in loco*. Os mapas preditos foram também comparados com um mapa convencional na área de estudo, dos quais foram analisados parâmetros que indicaram a qualidade dos mapas: coeficiente Kappa (K), Exatidão Global (EG), Matriz de Erro, exatidão do ponto de vista do produtor e usuário. O mapa classificado por RNA concorda em 77% de área com o método TC (K=0,65), o primeiro apresentou melhores resultados de mapeamento do que o segundo, pois os limites se mostraram mais precisos e as discordâncias com os mapas preliminares foram menores. As unidades de solos preditas pela RNA mostraram melhor resultado comparativo ao mapa convencional 1 (K=0,56 e EG=0,72) e as obtidas por TC melhor resultado com mapa pré-existente 2 (K=0,43 e EG=0,69). A comparação entre as unidades preditivas e mapas convencionais mostrou, em alguns casos, melhor concordância com as classes do que a comparação feita entre eles em nível de ordem. Portanto, obtiveram-se resultados satisfatórios, que confirmam a hipótese de que a partir da aplicação de modelos quantitativos de interpretação do relevo podem ser classificadas unidades preliminares de mapeamento de solos, por meio de aplicações simples de TC e complexas de RNA.

Palavras-chave: hipsometria; declividade; perfil de curvatura; plano de curvatura; índice de umidade; índice de corrente de máximo fluxo; índice de capacidade de transporte de sedimentos

## ABSTRACT

Topography shows a direct relationship with soils at local level, so it is possible to infer the distribution of soil units from the digital analysis of relief. Geoprocessing methods allow the parametric representation of relief from a Digital Terrain Model, from which primary and secondary topographic attributes are computed. Seven topographic attributes were used to define the primary units in soil mapping in order to help the soil surveys, in detail level, at the Corvo stream's basin, State of Paraná: elevation, profile and plan curvatures, slope, stream power index, wetness index and the sediment transport index. Making these attribute classes discrete and the further analysis with pre-existing maps from the study area allowed us to understand the relationships between relief variables and the soil classes present. The last four had a better relationship with the mapping units of pre-existing soils, so they were selected to be overlaid with GIS applications by means of the Cross-Tabulation method (CT), which resulted in the identification of soil preliminary units. Another form of classification was performed by integration in an Artificial Neural Network (ANN), which resulted in a second soil preliminary map. The ANN architecture is a multilayer perceptron with an error backpropagation algorithm. In the input layer were used eight variables, the topographic attributes and the geology, two hidden layers, the first one with 130 neurons and the second with 43, and three neurons in the output layer. Learning took place from 75 training and 25 checking samples for each output class. Cross-validation tests in the ANN showed that removing any of the variables from the set resulted in poorer classification quality. To validate the two preliminary maps derived from the CT and the ANN were analyzed fifty-three field samples, and checking *in loco*. The predicted maps were also compared to a conventional map of the study area, from which parameters were analyzed to show the quality of the maps: Kappa coefficient (K), Global Accuracy (GA), Error Matrix and accuracy from the producer's and the user's standpoints. The map classified with the ANN agrees in 77% of the area with the CT method ( $K = 0.65$ ), the first one showed better mapping results than the second, since the boundaries were more accurate and inconsistencies with the preliminary maps were smaller. The soil units predicted by the ANN showed better comparative results to conventional map 1 ( $K = 0.56$  and  $GA = 0.72$ ) and those obtained by CT showed better results with pre-existing map 2 ( $K = 0.43$  and  $GA = 0.69$ ). The comparison between the predictive units and the conventional maps showed, in some cases, better agreement with the classes than the comparison made between them in order level. Therefore, satisfactory results were obtained, confirming the hypothesis that from the application of quantitative models for the interpretation of relief soil mapping preliminary units can be classified with simple CT and complex ANN applications.

Key-words: elevation; slope; profile curvature; plan curvature; wetness index; stream power index; sediment transport index

## 1. INTRODUÇÃO

O reconhecimento, a compreensão e a delineamento das múltiplas variáveis que compõe o meio físico-natural são de grande importância para alicerçar ações de planejamento e gestão ambiental e territorial. Uma dessas variáveis são os mapeamentos de solos, pois auxiliam em todos os âmbitos na ocupação e uso da terra.

No Brasil sua execução é uma demanda permanente na busca de disponibilizar informações para o planejamento da ocupação racional das terras e para a gestão ambiental, conciliando desenvolvimento econômico e social, com a conservação e proteção dos recursos naturais. Embora exista essa enorme demanda, são várias as limitações para a aquisição dessas informações, destacando-se o elevado custo dos levantamentos, a extensão das áreas a serem mapeadas no país e a dificuldade de acesso em alguns lugares. Somam-se ainda os problemas de precisão da informação, confiabilidade das interpretações qualitativas e dificuldade de extrapolação da informação para outras áreas (MENDONÇA-SANTOS e SANTOS, 2003).

De acordo com Santos (2007) a cobertura completa de solos existente no país encontra-se disponível em níveis exploratórios e esquemáticos (escalas 1:1.000.000 à 1:5.000.000) e apenas 35% de todo território nacional é coberto por mapas de solos em escalas médias e pequenas (1:100.000 à 1:600.000).

Atualmente um conjunto de novos métodos tem sido utilizado no intuito de contribuir com a cartografia pedológica, oferecendo ferramentas de apoio aos mapeamentos de solos em escalas maiores, para auxiliarem na determinação de limites e unidades com melhor detalhamento. Para tanto, faz-se necessário a integração dos estudos dos solos com outros ramos do conhecimento, principalmente, dos relacionados às Ciências da Terra, em destaque a geomorfologia e a hidrologia, cuja primeira refere-se à morfogênese e morfografia, a segunda se refere aos fluxos superficiais e subsuperficiais (VIDAL-TORRADO *et al.*, 2005).

Apesar de consagrado por Dokuchaev, desde os primórdios da Ciência do Solo, que os solos resultam da interação entre os cinco fatores: clima, organismos, relevo, material de origem e tempo, pressupõe-se que em escala local, quando as demais variáveis são semelhantes, o relevo condiciona a ocorrência dos solos, que são influenciados pela dinâmica do fluxo da água, energia e processos de redistribuição de material nas vertentes, controlando sobremaneira sua distribuição (McKENZIE e RYAN, 1999).

A integração da geomorfologia, hidrologia e geologia, possibilita a compreensão dos atributos dos solos e sua distribuição na paisagem, visando proporcionar elementos de predição de sua ocorrência (BIRKELAND, 1984). Assim o relevo mostra-se diretamente relacionado com os processos de formação do solo e possui grande potencial para ser utilizado em trabalhos de levantamento (KLINGEBIEL *et al.*, 1987), em escalas de detalhe e semidetalhe. É uma importante ferramenta de suporte na identificação e mapeamento das unidades de solos homogêneos, considerando que as formas do relevo exercem papel decisivo no tempo de exposição dos materiais, na intensidade e direção do fluxo da água no perfil solo, e que regulam as variações nos processos pedogenéticos (CAMPOS *et al.*, 2006).

Compreende-se que a partir da morfologia do relevo é possível fazer inferências sobre a ocorrência das unidades de solo, uma vez que os demais fatores condicionantes podem ser considerados homogêneos na escala de abordagem adotada. Por isso, esses modelos expressam a topografia como instrumento auxiliar na identificação de solos, contribuindo na compreensão das relações relevo-solo e oferece potencial para predição de unidades de mapeamento.

O uso de modelos digitais do relevo na compreensão e identificação da distribuição dos solos, formulados com base em Modelos Digitais do Terreno (MDT), contribui como importante ferramenta para delimitar unidades preliminares de mapeamento dos solos, utilizadas no suporte aos trabalhos de levantamentos de solos na fase de campo e 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-se a redução da subjetividade nessa tarefa (NANNI e ROCHA, 1997).

A modelagem quantitativa e digital dos solos é designada de Pedometria (HENGL, 2003). Esses modelos estão sendo combinados com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e técnicas de inteligência artificial, as Redes Neurais Artificiais (RNA), e árvores de decisão (MENDONÇA-SANTOS e SANTOS, 2003), no intuito de descrever, classificar e estudar os padrões de variação espacial dos solos.

A modelagem digital do relevo é uma das técnicas quantitativas melhor desenvolvidas para prever atributos e classes de solos (McKENZIE *et al.*, 2000). Ela se utiliza da parametrização do relevo (WOOD, 1996), onde são obtidos atributos topográficos de um MDT, cujas primeiras derivadas são os atributos primários e de segunda derivada os secundários (MOORE *et al.*, 1993; WILSON e GALLANT, 2000).

Métodos que definem unidades homogêneas, de acordo com modelos morfológicos do relevo, calculados a partir de MDT, mostram potencial para melhorar a predição de ocorrência dos tipos de solos, visto que sua posição na paisagem influencia os processos pedogenéticos. Assim, a aplicação de atributos topográficos é válida na distinção de classes pedológicas. Desse modo, metodologias para predição de unidades de solos derivadas desses padrões são eficientes e tornam os levantamentos pedológicos com limites precisos, mais rápidos e com menores custos (HERMUCHE *et al.*, 2002).

Pode-se hipotetizar então, que a distribuição espacial dos atributos topográficos que caracterizam a morfologia do relevo influenciam na distribuição dos solos, por consequência, as aplicações desses atributos paramétricos em modelos preditivos de solo auxiliam na classificação de unidades preliminares de mapeamento.

O principal mérito da análise digital do terreno é a maior eficiência obtida no trabalho de campo após a realização da classificação digital preliminar, apoiada num modelo de ocorrência de solos previamente conhecido (IPPOLITI *et al.*, 2005). A metodologia de mapeamento digital melhora os mapeamentos de solos, resultando em mapas mais objetivos e detalhados (HENGL, 2003). Portanto, o objetivo geral do trabalho é delimitar unidades preliminares de mapeamento de solo a partir de atributos topográficos primários e secundários, integrados com operações de tabulação cruzada e classificação por Redes Neurais Artificiais, apoiando-se na tese de que a análise digital do relevo oferece suporte ao mapeamento de solos por meio de modelos quantitativos de interpretação.

Para tanto, os objetivos específicos a serem atendidos na pesquisa são:

- Gerar atributos topográficos primários: hipsometria, declividade, perfil e plano de curvatura e secundários: índice de corrente de máximo fluxo, índice de umidade e índice de capacidade de transporte de sedimentos;
- Avaliar as relações de distribuição espacial entre as classes discretizadas dos atributos topográficos com mapas de solos pré-existente;
- Levantar amostras de campo para conferência de dados;
- Desenvolver procedimentos em SIG para integrar atributos topográficos, por meio de tabulação cruzada, para obter unidades preliminares de solos
- Sistematizar a arquitetura de uma RNA para classificar unidades preliminares de mapeamento de solos, com variáveis de atributos topográficos e geologia;
- Comparar os mapas preliminares de solos com mapas convencionais pré-existentes.

A área de estudo do presente trabalho, designada bacia hidrografia do arroio do Corvo, foi selecionada por apresentar base cartográfica adequada aos objetivos da pesquisa, com mapas topográficos na escala 1:10.000, além de possuir dois mapeamentos convencionais de solos, nas escalas 1:10.000 e 1:35.000, que servem de comparação para validar as unidades preliminares de solos mapeadas. Associado a isso, grande parte da área da bacia é abrangida pela Fazenda Experimental Canguiri, da UFPR, fato considerado importante por dispor de livre acesso às atividades de campo da pesquisa e facilitando a coleta de amostras.

A bacia do arroio do Corvo localiza-se no município de Pinhais, estado do Paraná, possui área de 447,3 ha, é afluente do rio Canguiri, pertencentes à bacia hidrográfica do Iraí (Figura 1.1).

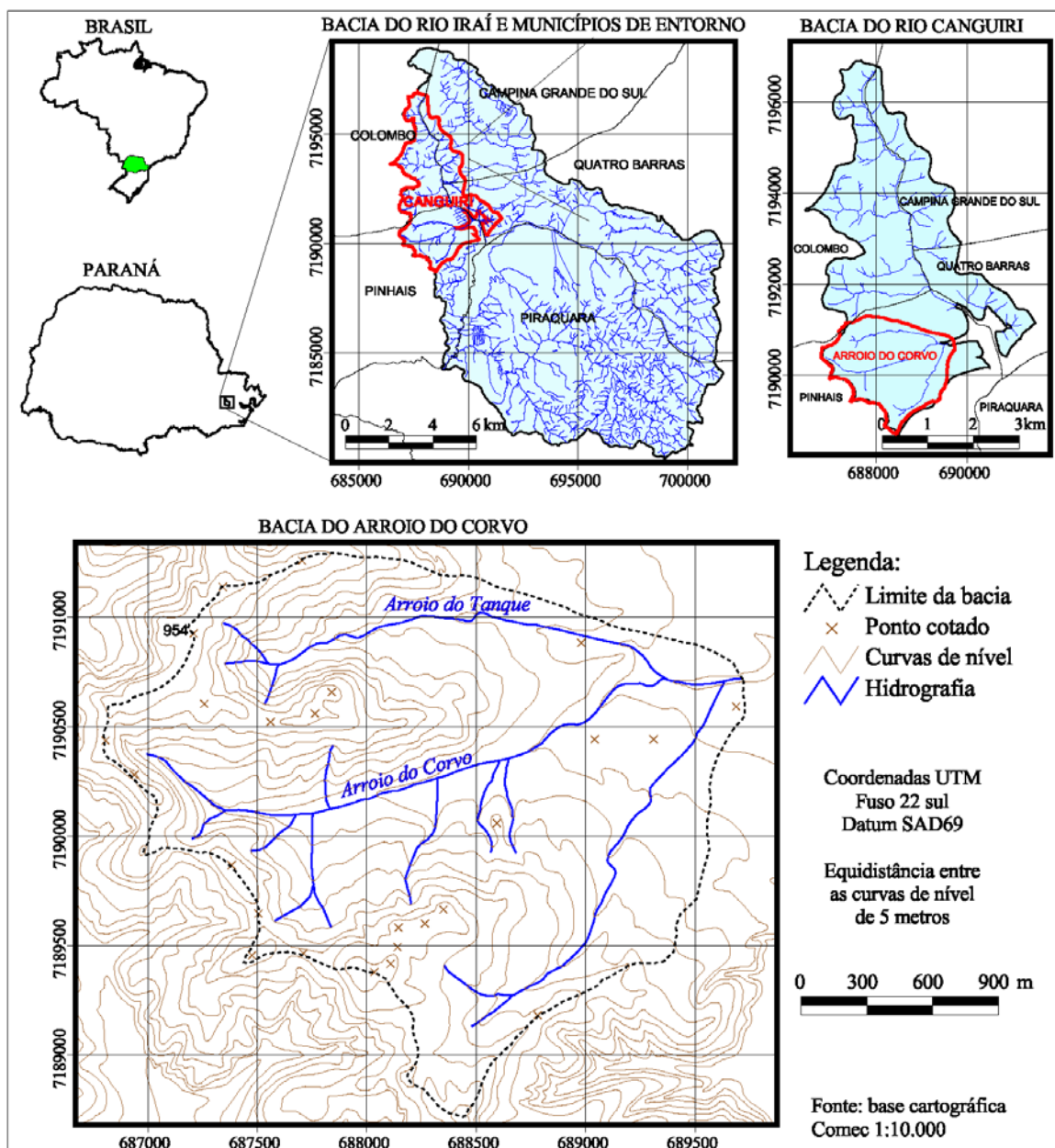


FIGURA 1.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Está situada sobre a bacia sedimentar de Curitiba, em maior parte sobre a Formação Guabirota e em áreas restritas de planícies sobre Sedimentos Holocênicos. A Formação Guabirota foi depositada após sucessivas fases erosivas que desenvolveram a superfície do Alto Iguaçu, seguida por uma fase erosiva de clima úmido que dissecou esta superfície. Posteriormente, iniciou-se a deposição em ambiente semiárido, com chuvas torrenciais formando depósitos tipo *playa-lake*, constituídos por argilitos, arcósios, depósitos rudáceos e margas, com espessura variando de 10 a 80 m, sendo maior na região central (MINEROPAR, 2001). Esses depósitos assentam-se discordantemente sobre o embasamento, sendo compostos predominantemente por depósitos argilosos e sílticos esverdeados que gradam para termos mais grossos de forma interdigitada ou abrupta, dependendo das características estratigráficas e estruturais locais, com intercalações de areias arcósias e, mais raramente, de cascalheiras com predominância de seixos de quartzo (SALAMUNI, *et al.*, 1999).

Os Sedimentos Holocênicos são oriundos de erosão e deposição das litologias mais antigas intemperizadas. O processo formador é hidráulico-deposicional, condicionado às calhas de drenagem dos rios e planícies de inundação. A formação destes depósitos continua ocorrendo devido ao avanço do intemperismo, erosão e retrabalhamento dos sedimentos (MINEROPAR, 2001).

De acordo com a classificação climática de Köppen prevalece na região o tipo Cfb, que se caracteriza como quase sempre úmido, com características pluviais de clima quente-temperado. No mês mais quente podem ser registradas temperaturas médias inferiores a 22° C e o restante do ano com médias maiores que 10° C. Possui uma precipitação regular ao longo do ano, formação de geadas durante o inverno, raramente neva e pouco se percebe uma estação tipicamente seca (MAACK, 1981).

Sob a perspectiva da geomorfologia, a bacia do rio do Corvo está inserida no Primeiro Planalto Paranaense, predominando na subunidade morfoescultural Planalto de Curitiba, segundo mapa geomorfológico do estado do Paraná, escala 1:250.000 (SANTOS *et al.*, 2006). Esse compartimento geomorfológico possui dissecação moderada composta por topos alongados e aplainados, vertentes convexas e formas de relevo predominantemente onduladas a suave onduladas. Secundariamente, na porção final do terço inferior da bacia, em áreas planas, ocorre a subunidade morfoescultural denominada de Planícies Fluviais sobre Sedimentos Inconsolidados do período Quaternário, cujos limites estão sobre planícies dos principais rios.

Segundo os dados altimétricos das cartas topográficas da COMEC (1976), a bacia possui altitude mínima de 884 e máxima de 954 metros acima do nível do mar, com amplitude de 70 m. Apresenta vertentes predominantemente suaves onduladas, bem como, pequenas variações locais para um relevo ondulado na porção noroeste e sudoeste, onde o trabalho de dissecação, produzido por cursos fluviais menores, resultou na conformação de pequenas ombreiras, com topos e interflúvios aplanados suavemente ondulados, relictos de antigas superfícies, intercalados por vales de fundo em “U” amplo, envolto por uma planície fluvial. O canal principal do arroio do corvo mostra-se controlado por lineamentos estruturais, que resulta em vale assimétrico, com maior declividade na margem esquerda. A calha do arroio do Tanque, situado ao norte, demonstra-se mais entalhado, com vertentes mais curtas.

A vegetação original na região da bacia era constituída pelo domínio da Floresta Ombrófila Mista associada aos campos (SEMA, 2002), porém, atualmente, foi suprimida na maior parte e o relicto existente foi muito alterado em função da ocupação e da conseqüente mudança de cobertura do solo. Assim, pode ser verificado nas fotografias aéreas que recobrem a área (Figura 1.2), que as áreas com vegetação estão restritas a pequenos núcleos isolados ao longo dos rios, cujos principais usos são: pastagens, cultivo agrícola e silvicultura.

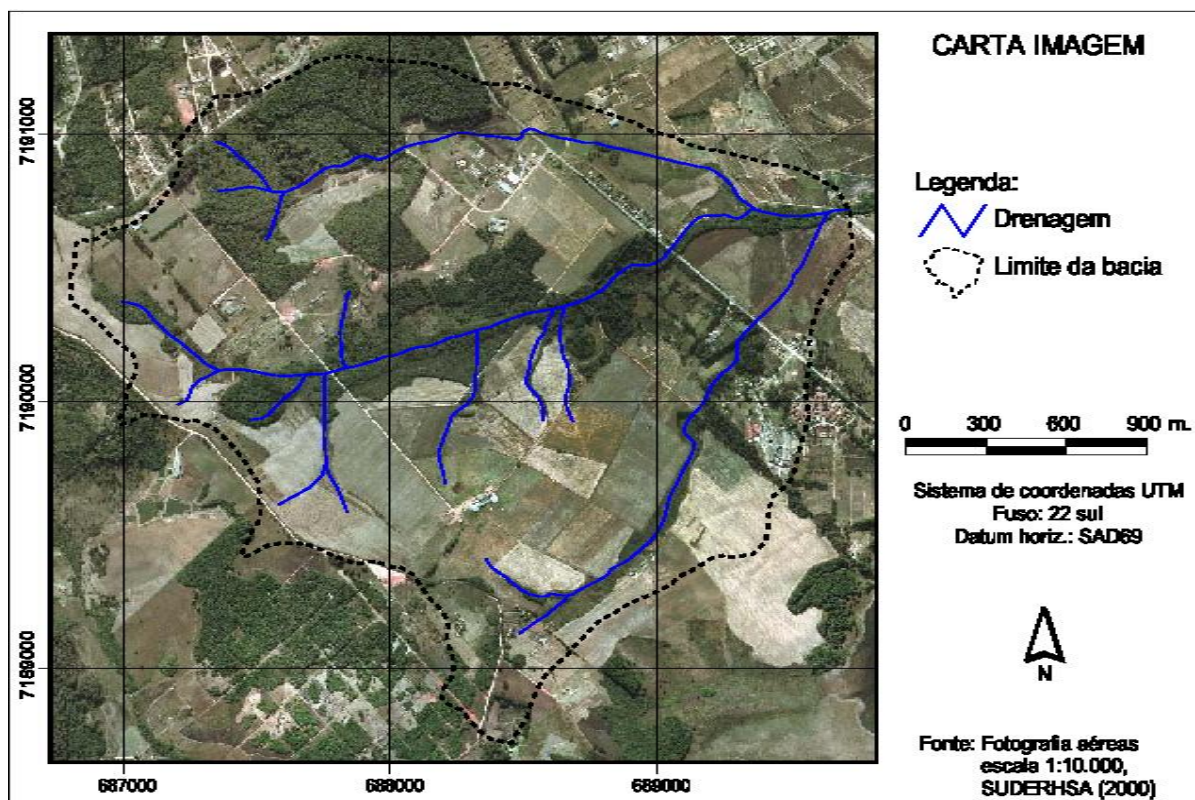


FIGURA 1.2 – MOSAICO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS DA ÁREA DE ESTUDO  
FONTE: SUDERHSA (2000)

O conteúdo do presente trabalho está organizado em sete capítulos, incluindo o introdutório associado à localização e caracterização da área de estudo. O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura focando-se na fundamentação teórica e metodológica, que contempla os principais aspectos e conceitos abordados na pesquisa, além de discorrer sobre um conjunto de bibliografias que se aproximam da temática tratada. Nele são discutidos os modelos de paisagem solo-relevo e suas aplicações, modelos preditivos de solos apoiado em geoprocessamento com estudos de caso, conceituação de atributos topográficos e RNA.

O terceiro capítulo descreve o método, os materiais utilizados, os procedimentos desenvolvidos e o conjunto de técnicas aplicadas, contemplando a obtenção dos atributos topográficos, discretização de classes, delimitação de unidades preliminares de solos por método de tabulação cruzada e por Rede Neural Artificial, arquitetura e parâmetros definidos para a rede e métodos de comparação de resultados para validação dos mapas.

O quarto capítulo discute as relações existentes entre as unidades de solos de dois mapas convencionais pré-existentes, que recobre a área da bacia, com as classes discretizadas dos atributos topográficos primários e secundários. O quinto capítulo apresenta e discute as unidades preliminares de solos mapeadas por tabulação cruzada e por RNA, também faz a validação dos mapas preditos com de amostras de campo e os mapas pré-existentes. Por fim, no sexto capítulos são apresentadas as conclusões sobre o trabalho e no último capítulo estão apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA

O presente capítulo apresenta o arcabouço literário do tema abordado e está organizado em quatro partes. A primeira discorre sobre a importância da compreensão das relações solo-relevo e demonstra os principais modelos de paisagem que se propõem estudar e entender tais relações. O segundo faz uma revisão e aborda um conjunto de trabalhos que fazem aplicações dos modelos de paisagem, demonstrando a estreita relação entre solo-relevo. O terceiro expõe de forma resumida os novos métodos e técnicas de mapeamento digital de solos para predição de unidades preliminares de mapeamento de solos (pedoformas) e a distribuição de seus atributos, associados a modelos de paisagem interpretados de variáveis geomorfométricas, obtidas de Modelos Digitais do Terreno (MDTs). Por fim, o quarto apresenta os atributos topográficos utilizados nos estudos de solo-relevo e discorre sobre seus conceitos e concepção.

### 2.1. MODELOS DE PAISAGEM SOLOS-RELEVO

Em escala regional, os padrões de clima, vegetação e material originário são comumente usados para prognóstico de unidades de solos nas áreas de grande abrangência, em níveis bastante elevados de abstração e generalização, enquanto os padrões locais de topografia, material de origem, tempo e suas relações com a cobertura vegetal e com os microclimas, podem ser usados no prognóstico de classes de solos em pequenas áreas (MENDONÇA-SANTOS e SANTOS, 2003).

Assim, a abordagem solo-relevo em escala local privilegia as variáveis de topografia e material de origem, dentre o conjunto de componentes que influenciam na formação dos solos, preconizados por Dokuchaev desde os primórdios da Ciência do Solo, em Queiroz Neto (2000), que são a interação de cinco fatores: clima, organismos, relevo, material de origem e tempo, cujos quatro primeiros atuam em função do último fator, elencados na equação preconizada por Jenny (1941),  $S = f(Cl.O.R.P.T)$ .

A partir da década de 1930 começaram a ser percebidas relações mais estreitas de dependência entre os solos e sua posição no relevo, onde ocorreria inicialmente uma ação diferenciada da água sobre características do solo. Nessas condições a ação da água determinaria uma distribuição constante dos solos nas vertentes (QUEIROZ NETO, 2000). As formas do relevo receberam especial atenção após o surgimento do conceito de Catena por Milne (1935), que a partir de trabalhos com mapeamento de solos na África, observa a

sucessão repetitiva de solos nas vertentes, percebendo a relação entre os tipos de solos e formas de relevo. Essa compreensão destaca a influência do relevo sobre a drenagem, movimento vertical e horizontal da água, que provoca alterações nos atributos do solo e sua distribuição (BOCKHEIM *et al.*, 2005).

Portanto, as variações nas classes do solo ao longo de um perfil estão relacionadas com o conceito de Catena, que se refere a uma sequência de solos aproximadamente da mesma idade, derivados de material parental semelhante e que ocorre sob condições climáticas também semelhantes, mas que tem características diferentes relacionadas às variações do relevo. Assim, o conhecimento dos processos geomorfológicos passa a ser fundamental no entendimento da origem e desenvolvimento do sistema solo-paisagem (GERRARD, 1992).

Para Birkeland (1984) ainda há muito que entender sobre tais relações, justificando, com isso, um dos principais objetivos dos estudos que integram a geomorfologia, hidrologia e geologia, que é melhor compreender os atributos dos solos e sua distribuição na paisagem, visando proporcionar elementos de predição de sua ocorrência.

Verifica-se uma 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 da paisagem (CRIVELENTI, 2009).

Diversos modelos de paisagem se propõem a estudar e entender as relações solo-relevo. No entanto, destacam-se, dentre as principais formas de abordagens identificadas na literatura, três linhas que norteiam os trabalhos focados na relação solo-relevo: a) superfícies geomórficas, b) curvatura do terreno e c) segmento de vertente (CAMPOS *et al.*, 2006).

O modelo de paisagem solo-relevo que faz aplicação das superfícies geomórficas teve maior impulso a partir dos trabalhos de Ruhe (1956) e Daniels *et al.* (1971). Para Ruhe (1956), as superfícies geomórficas seguem os seguintes princípios: a) uma superfície é mais jovem do que qualquer outro material ou superfície que ela corta; b) uma superfície é mais velha, ou de mesma idade, que os depósitos do fundo de vale inferior; c) uma superfície é mais jovem do que as adjacentes situadas em posição superior, ou mais velha do que as situadas em posição inferior; d) uma superfície é mais velha ou de mesma idade aos depósitos situados sobre ela. Segundo Daniels *et al.* (1971), os processos de erosão e deposição de solos na paisagem estão ligados ao conceito de superfícies geomórficas, sendo deposicionais ou erosionais, ocorrendo ambas de modo adjacente. Para esse autor, os estudos das relações entre

solos, geologia e superfícies geomórficas são importantes para a compreensão da ocorrência dos solos na paisagem, permitindo a predição de sua distribuição.

Outro importante modelo de paisagem é baseado na curvatura do terreno, no qual são utilizadas equações adaptadas a mapas planialtimétricos detalhados (VIDAL-TORRADO *et al.*, 2005). Esse método considera a influência do relevo na hidrologia da vertente, avaliando suas formas e o comportamento dos solos segundo seu posicionamento.

Um dos primeiros estudos a considerar o modelo de curvatura na predição do solo foi realizado por Troeh (1965), que analisou dados de elevação de duas catenas para derivar a declividade e curvatura da vertente. Baseando-se na curvatura faz a classificação de quatro principais tipos de vertentes (Figura 2.1): as coletoras de água, com plano de curvatura convergente (quadrantes I e II) e as distribuidoras de água, com plano de curvatura divergente (quadrantes III e IV). Sob o aspecto do perfil de curvatura, as vertentes convexas são as que facilitam o desenvolvimento do rastejamento (quadrantes II e III) e as côncavas as que favorecem a lavagem pela água das chuvas (quadrantes I e IV).

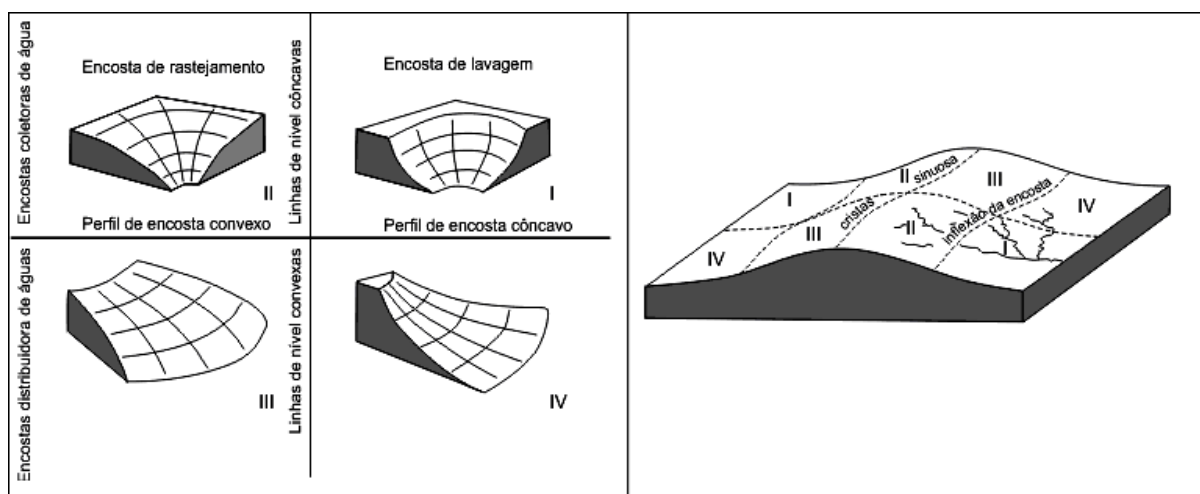


FIGURA 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DE QUATRO FORMAS DE VERTENTES SEGUNDO A CURVATURA  
FONTE: TROEH (1965)

Hugget (1975) estabelece a combinação de formas de vertentes combinando a curvatura vista em perfil e em plano; propõe nove padrões ideais para indicações das direções dos fluxos da água sobre as vertentes (Figura 2.2), cujas diferenças nos solos e na paisagem são resultantes, em parte, do movimento da água e sua distribuição nas vertentes.

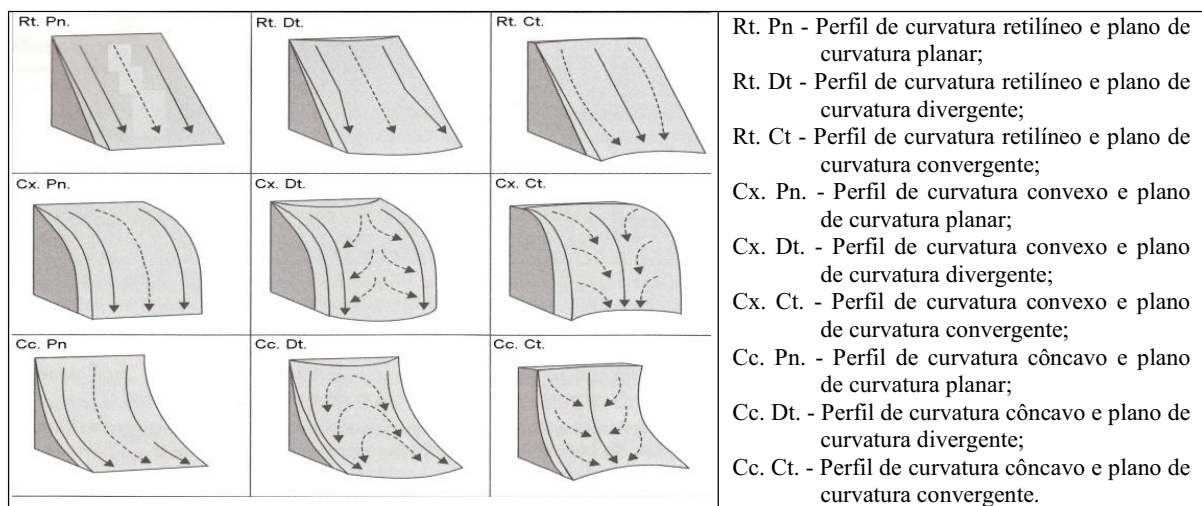


FIGURA 2.2 - FLUXO DA ÁGUA NO PLANO DE CURVATURA (SETAS PONTILHADAS) E FLUXO DA ÁGUA NO PERFIL DA CURVATURA DAS VERTENTES (SETAS CONTÍNUAS)  
FONTE: ADAPTADO DE HUGGET (1975)

Em ilustração de melhor detalhe que representa a curvatura da vertente com a combinação das formas em plano e perfil, a Figura 2.3 demonstra modelos didáticos que associam, de maneira resumida, às formas de vertentes a características de solos.

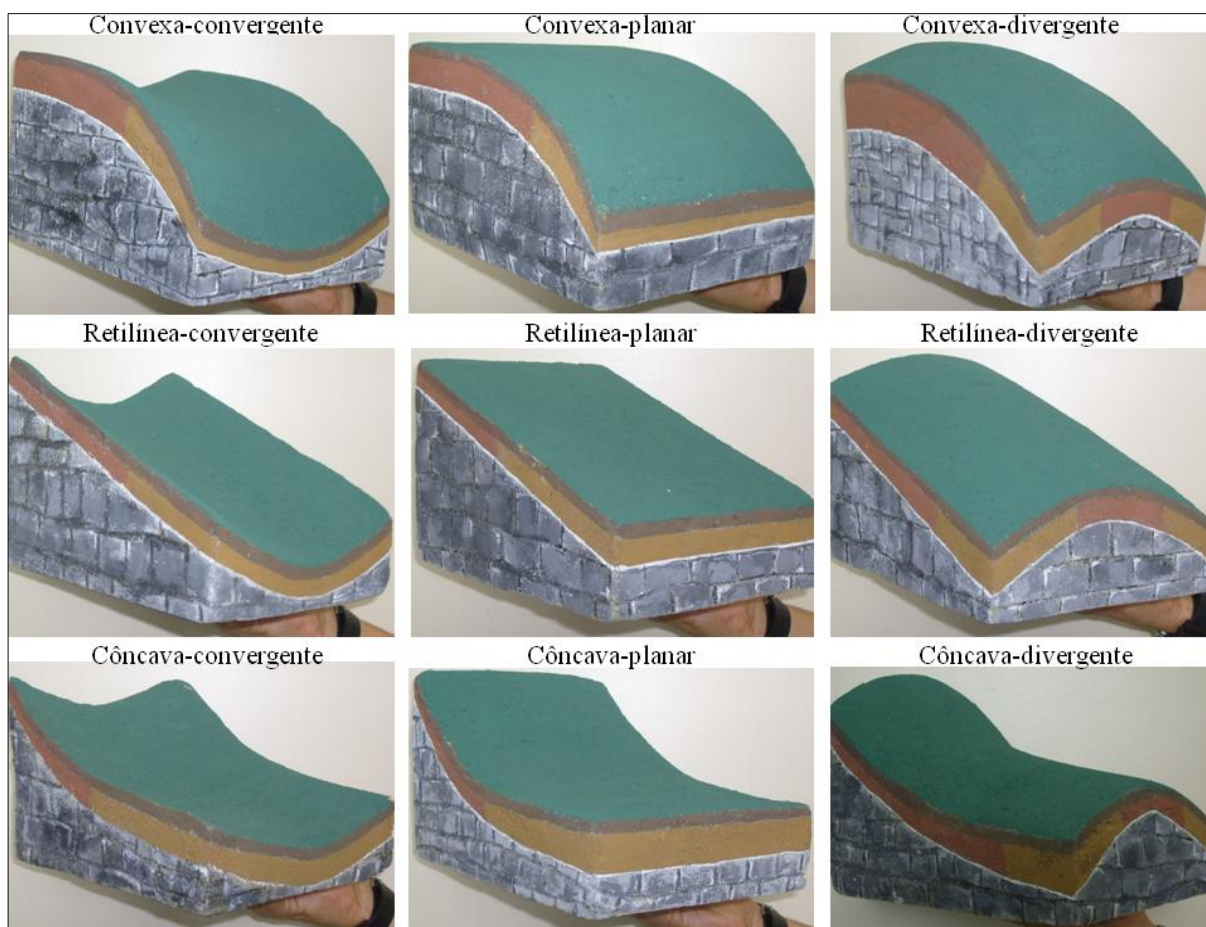


FIGURA 2.3 – MODELOS DIDÁTICOS ILUSTRATIVOS QUE REPRESENTAM AS FORMAS DAS VERTENTES EM PERFIL E PLANO DE CURVATURA  
FONTE: FOTOS DE MODELOS REDUZIDOS DA EMBRAPA APRESENTADOS POR CURCIO (2008)

diferenças nos solos e na paisagem são resultantes, em parte, do movimento da água e sua distribuição nas vertentes.

O terceiro modelo de paisagem referencia-se em segmentos (ou compartimentos) de vertentes, segundo nove unidades hipotéticas de vertentes apresentadas por Dalrymple *et al.* (1968), associadas a processos geomorfológicos dominantes (Figura 2.2), podendo as unidades estar ausente ou presente de forma repetida na catena.

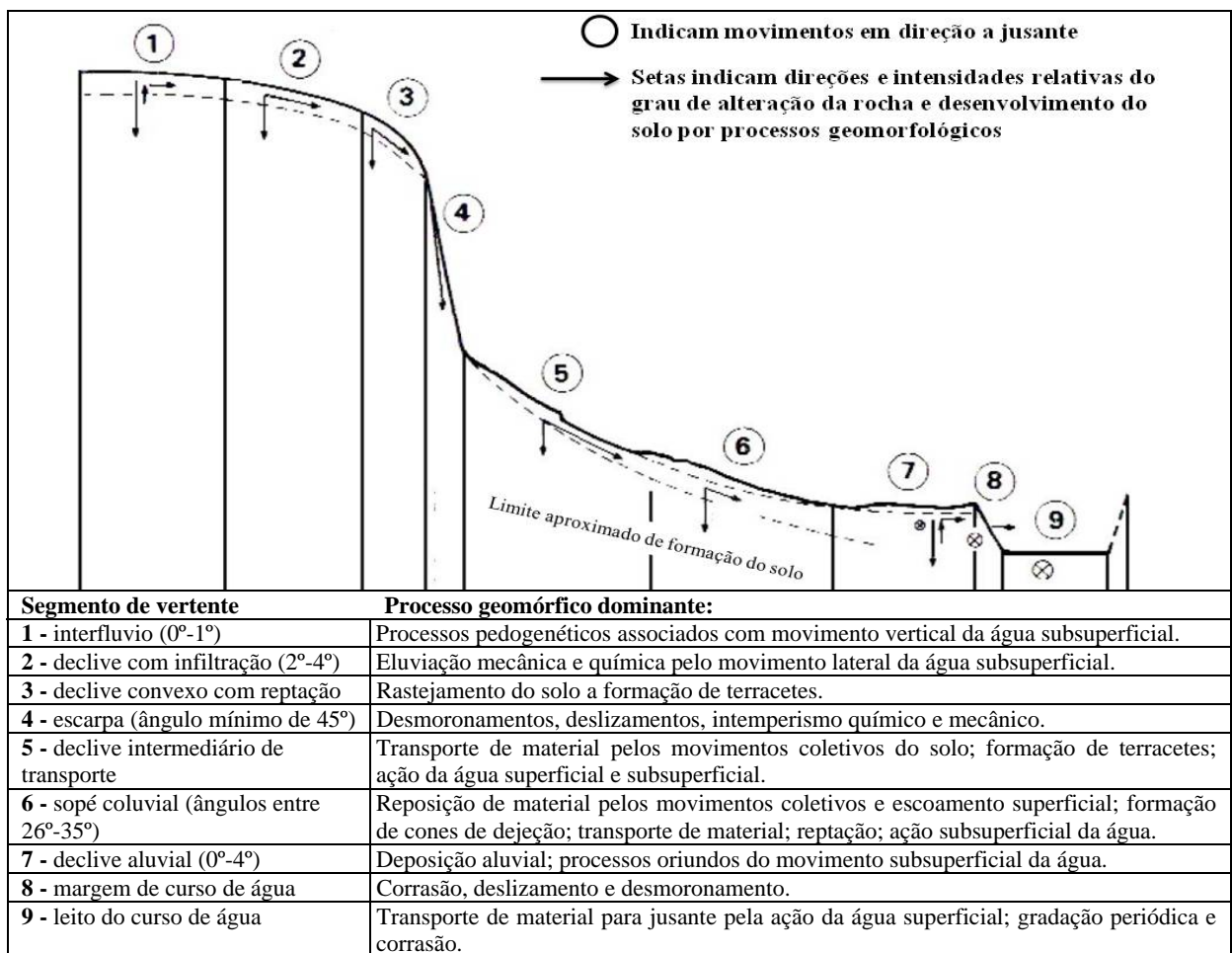


FIGURA 2.2 - NOVE UNIDADES HIPOTÉTICAS DO MODELO DE SEGMENTO DE VERTENTES

FONTE: adaptado de DALRYMPLE *et al.* (1968)

Características dos solos nas nove unidades dos segmentos de vertentes são apresentadas e discutidas por Vidal-Torrado *et al.* (2005): no segmento 1 o solo é profundo, com taxas de erosão mínima, onde predomina a pedogênese; no segmento 2 menos profundo, em relação ao primeiro, devido ao processo de eluviação pelo movimento lateral da água; o segmento 3 se caracteriza por sofrer mais erosão do que os demais, exceto quando comparado ao segmento 4, não permitindo acumulo de materiais na superfície; o segmento 4 apresenta solos rasos e/ou afloramento de rochas, representando uma escarpa, cuja formação se dá pela rocha

divide o sopé de transporte, representada pelo segmento 5; isso provoca o surgimento de uma zona de acumulação, sopé de deposição, no segmento 6 e nas planícies, representadas pelo segmento 7, predominam processos de deposição aluvial por contribuição do fluxo subsuperficial da água, onde ocorre também saturação hídrica, designados ambientes de hidromorfia.

O modelo segmentos de vertentes enfatiza as interações entre os materiais do solo e sua movimentação, transporte e redeposição pela água e gravidade, em superfície e subsuperfície do terreno, portanto, é considerado um modelo pedogeomórfico, pois relaciona processos geomórficos superficiais aos processos pedológicos subsuperficiais atuais (CAMPOS *et al.* 2006).

Os segmentos de vertente deste modelo de paisagem, segundo Daniels e Hammer (1992), afetam nas características dos solos em função da quantidade, fluxo e distribuição sazonal da água, que podem condicionar ambientes específicos, uma vez que interferem no movimento de bases e comportamento de argilas.

Outro exemplo de trabalho com maior detalhe no estudo das relações solo-relevo-hidrologia procede a compartimentação morfopedológica (VIDAL-TORRADO *et al.* (2005). Para Castro e Salomão (2000) compartimentos morfopedológicos são considerados produtos da interrelação entre substrato geológico, relevo e solos, constituem unidades têmporo-espaciais homogêneas e intrínsecas do meio físico, reconhecíveis em médias e grandes escalas.

Segundo Santos (2000), esta concepção utilizada nas pesquisas pedológicas surgiu inicialmente nos trabalhos desenvolvidos por pedólogos franceses que trabalharam no continente africano na década de 1970, onde passou a ser conhecida como Análise Estrutural da Cobertura Pedológica.

Posteriormente, no Brasil, trabalhos desenvolvidos por um grupo de pesquisadores brasileiros e franceses, principalmente no estado de São Paulo, demonstraram que a diferenciação lateral dos solos na paisagem depende também de mecanismos pedogenéticos próprios. Em 1987, durante o XXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo foram apresentados importantes trabalhos realizados na região Sudeste. Esses trabalhos demonstraram claramente que para se estudar a gênese e a evolução da cobertura pedológica é necessário observar em detalhe a sucessão vertical e lateral dos horizontes, seus limites e

principalmente suas transições, além de suas características morfológicas internas, na perspectiva de uma filiação genética entre horizontes (SANTOS, 2000).

## 2.2. APLICAÇÕES DE MODELOS DAS RELAÇÕES SOLO-RELEVO

Atualmente, diversos trabalhos partem das premissas desses modelos de paisagem, ou da combinação deles, para compreender a relação do solo com o relevo. Dentre eles Teramoto *et al.* (2001) avaliaram a relação solo, superfície geomórfica e substrato geológico (arenito e siltito), fazendo interrelações por meio de tabulação cruzada com base no conceito de homogeneidade das superfícies geomorfológicas em relação às unidades de mapeamento de solos e litologia. Apresentaram a tendência de que quanto mais velha e estável a superfície mais homogênea sua relação com os solos que nela incidem, portanto, a complexidade e variabilidade de solos mostram-se inversamente proporcional à idade das superfícies. Esses autores mencionam a relação encontrada entre substrato geológico e unidades de solos. Por fim, concluíram que a variabilidade dos atributos químicos e físicos dos solos na camada entre 60-80 cm é influenciada principalmente pela natureza química e física do substrato geológico, enquanto que os atributos morfológicos dos solos são determinados principalmente pelo relevo.

Cunha *et al.* (2005) relacionaram superfícies geomórficas com os atributos físicos, químicos e mineralógicos dos Latossolos nelas encontrados e testaram métodos geoestatísticos para localização de limites dessas superfícies, em um segmento de vertente com substrato de arenito em contato com basalto. Observaram que as três diferentes superfícies estão bem relacionadas com os atributos dos seus respectivos solos e que o método geoestatístico pode ser usado para ajudar a localizar os limites entre superfícies geomórficas. Mostraram que as variações dos solos se relacionam com idade, inclinação do terreno e litologia, afirmam que o trabalho geomórfico detalhado forneceu importantes informações para subsidiar os trabalhos de levantamento de solos e de pedogênese.

Com o objetivo de identificar as relações entre solo e superfícies geomórficas prevaletentes em uma área representativa de grande parte do Planalto Central Brasileiro, Motta *et al.* (2002) identificaram três superfícies a partir da compreensão da evolução da paisagem estudada. Concluíram que os solos da superfície geomórfica mais elevada possuem maior homogeneidade textural, com perfis muito argilosos, indicando independência do substrato rochoso e distribuição condicionada à variação do regime hídrico; na segunda

superfície as características dos solos indicaram a contribuição de sedimentos de cobertura terciária em mistura com material proveniente da decomposição das rochas subjacente; na terceira superfície, de dissecação mais recente, os solos apresentam características fortemente influenciadas pelo substrato geológico.

Ao estudar relações existentes entre a evolução de vertentes e gênese de solos, Passos (1987), demonstra relações entre grau de intemperismo dos solos, material de origem e superfícies geomorfológicas em uma área da bacia Sedimentar de Curitiba.

Em outra abordagem Silva *et al.* (2002) aplicaram um modelo visando entender a relação solo-paisagem no sul de Minas Gerais; os autores consideram a tectônica recente, que resulta no reescalonamento de superfícies por movimentos tectônicos durante o Quaternário. Afirmam que a distribuição dos solos na paisagem da área objeto de seu estudo é consequência conjunta da tectônica ressurgente e de alternâncias climáticas, que ativam o intemperismo e os fenômenos geomorfológicos.

A partir da compreensão de que muitas vezes a compartimentação do relevo com base unicamente no modelo das superfícies geomórficas é insuficiente para estudar a relação solos e geomorfologia, Marques Júnior e Lepsch (2000), utilizaram, associado às superfícies geomórficas, o modelo de segmento de vertentes, obtendo melhor detalhamento. Para esses autores essas ferramentas são muito úteis no mapeamento pedológico detalhado, em escala 1:25.000 ou maiores, também em estudos de pedogênese e conhecimento da variabilidade espacial, mesmo aplicados em unidades de mapeamento aparentemente homogêneas.

Campos *et al.* (2007) avaliaram a relação solo-paisagem, na qual verificaram similaridade entre os limites das superfícies geomórficas e segmentos de vertentes mapeados em campo, com intervalos identificados por meio de interpolação dos atributos do solo com técnicas de geoestatística. Concluíram que a compartimentação da paisagem em superfícies geomórficas e a identificação do material de origem resulta em eficiente apoio no entendimento da variação dos atributos do solo. O uso de técnicas de geoestatística permitiu a confirmação de que os atributos químicos e texturais apresentam limites próximos aos das superfícies geomórficas.

Ao focar as relações solo-relevo com ênfase no material de origem, em uma topossequência cujo substrato é de Arenito sobre Basalto, Coelho *et al.* (1994) investigaram a influência da rocha sobre os solos segundo sua posição em segmentos de vertente e analisaram atributos físicos, químicos e mineralógicos para estimar a influência da rocha na

formação dos solos em perfil topográfico. Os autores definiram três segmentos geomorfológicos distintos e concluíram que o material de origem, derivado da litologia, contribui na formação dos solos do transecto e que o grau de contribuição do Arenito ou Basalto, expresso nos atributos dos solos, varia segundo a posição do solo na vertente.

Vidal-Torrado e Lepsch (1999), com objetivo de compreender a relação material de origem, solos e problemas pedogenéticos, utilizaram o modelo segmento de vertente. Ao estudar a distribuição dos solos sobre um perfil topográfico definiram cinco segmentos (pedon): um localizado no topo P1, outro no ombro P2, dois na meia encosta P3 e P4 e outro no sopé P5. A partir de exame de campo e avaliação das características dos solos encontrados, concluíram que os Latossolos de textura muito argilosa dos segmentos P1 e P2 não são originados da rocha subjacente, mas de provável origem pedimentar; os Latossolos do P3, P4 e P5, resultam de retrabalhamento sucessivo de sedimento, cujo material é de origem alóctone ou pseudoalóctone; o material de origem do Podzólico Vermelho-Amarelo do terço superior da vertente é advindo de depósitos correlativos.

Por meio da análise dos solos, relevo e geologia, estudados num setor de uma bacia hidrográfica, Diniz *et al.* (2005) destacaram que o relevo, a forma das vertentes e a litologia exercem papel primordial para trabalhos de mapeamento pedológico e auxiliaram em seu estudo a avaliação da distribuição dos solos. Utilizaram o modelo de segmento de vertentes associado à curvatura e à superposição de mapas para combinar as variáveis estudadas.

Montanari *et al.* (2005) analisaram as formas da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos. Ao comparar pedoformas côncava e linear os autores concluíram que a primeira apresenta maior variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em relação à segunda. Como método utilizaram a combinação de modelos de curvatura e segmento de vertente, associados a análise estatística dos atributos dos solos.

Nizeyimana e Bick (1992) avaliaram a relação solo-paisagem na região central de Rwanda, África. Utilizaram a análise das formas das vertentes em plano e perfil de curvatura, declividade e posição na paisagem. Foram verificadas que as formas côncavas situadas nas porções inferiores das vertentes, sopés de deposição, apresentaram maior variabilidade de densidade do solo, propiciam a acumulação de carbono orgânico, maior conteúdo areia e menor conteúdo de argila.

O comportamento físico e hídrico de um Latossolo é estudado por Souza *et al.* (2004) por meio de interpolação de informações amostrais. Os autores observaram que pequenas variações nas formas do relevo condicionam variabilidade diferenciada para atributos do solo

estudado. Por meio da análise da curvatura da vertente verificaram que foi maior a variabilidade espacial dos atributos físicos e hídricos do solo em áreas côncavas e convexas, enquanto que nas áreas de curvatura linear, com relevo mais homogêneo, os atributos apresentaram menor variabilidade. A explicação está associada a influência do fluxo da água e dependência espacial dos atributos físicos e hídricos do solo aos elementos do relevo (pedoformas).

Nas últimas décadas um crescente número de trabalhos vem sendo desenvolvido com base no modelo de curvatura das vertentes para compreender as relações solo-relevo, prever unidades de mapeamento de solos e correlacionar à distribuição dos atributos dos solos a morfologia do relevo. Nesses estudos são aplicadas equações a modelos numéricos do terreno que resultam num conjunto de atributos, ou variáveis topográficas, gerados a partir de curvas de nível ou por meio de sensores, os quais representam distintas unidades de paisagem. A aplicação desse modelo é facilitada e torna-se possível devido ao avanço no campo da informática que propicia seu desenvolvimento. Apesar da aplicação de novas técnicas para abordar as relações solo-relevo faz-se necessário o amadurecimento do método.

Nessa linha de trabalho um conjunto de autores vem desenvolvendo estudos de caso, demonstrando que levantamentos de solos podem ser melhorados por meio do emprego de atributos topográficos derivados de MDT, fornecendo um método para geração de mapas de melhor resolução. As aplicações desses atributos são potencialmente importantes, pois possibilitam a identificação das feições do relevo, segundo experiências apresentadas por: Klingebiel *et al.* (1987), Dikau (1989), Nizeyimana e Bick., (1992), Moore *et al.* (1993), Gessler *et al.* (1995), Hermuche *et al.* (2002), Ribeiro *et al.* (2002), Hermuche *et al.* (2003), Ippoliti *et al.* (2005), Carvalho Junior *et al.* (2006), Chagas (2006), Sirtoli (2008), Sirtoli *et al.* (2008a), Sirtoli *et al.* (2008b), Muñoz (2009) e Crivelenti (2009).

Portanto, o modelo de paisagem da curvatura do terreno vem tornando-se uma ferramenta de apoio ao mapeamento digital de solos (pedometria) cada vez mais requisitada graças às variáveis topográficas obtidas por meio de mapeamento digital do relevo derivadas dos MDTs, também designada geomorfometria (WOOD, 1996 e 2009).

### 2.3. MODELOS DE PREDIÇÃO DE SOLOS COM MAPEAMENTO DIGITAL

O uso de técnicas quantitativas para predição de solos vem sendo crescente nas últimas décadas. Isso se deve aos avanços dos computadores e capacidade de processamento, fato que

permite a aplicação de maneira mais rápida e acessível de métodos matemáticos e estatísticos existentes, os quais já vinham sendo empregados na Ciência do Solo nas últimas décadas (McBRATNEY *et al.*, 2000 e 2003).

O mapeamento digital dos solos tem experimentado um rápido desenvolvimento de métodos novos e econômicos, devido, principalmente à crescente disponibilidade de mapas auxiliares. Neste sentido, dois grupos principais têm tido um papel importante: a) as imagens de sensoriamento remoto orbital e b) os atributos do terreno derivados de modelos digitais de elevação (DOBOS *et al.*, 2000).

Destaca-se como foco da presente pesquisa a segunda abordagem, a qual associa para a compreensão das relações solo-relevo o uso de ferramentas de geoprocessamento integrando os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) às concepções de modelos de paisagem anteriormente discutidas.

Com o desenvolvimento de métodos de geoprocessamento e SIGs é possível a representação da superfície terrestre na forma de modelos digitais numéricos, denominado também de Modelos Digitais do Terreno (MDT), os quais possibilitam a análise topográfica de uma zona de interesse, assim como o cálculo automatizado de uma série de variáveis relacionadas (VIDAL-TORRADO *et al.*, 2005).

Para Burrough (1986) a variação do relevo pode ser modelada para fins de processamento digital como uma superfície contínua e uma forma de representar essa superfície variando continuamente é por meio do uso de isolinhas, como é feito geralmente em cartas topográficas. No entanto, as isolinhas não são particularmente adequadas para análises numéricas ou modelagem, assim, a variação contínua do relevo é representada digitalmente como um MDT.

A utilização de MDT's em geomorfologia permite o cálculo de variáveis associadas ao relevo com rapidez e precisão (GROHMANN *et al.*, 2008). Para muitos autores a modelagem digital do terreno é uma das mais importantes ferramentas de aplicações quantitativas para prever atributos e classes de solos (McKENZIE *et al.*, 2000).

Para entender a relação dos modelos de paisagem e suas influências na variabilidade dos atributos do solo, com vistas a sua aplicação em levantamentos pedológicos, faz-se necessário o uso de técnicas de geoprocessamento para construção de MDT e técnicas de geoestatísticas (CAMPOS *et al.*, 2006).

Um MDT é a representação espacial da superfície a partir de pontos que descrevem a elevação tridimensional da superfície por meio de uma grade de dados cujos intervalos podem ser regulares ou irregulares (MONTGOMERY, 2003). Para Câmara e Medeiros (1998) consiste na representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço, associados geralmente à altimetria.

As novas abordagens de modelagem quantitativa dos solos têm sido propostas no intuito de descrever, classificar e estudar os padrões de variação espacial dos solos na paisagem, por meio de modelos numéricos ou estatísticos das relações entre variáveis ambientais e o solo, os quais são aplicados a um banco de dados geográficos objetivando assim, melhorar o conhecimento de sua variabilidade espacial, precisão e qualidade da informação, por meio de diversas técnicas quantitativas, denominadas no conjunto de Pedometria (WEBSTER, 1984; WOOD, 1996; SCULL *et al.*, 2003; McBRATNEY *et al.*, 2000; MENDONÇA-SANTOS *et al.*, 2003; CHAGAS, 2006; CÁTEN *et al.*, 2009). A pedometria para Hengl (2003) se constitui na aplicação de métodos matemáticos e estatísticos para a modelagem quantitativa de solos, com a finalidade de analisar sua distribuição espacial e de suas propriedades

Os levantamentos de solos podem ser também melhorados por meio da utilização de atributos do terreno derivados de MDT, fornecendo um método para geração de mapas de alta resolução, os quais são potencialmente importantes, pois possibilitam a identificação de aspectos da superfície que são difíceis de serem notados na interpretação de fotografias aéreas tradicionais (MOORE *et al.*, 1993). Segundo McKenzie e Ryan (1999) a análise digital do terreno permite a geração de um conjunto de variáveis que refletem processos geomorfológicos, climáticos e hidrológicos. Portanto, os modelos solo-paisagem mais quantitativos estão se tornando conhecidos como novo paradigma para o levantamento de solos, bem como para o entendimento e predição dos padrões naturais do solo e já fazem parte das novas tendências dos levantamentos (HUDSON, 1992; McKENZIE *et al.*, 2000; WILSON e GALLANT, 2000; McBRATNEY *et al.*, 2003).

Ao aplicar variáveis geomorfológicas para definir unidades de solos, Klingebiel *et al.*, (1987) concluíram que tais atributos mostraram-se adequados na identificação de unidades de solos. Para definir unidades básicas para o mapeamento geomorfológico e pedológico Dikau (1989) demonstrou como a análise digital do terreno poderia ser aplicada na quantificação do relevo a partir da definição de unidades básicas para o mapeamento geomorfológico e pedológico, sendo que os principais atributos topográficos utilizados para definir estas unidades de relevo foram a declividade, plano e perfil de curvatura. Moore *et al.* (1991)

apresentaram também um conjunto de atributos topográficos (primários e secundários) obtidos de modelagem digital para aplicação em geomorfologia e hidrologia. Essas abordagens oferecem uma base sistemática para derivação de complexas unidades de relevo que podem ser utilizadas para auxiliar nos estudos de solo-relevo.

A partir do delineamento de unidades do terreno, Odeh *et al.* (1991) avaliaram a importância e definição de um padrão de amostragem ideal para reduzir o erro de extrapolação e classificação incorreta do solo. Verificaram que as variáveis declividade, plano de curvatura, perfil de curvatura, extensão da vertente e área do topo contribuíram para explicar a maior parte da variação dos solos em sua área de estudo.

Um dos trabalhos de referência nos estudos utilizando atributos topográficos derivados de MDT para prever atributos de solo foi apresentado por Moore *et al.* (1993) para uma pequena bacia no Colorado/EUA. Esse trabalho baseia na premissa que o desenvolvimento do solo em muitas situações ocorre em resposta ao modo pelo qual a água se move sobre a paisagem. Assim os atributos topográficos podem caracterizar os caminhos do fluxo e as interações com o solo. No estudo, os autores encontraram uma correlação significativa entre atributos do terreno quantificados e atributos do solo medidos. A declividade e o índice de umidade foram os atributos que apresentaram maior correlação com o solo, contribuindo para explicar aproximadamente metade da variabilidade na espessura do horizonte A, teor de matéria orgânica, pH, fósforo extraível e teores de silte e areia.

Na mesma perspectiva de prever atributos dos solos Gessler *et al.* (1995) desenvolveram um modelo solo-paisagem estatístico, utilizando diferentes atributos do terreno, tais como: plano de curvatura e índice topográfico composto para estimar a profundidade do horizonte A, profundidade do sólum e a ausência ou presença de horizonte E em uma área com geologia uniforme. McKenzie e Ryan (1999) utilizando a correlação ambiental como método para predição espacial de propriedades de solo observaram relação entre o índice de umidade e declividade com a espessura dos solos.

A avaliação dos atributos topográficos na caracterização de unidades de paisagem possibilita entender os padrões de distribuição de solos e auxiliar nos levantamentos de solo (CARVALHO JUNIOR *et al.*, 2006). Segundo essas considerações, destacam-se alguns trabalhos, a maioria de cunho acadêmico, recentemente desenvolvidos no Brasil.

Sirtoli *et al.* (2008a) demonstraram relações entre unidades de solos com os atributos do relevo em uma pequena quadrícula situada na Bacia Sedimentar de Curitiba. Foi considerado

na avaliação um conjunto de atributos do relevo derivados de um MDT, cujas variáveis foram: hipsometria, declividade, plano e perfil de curvatura, radiação solar, orientação das vertentes, índices de umidade, de corrente de máximo fluxo e de capacidade de transporte de sedimentos.

A partir de análises geomorfométricas de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo, Muñoz (2009) apresentou as relações entre as variáveis geomorfométricas obtidas de MDE: declividade, curvatura vertical (perfil de curvatura), formas do terreno (nove formas combinadas de plano e perfil de curvatura), altura, dissecação, amplitude e predominância, com um levantamento pedológico semidetalhado, na escala 1:100.000, da quadrícula de São Carlos/SP. A autora demonstrou que as variáveis mostram-se úteis para separação de unidades de mapeamento de solos, uma vez que as classes das variáveis geomorfométricas, cada uma a seu modo, indicaram de dois a três conjuntos de classes de solos. Portanto concluiu que é possível avaliar as relações solo-relevo com recursos de geoprocessamento e modelagem de dados SRTM.

Com o objetivo de desenvolver uma metodologia para subsidiar mapeamentos pedológicos e orientar trabalhos de campo em levantamento de solo, com base em atributos topográficos [dados morfométricos] e uso de ferramentas de SIG em uma bacia hidrográfica, Hermuche *et al.* (2002) e Hermuche *et al.* (2003) utilizaram declividade, hipsometria, orientação e área de contribuição e aplicação de composições coloridas em RGB desses atributos topográficos para definir unidades de solos, que resultou na apresentação de padrões similares aos das unidades de um mapa de solos na escala 1:50.000. Porém, Hermuche *et al.* (2003) identificaram limitações no trabalho, pois a análise dos padrões não permitiu a identificação das classes de solos Hidromórficos e Argissolos. A justificativa desses resultados, por parte dos autores, é de que não foram estabelecidos critérios suficientes para definição desses padrões de solos no modelo aplicado.

A partir da análise digital do terreno, como ferramenta, Ippoliti *et al.* (2005) identificaram unidades preliminares de solos pelas geoformas e pedoforma obtidas em uma bacia hidrográfica por meio dos atributos topográficos: elevação, declividade e curvatura, comparando-as com avaliação de campo. O principal mérito do método apontado pelos autores é a maior eficiência obtida no trabalho de campo, após a realização de uma classificação digital preliminar, em virtude de um modelo de ocorrência de solos previamente conhecido.

Ribeiro *et al.* (2002) utilizaram como dados de entrada numa RNA para separação digital de unidades de paisagem, visando à identificação de solos, sete bandas de imagem digital e seis variáveis complementares (NDVI, MDT, Aspecto, Slope, Flow Direction e Watershed), além de um mapa de solos na escala 1:300.000 para seleção de amostras a serem processadas. Os autores concluíram que foi possível aplicação da metodologia de dados orientados a objeto, bem como a separação de seis classes que representaram bem a realidade de campo

Em região montanhosa de Mares de Morros na Bacia do rio São Domingos, região Noroeste do Rio de Janeiro, Chagas (2006), considerou atributos topográficos derivados de MDT na predição de unidades de mapeamento de solos por meio de classificação supervisionada utilizando-se de RNA e o classificador de Máxima Verossimilhança (MAXVER). Na predição de unidades de mapeamento foram testadas diferentes combinações entre as variáveis discriminantes: geologia, elevação, declividade, aspecto, plano de curvatura, índice de umidade e três índices derivados de uma imagem do sensor ETM+ do Landsat-7. Os resultados das classificações pelas RNA's e pelo MAXVER não produziram uma boa concordância com o mapa de solos convencional na escala 1:50.000, ao qual foram comparados, apresentando 37,15% e 31,51%, respectivamente. Obteve-se resultados satisfatórios apenas para o 1º nível categórico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), tanto na classificação pelas redes neurais quanto pelo MAXVER, 75,22% e 74,64%, respectivamente. Nos demais níveis a concordância foi inferior a 50%, evidenciando, ainda mais, as discrepâncias, principalmente no 4º nível categórico, na qual a concordância foi de apenas 23,27% na RNA e 12,92% em MAXVER.

Outras aplicações de RNA para delimitar unidades de solos foram realizadas por Sirtoli (2008), em uma quadrícula localizada na Bacia Sedimentar de Curitiba, onde o autor considerou um conjunto de atributos topográficos primários e secundários, índices espectrais extraídos do sensor orbital Ikonos II e geologia que foram integrados por RNA para mapear unidades de solos; e por Fidêncio (2001) para classificar amostras de solos de diferentes regiões geográficas do estado de São Paulo por meio do significado de seus espectros na região do infravermelho próximo, utilizando dois tipos de redes: *radial basis function network* (RBFN) e *counter-propagation neural network* (CPANN), concluíram que o uso das RNA's foi possível classificar as respectivas amostras de solos e os erros obtidos mostraram-se suficientemente aceitáveis.

Com objetivo de desenvolver técnica de mapeamento digital de solos Crivelenti (2009) utiliza apoio de parâmetros descritores do relevo (geomorfométricos), de mapa geológico e de levantamentos de solos pré-existentes. As variáveis geomorfométricas (atributos topográficos) foram geradas a partir do MDE elaborado com curvas de nível e pontos cotados das cartas topográficas 1:50.000, ao qual calculou-se os parâmetros de declividade, curvaturas em planta e perfil, área de contribuição da bacia. Por meio de árvores de decisão obteve-se digitalmente mapas pedológicos das folhas Dois Córregos e São Pedro, ambas na escala 1:50.000. As árvores de decisão mostraram-se adequadas na elaboração dos modelos, com acurácia de 55% para a folha São Pedro e 61% para a folha Dois Córregos, quando comparadas as unidades preditas com unidades de solos de mapa pedológico em escala 1:100.000.

Na determinação de unidades preliminares de solos por tabulação cruzada, Sirtoli *et al.* (2008b) demonstraram a utilização dos atributos topográficos secundários: índices de umidade, índice de corrente de máximo fluxo e índice de capacidade de transporte de sedimentos, aplicados no mapeamento de unidades preliminares de solo (pedoformas), que resultou em 66% de concordância e 13% de discordância quando comparado com unidades de solos de um mapa convencional pré-existente, em escala 1:10.000. O resultado mostrou que em 11% da área da microbacia estudada não foi possível determinar a unidade de mapeamento pelos índices derivados de MDT com uso de técnicas de geoprocessamento.

Cáten *et al.* (2009) utilizam regressões logísticas múltiplas na predição de classes de solos por meio de mapeamento digital (pedometria). Os atributos do terreno são obtidos a partir de dados de um MDE oriundo de dados SRTM interpolado para uma resolução de 50 m, sendo eles: elevação, declividade, distância à drenagem, curvatura planar, curvatura de perfil, radiação relativa disponível, logaritmo natural da área de contribuição, índice de umidade topográfica e capacidade de transporte de sedimento. O mapa predito reproduziu em torno de 50% das informações que constavam no mapa de solo referência que foi utilizado para comparações.

Uma recomendação comum feita por diversos autores, dentre os trabalhos acima mencionados, é a aplicação de MDT em escala de maior detalhe, visando uma melhor aproximação na predição de unidades de solos (IPPOLITI *et al.*, 2005; CHAGAS, 2006 e CRIVELENTI, 2009).

## 2.4. ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

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). É designada como 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 (MUÑOZ, 2009), por meio de equações aplicadas a modelos numéricos de representação altimétrica, os MDTs, que derivam os atributos. Para Wood (1996) a parametrização do relevo refere-se à representação quantitativa das características morfológicas da paisagem descritas de forma contínua.

Com o advento dos Sistemas de Informações Geográficas a obtenção dos atributos do relevo passou a ser um procedimento de mais fácil acesso (SIRTOLI *et al.*, 2008a; McBRATNEY *et al.*, 2003)

Os atributos derivados de MDT são compreendidos como atributos topográficos (MOORE *et al.*, 1991; MOORE *et al.*, 1993; WILSON e GALLANT, 2000; CHAGAS, 2006), do terreno (CÁTEN *et al.*, 2009) ou de relevo (IPPOLITI *et al.*, 2005; SIRTOLI *et al.*, 2008a), também são denominados na literatura como variáveis geomorfométricas (BISPO *et al.*, 2009; MUÑOZ, 2009) ou morfométricas (HERMUCHE *et al.*, 2002). Esses atributos podem ser parametrizados a partir de variáveis, tais como altitude, declividade, aspecto, diferentes curvaturas, área contribuição, índice topográfico de umidade, etc (McBRATNEY *et al.*, 2003).

Os atributos topográficos podem ser divididos em primários e secundários (ou compostos). Os atributos primários são calculados diretamente do modelo digital de elevação, como primeira derivada, inclui variáveis como elevação, declividade, aspecto plano e perfil de curvatura, caminho de fluxo e área específica de contribuição. Os atributos secundários envolvem combinações de atributos primários, segunda derivada, e podem ser usados para caracterizar a variabilidade espacial de processos específicos que ocorrem na paisagem, tal como parâmetros relacionados a processos de transportes de sedimentos e a movimento da água superficial e subsuperficial no solo, compreende o índice de umidade, índice de capacidade de transporte de sedimentos e índice de corrente de máximo fluxo (MOORE *et al.*, 1991; MOORE *et al.*, 1993, GALLANT e WILSON, 2000; McBRATNEY *et al.*, 2003). Os índices secundários podem ser derivados empiricamente ou por meio de equações simplificadas descrevendo processos físicos.

No presente trabalho os atributos topográficos obtidos a partir de um MDT que merecem ser ressaltados são os que estão sendo adotados como variáveis do relevo para as análises da relação solo-relevo e utilizados na delimitação de unidades preliminares de mapeamento de solos. Portanto, os atributos primários a serem considerados são: hipsometria, declividade, perfil e plano de curvatura, enquanto os atributos secundários são: índice de umidade, índice de corrente de máximo fluxo e índice de capacidade de transporte de sedimentos.

O atributo topográfico hipsometria, ou elevação, é o MDT, propriamente dito. Essa variável é entendida por Valeriano (2003) como uma derivação de ordem zero do MDE.

A partir das derivadas direcionais em  $x$  e  $y$  tanto a declividade como o aspecto podem ser determinados da elevação. Em uma função contínua e diferenciável a obtenção dos dois parâmetros corresponderia à determinação do vetor gradiente da função (MENDIONDO *et al.*, 1998).

Portanto, dos atributos selecionados, a declividade é a primeira derivada da altitude (GALLANT e WILSON, 2000). Segundo Burrough (1986), é definida como um plano tangente a superfície, ou seja, corresponde à inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal, expresso como a mudança de elevação sobre certa distância.

Essa variável tem sido considerada como um dos mais importantes atributos topográficos primários na identificação de unidades de solos (HERMUCHE *et al.*, 2003; IPPOLITI *et al.*, 2005; CHAGAS, 2006; SIRTOLI, 2008; SIRTOLI *et al.*, 2008b; MUÑOZ, 2009 e CRIVELENTI, 2009). Normalmente é calculada em graus ou porcentagem.

De acordo com Pennock *et al.* (1987), a configuração da encosta de acordo com o plano e perfil de curvatura pode ser usada para identificar áreas de diferentes regimes de umidade, permitindo uma avaliação mais acurada da distribuição dos solos na paisagem.

Os atributos topográficos primários designados como perfil de curvatura e plano de curvatura (CHAGAS, 2006 e SIRTOLI *et al.*, 2008a), também nomeados na literatura como curvatura vertical e horizontal (VALERIANO, 2003, VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003 e MUÑOZ, 2009) ou curvatura em perfil e plano (CRIVELENTI, 2009), ou ainda curvatura no perfil e no plano (MENDIONDO *et al.*, 1998). A primeira refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno, quando analisado em perfil (VALERIANO, 2003) e a segunda refere-se ao caráter divergente/convergente dos fluxos de matéria sobre o terreno quando analisado em projeção horizontal (VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003).

O perfil de curvatura é importante para caracterizar mudanças na velocidade do fluxo da água e processos relacionados ao transporte de sedimentos, enquanto que o plano de curvatura demonstra a propensão de a água convergir ou divergir no terreno (GALLANT e WILSON, 2000).

Essas variáveis constituem a segunda derivada. A partir da declividade e do aspecto, são reconhecidas como um atributo importante para a distinção de sítios geomorfológicos (MUÑOZ, 2009).

A curvatura no perfil é a taxa de variação da declividade na direção do aspecto enquanto a curvatura no plano é a taxa de variação da declividade na direção ortogonal a do aspecto (MENDIONDO *et. al.*, 1998).

Teoricamente, segundo Valeriano (2003), as vertentes retilíneas e planares possuem valor de curvatura nulo, as vertentes côncavas e convergentes o valor positivo e as convexas e divergentes o valor negativo. Cabe nessa interpretação uma faixa de tolerância, uma vez que além das imprecisões de todo o processo, desde o mapeamento, passando pelo processamento digital, geram flutuações nos cálculos realizados (VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003).

Assim, o perfil de curvatura representa a forma da vertente no sentido descendente e indica a proporção de mudança do potencial do gradiente, influenciando no fluxo da água e na velocidade de processos de transporte de sedimentos, e o plano de curvatura a medida da convergência e divergência topográfica e por isso influencia a concentração de água na paisagem (SIRTOLI *et al.*, 2008a).

Portanto, estas variáveis estão relacionadas aos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade e desempenham importante papel sobre os processos de pedogênese (VALERIANO, 2003 e VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003).

Quanto aos atributos topográficos secundários, ou compostos, envolvem combinações de dois ou mais atributos primários, constituem base física ou empírica visando caracterizar a variabilidade espacial de processos específicos que ocorrem na paisagem (MOORE *et al.*, 1991 e MOORE *et al.*, 1993).

São importantes porque oferecem oportunidade de descrever um padrão como uma função de processo e quantificam o papel desempenhado pela topografia na redistribuição de água na paisagem. Assim, esses atributos podem afetar as características do solo e sua

distribuição, uma vez que a pedogênese de solo afeta o modo como a água se distribui sobre as vertentes (WILSON e GALLANT, 2000).

Três principais atributos secundários são apontados por Moore *et al.* (1991) como potenciais na aplicação para predição da distribuição espacial de solos e seus atributos, são eles o índice de umidade, de corrente de máximo fluxo e de capacidade de transporte de sedimentos.

O índice de umidade, cuja tradução original é *wetness index*, também denominado de atributo topográfico composto (*compound topographic index*), é usado para caracterizar a distribuição espacial de zonas de saturação superficial e conteúdo de água nas paisagens, demonstrando os efeitos do relevo na localização e tamanho das áreas de acumulação de água (MOORE *et al.*, 1993).

Este índice é utilizado por Beven e Kirkby (1979) na aplicação de modelos hidrológicos para caracterizar a distribuição espacial e a extensão das zonas de saturação como variável na geração de escoamento superficial, denominado de índice topográfico. Moore *et al.* (1993) o utilizaram para caracterizar a variabilidade espacial das propriedades do solo em uma topossequência no Colorado/EUA.

No entanto, dois índices de umidade topográfica têm sido amplamente utilizados para descrever os efeitos da topografia na identificação e dimensão das áreas saturadas. Ambas as equações assumem as mesmas variáveis, porém o que as diferencia é a variável de transmissividade do solo (WILSON e GALLANT, 2000). A utilizada nesse trabalho considera a transmissividade constante em toda a bacia hidrográfica. Sua concepção parte do pressuposto que o gradiente piezométrico, que determina a direção do fluxo subterrâneo, é assumido como sendo paralelo à superfície (MOORE *et al.* 1993).

Esse índice prevê saturação onde a área de contribuição é grande, geralmente em segmentos convergentes de paisagens, onde o ângulo de inclinação é pequeno, predominantemente na base de vertentes côncavas, onde a variação da transmissividade do solo é pequena em solos não muito profundos. Assim, com sua aplicação obtém zonas de concentração de água na paisagem (WILSON e GALLANT, 2000). Representa também o aparecimento potencial de caminhos preferenciais da água devido aos gradientes de umidade no perfil do solo (MENDIONDO *et al.*, 1998).

No Brasil, sua aplicação na identificação de unidades de solos já foi realizada por Chagas (2006) Sirtoli (2008), Sirtoli *et al.* (2008b), Cáten *et al.* (2009) e Crivelenti (2009).

Os índices de corrente de máximo fluxo e de capacidade de transporte de sedimentos são originados do perfil de curvatura do terreno, conforme descrito por Moore *et al.* (1993), isto é, são dependentes da mudança do potencial do gradiente.

O índice de corrente de máximo fluxo, cujo termo do original é *stream-power index* (MOORE *et al.*, 1991), é a mensuração do poder erosivo da água corrente, com base no pressuposto de que a descarga é proporcional a acumulação de fluxo de montante. Prediz a erosão nas áreas de perfil convexo (aceleração do fluxo) e deposição em áreas de perfil côncavo (redução da velocidade de fluxo), (WILSON e GALLANT, 2000).

O índice de capacidade de transporte de sedimentos foi derivado da unidade de fluxo de energia e é equivalente ao fator de comprimento e inclinação da vertente da equação RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*). Sua aplicação é por vezes utilizada para prever áreas de erosão e de deposição (MOORE *et al.*, 1991).

A equação é uma função não-linear de declive e descarga específica. Portanto este novo índice calcula a capacidade de transporte de sedimentos e sua distribuição espacial (WILSON e GALLANT, 2000).

Esses dois índices foram aplicados primeiramente por Moore *et al.* (1993) na predição da distribuição de solos e seus atributos. No Brasil poucos são os trabalhos que utilizaram dessas variáveis no apoio a identificação de unidades de solos, dentre eles Sirtoli *et al.* (2008b) utilizaram ambos os índices com eficiência na predição de unidade preliminares de solos, Caten *et al.* (2009) utiliza também o índice de capacidade de transporte de sedimentos na identificação de classes de solos utilizando de regressões logísticas múltiplas.

## 2.5. REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

Para classificar dados de diferentes origens, a utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA) emerge como uma alternativa vantajosa aos classificadores de imagens baseados em conceitos estatísticos, uma vez que nenhuma hipótese prévia sobre a distribuição dos dados a serem classificados é exigida (SIRTOLI, 2008).

As RNA constituem um esforço matemático na tentativa de simular o funcionamento do cérebro humano por meio de uma rede de elementos de processamento unitários que de forma conjunta simulariam o fluxo de “informações” no cérebro, são constituídas de vários “neurons” que são conectados por canais de comunicação (“connectors”). Esses conectores

contêm os dados numéricos, os quais são arranjados de diferentes maneiras e organizados em camadas. Os dados podem receber pesos diferentes e não existe uma estrutura assumida para o modelo. As redes são de fato, ajustadas ou “treinadas” para responder a uma determinada demanda (MENDONÇA-SANTOS e SANTOS, 2003; McBRATNEY, 2003).

As RNA's são definidas como unidades (neurônios interconectados) que trabalham em paralelo para classificar e generalizar dados de entrada em classes de saída. A interconexão entre os neurônios é ponderada e a partir de dados de entrada [amostras], os pesos que representam a associação entre os neurônios são ajustados. Após o ajuste, para cada conjunto de dados apresentado à rede na primeira camada de neurônios (camada de entrada) a rede propaga sinais para as camadas seguintes, em função dos pesos pré-determinados. A atividade de um neurônio influencia no nível de ativação de outros da rede, assim sucessivamente até que a saída seja atingida. A magnitude da rede é determinada por um processo de treinamento iterativo o qual tenta, por meio de repetição, aprender a saída correta para cada amostra treinada (RIBEIRO e CENTENO, 2002).

As RNA's podem ser classificadas como de aprendizado supervisionado e não supervisionado. No primeiro tipo considera-se que o analista possui conhecimento sobre o ambiente e é capaz de representá-lo por um conjunto de amostras, porém é desconhecido pela RNA. Por isso, o analista oferece à rede parâmetros de saída correspondentes aos de entrada, ajustados sob a influência do vetor de treinamento e do sinal do erro permitido. O erro é definido como a diferença entre a resposta desejada e a resposta real da rede. Esse ajuste ocorre iterativamente com o objetivo de fazer a RNA copiar os parâmetros oferecidos pelo analista, assim o conhecimento é transferido à rede por meio do treinamento. Quanto ao aprendizado não supervisionado, não há um analista crítico para supervisionar o processo de aprendizado e nem exemplo da função a ser aprendida. A rede executa a verificação dos conjuntos de dados apresentados e autodetermina propriedades dos conjuntos de dados e aprende a analisar as propriedades de saída, utilizando padrões, regularidades e correlações para agrupar os conjuntos de dados em classes (HAYKIN, 2001).

Outra maneira de classificar as RNA's é segundo sua estrutura, sendo elas de camada simples, denominadas *Perceptron* (Figura 2.5-a), que são constituídas por um conjunto de neurônios arranjados em apenas uma camada; e as redes multicamadas, *Perceptron Multicamadas* (Figura 2.5-b), que são formadas por diversas camadas intermediárias, ou pela combinação de várias redes de camadas simples (VENTURIERI e SANTOS, 1998).

Pelo fato de muitos problemas práticos não serem linearmente separáveis, a rede *perceptron* multicamadas gera interesse pela sua habilidade em aprender e reconhecer padrões dessa natureza (SIRTOLI, 2008).

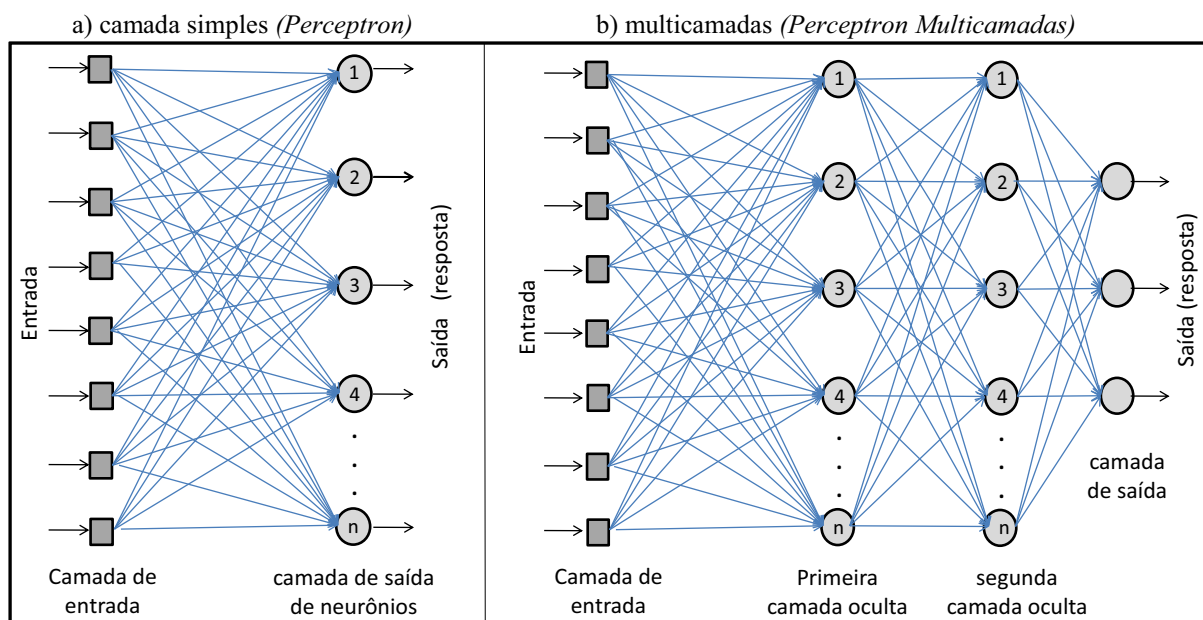


FIGURA 2.5 – TIPOS DE REDES NEURAIAS  
ADAPTADO DE HAYKIN (2001)

O termo retropropagação refere-se a um método de treinamento empregado na arquitetura do *perceptron multicamadas*, no qual os pesos das conexões são ajustados por retroalimentação até a convergência, perfazendo a retropropagação de erro. Esse algoritmo consiste de dois passos nas diferentes camadas da rede: “um passo para frente” a propagação, e um “passo para trás” a retropropagação. No passo de propagação, os pesos sinápticos são invariantes. No passo para trás, os pesos sinápticos são “ajustados” por uma regra de correção de erro que consiste na diferença entre a resposta de saída da camada em questão da rede e a resposta desejada. Isto produz um sinal de erro, que é propagado para trás por meio da rede em direção contrária às conexões sinápticas (HAYKIN, 2001).

A topologia de uma RNA refere-se à maneira como os elementos de processamento são organizados, o que afeta o desempenho da rede, uma vez que sua estrutura está intimamente relacionada com o algoritmo de aprendizado usado na fase de seu treinamento. A arquitetura da *Perceptron Multicamadas* é constituída por: a) camada de entrada, onde os dados de entrada são apresentados à rede; b) camadas intermediárias ou ocultas, onde é feita a maior parte do processamento, por meio de conexões ponderadas, consideradas extratoras de características; c) camada de saída, onde recebe os valores já processados pela rede. A

arquitetura da RNA, que compreende o arranjo dos neurônios, pode assumir diferentes formas variando na natureza da ligação entre camadas, número de camadas e número de neurônios por camadas (ITO *et. al.*, 2000).

Uma das principais características das Redes Neurais Artificiais é a capacidade de aprender (ser treinada) por meio de exemplos, e generalizar o aprendizado aplicando-o em situações antes não confrontadas, ou não apresentadas previamente (BITTENCOURT, 1998). Para Souza *et al.* (2006) se destacam pelo bom desempenho em tarefas de complexa realização.

A propriedade mais importante da RNA é a habilidade de aprender e com isso melhorar o desempenho. Seu aprendizado é realizado por meio de processos interativos de ajustes aplicados a pesos, associado ao treinamento. O aprendizado se dá a partir de exemplos e ocorre quando a rede atinge uma solução generalizada para uma classe de problemas. A maioria dos modelos possui uma regra de treinamento no qual os pesos de suas conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados (amostras). A RNA passa pelo processo de treinamento a partir de um conjunto de dados reais diferindo da computação programada, a qual necessita de um conjunto de regras pré-fixadas e algoritmos (SOUZA *et. al.*, 2006).

Assim, o uso de RNA para solução de um dado problema consiste na repetição de um conjunto de treinamentos. Treinar uma rede significa ajustar a sua matriz de pesos de entrada de forma que o vetor de saída coincida com certo valor desejado para cada vetor de entrada. O processo de treinamento é repetido até que o erro para o conjunto de treinamento alcance valor mínimo ou limite previamente determinado (HAYKIN, 2001).

Algumas das técnicas de Inteligência Artificial, a exemplo das RNA's, vêm sendo empregadas nas Ciências do Solo, segundo McBratney *et al.* (2003) são utilizadas principalmente para a previsão de atributos do solo. No Brasil os trabalhos mais recentes que utilizam RNA são de Fidêncio (2001), para classificar amostras de solo a partir de espectrometria, de Chagas (2006) e Sirtoli (2008), nos quais foram realizadas classificações e predição de unidades de solos.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados se constituem na base cartográfica obtidas das folhas topográficas na escala 1:10.000 da Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba – COMEC (1976), folhas SG-22-X-D-I-4-SO-B e SG-22-X-D-I-4-SE-A; mapa geológico de Salamuni *et al.* (1999); mapas de solos na escala 1:10.000 de Rocha (1990) e mapa de solos na escala 1:35.000 de Lima (2005).

O material utilizado em apoio de campo foi um GPS de navegação modelo Garmin GPSMap 76 SX e um trado holandês.

Os *softwares* utilizados para processamento das informações foram *MatLab* (MATHWORKS, 2007), *ArcGis* versão 9.3.1 com extensões *3D Analyst* e *Spatial Analyst* (ESRI, 2009) e o *software Global Mapper* versão 11 para conversão de formatos de imagem.

#### 3.2. MÉTODOS

##### 3.2.1. Digitalização dos dados cartográficos

Realizou-se a conversão de dados cartográficos de ambiente analógico para ambiente digital, por meio de rasterização das folhas topográficas de COMEC (1976), mapa geológico adaptado de Salamuni *et al.* (1999) e mapas de solos de Rocha (1990) e Lima (2005). Posteriormente os dados em estrutura matricial foram georreferenciados para o sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), referenciado no *Datum horizontal South American 1969 (SAD69)*, meridiano central 51° oeste de *Greenwich* (fuso 22 sul) e depois foram vetorizados no aplicativo *ArcGis* versão 9.3.1, onde foram organizados e armazenados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Essas informações incluem curvas de nível com equidistância vertical de 5 metros, pontos cotados, rede de drenagem, unidades de mapeamento de solos e unidades geológicas.

##### 3.2.2. Obtenção do MDT

A partir dos dados vetoriais planialtimétricos foi produzido um MDT do retângulo envolvente à área de estudo. Primeiramente o MDT foi processado em uma grade triangular (TIN), que representa como vantagem melhor representação do relevo complexo e das linhas

de cristas (ASSAD e SANO, 1998) e em seguida foi convertido em uma grade regular para possibilitar operações entre matrizes aplicação na RNA, a resolução espacial adotada foi de 5 metros por pixel.

Os modelos digitais do tipo grade triangular ou TIN (*Triangular Irregular Network*), representa uma superfície por meio de um conjunto de faces triangulares interligadas, formados pelos pontos amostrados da superfície que se articulam aos vértices (SARAIVA, 2001). O algoritmo utilizado na geração do TIN foi a triangulação de Delaunay, eficiente para representação do relevo (SILVA, 1998) e usualmente utilizado nos aplicativos de SIG's (ASSAD e SANO, 1998). Essa triangulação é gerada com base no princípio de que o círculo circunscrito de cada triângulo não contenha pontos no seu interior e ao critério do ângulo máximo-mínimo, onde a menor medida de ângulos de todos os triângulos é maximizada evitando a construção de triângulos deformados (SARAIVA, 2001). Neste método, a superfície é representada como uma série de triângulos irregulares (grade irregular triangular), gerados a partir da interpolação de linhas e pontos.

Os modelos digitais retangulares (grade regular) consistem em um poliedro de faces retangulares, cujo processo de elaboração consiste em estimar valores de cota de cada ponto a partir do conjunto de amostras de entrada (FELGUEIRAS, 1998). Os MDTs que utilizam grades retangulares regulares são muito utilizados em SIG pela facilidade de manipulação e geração dos dados. Esses modelos utilizam uma matriz como estrutura de armazenamento, sendo adequados à representação de superfícies suaves e de variação contínua.

A partir da construção dos MDTs foram realizados os processamentos dos atributos topográficos por meio de rotinas desenvolvidas no ambiente *MatLab* (MATHWORKS, 2007). Os modelos matemáticos usados para calcular os atributos, tanto primários quanto secundários, são apresentados em Moore *et al.* (1991) e Moore *et al.* (1993). Esses modelos são mostrados nas próximas seções.

### **3.2.3. Cálculo dos atributos topográficos**

A partir do MDT representado pela grade regular com espaçamento de 5 metros, obtida do TIN, processadas no *ArcGis* versão 9.3.1 (ESRI, 2009), foram calculados no programa *MatLab* (MATHWORKS, 2007) os atributos primários e secundários do relevo: declividade, perfil e plano de curvatura, índice de corrente de máximo fluxo, índice umidade e índice capacidade de transporte de sedimentos (Figura 3.1).

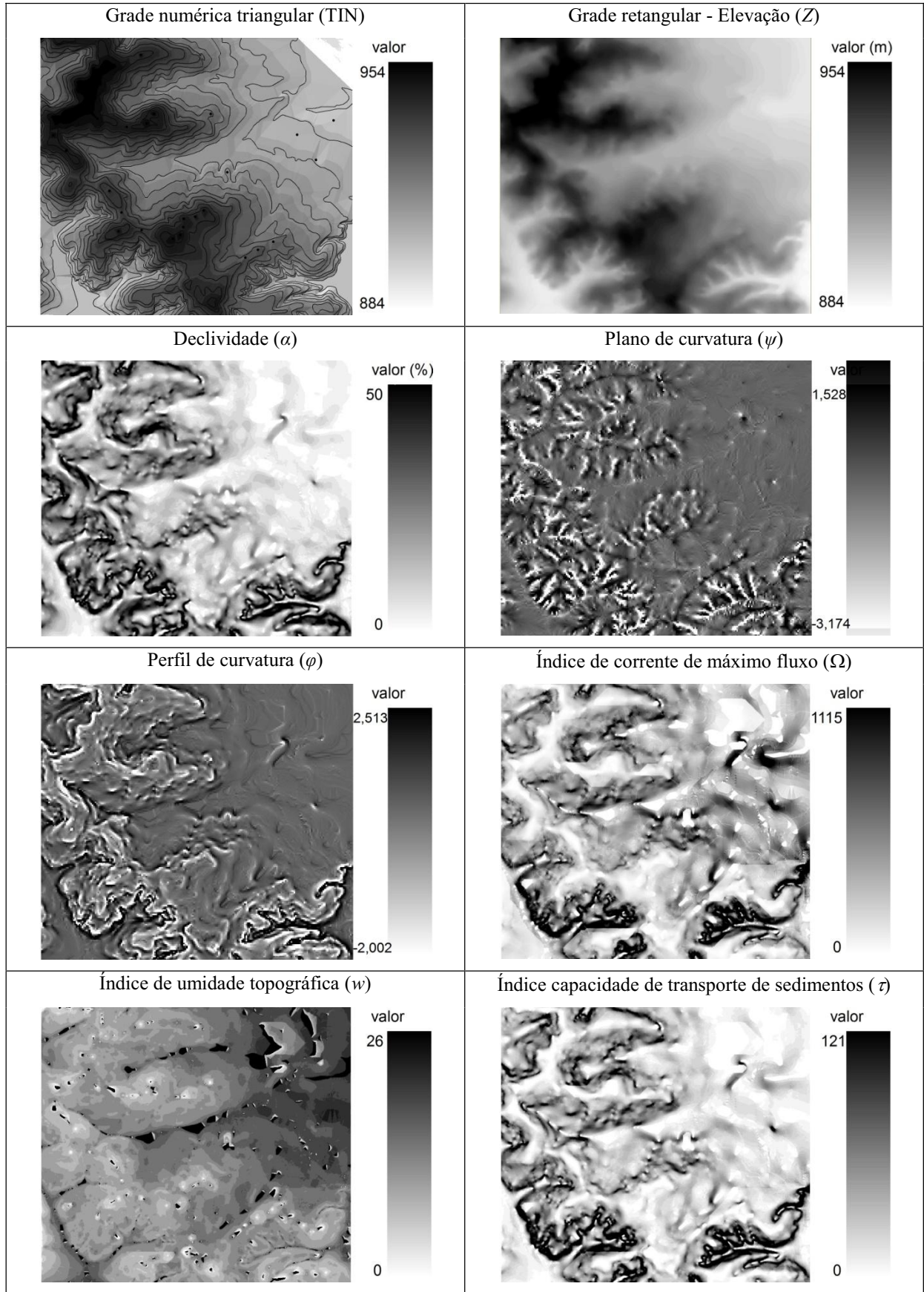


FIGURA 3.1 – REPRESENTAÇÃO DOS MDE E ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

Para tanto foi desenvolvida uma rotina que a partir da entrada do MDT processa os atributos topográficos. Os dados de saída são representados por arquivos no formato raster em estrutura ASCII, que foram importados para o *software ArcGis* versão 9.3.1 (ESRI, 2009), para compor um SIG, possibilitando com isso o armazenamento, georreferenciamento e possibilidade de um conjunto operação de análises espaciais.

Os modelos matemáticos usados para calcular os atributos seguem os mesmos apresentados por Wilson e Gallant (2000), Moore *et al.* (1991) e Moore *et al.* (1993). As operações foram executadas por meio de uma janela, ou sub matriz, com nove nodos, conforme ilustra a Figura 3.2. 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 da primeira e segunda derivada da superfície, os atributos topográficos (McBRATNEY *et al.*, 2003).

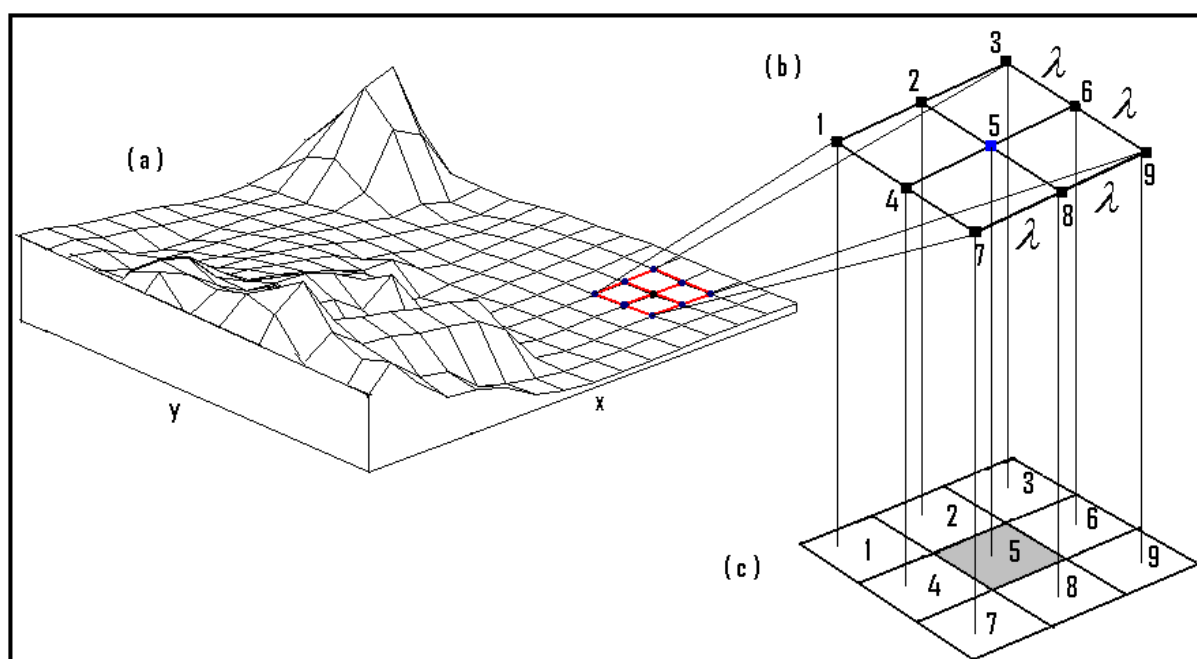


FIGURA 3.2 – GRADE REGULAR DA SUPERFÍCIE DO SOLO (a), JANELA COM NOVE NODOS (b), JANELA COM NOVE PIXELS (c)

Para tanto, é executada uma varredura com essa janela, sobre o conjunto total de dados (Figura 3.2-a) que representam a área estudada. No processo de varredura são computados os valores dos índices por meio das equações apresentados nas seções seguintes.

Observa-se na Figura 3.2-b que a largura, ou espaçamento, da grade é de  $\lambda$  metros. A Figura 3.2-c mostra a representação da grade na forma matricial. Isto é, cada ponto da grade é transformado em um *pixel*. Cada *pixel* possui um valor correspondente à elevação do ponto e

uma largura de  $\lambda$  metros. De posse dessa informação os atributos topográficos primários e secundários puderam ser definidos.

### 3.2.3.1. Atributos topográficos primários

Os atributos primários, declividade, plano de curvatura e perfil de curvatura, usados nesse trabalho, são determinados a partir do MDT, de acordo com os modelos apresentados a seguir.

A declividade descreve a medida da inclinação da superfície. Esse atributo pode ser medido tanto em porcentagem quanto em graus. Assim, a partir do MDT representado em forma de grade regular, a declividade pode ser estimada como as derivadas locais, usando as diferenças finitas centradas localmente, em uma vizinhança 3x3, como mostra a Figura 3.3, onde  $Z_i$  são os valores altimétricos pontuais.

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

FIGURA 3.3 – VIZINHANÇA 3X3 LOCAL

Para o cálculo da declividade é necessário determinar duas diferenças finitas locais, nas direções x e y, do MDT. Tendo por base as diferenças finitas, a declividade, cujo ângulo é dado em graus, pode ser calculada pela equação 1 (HORN, 1981 e MOORE *et al.*, 1991).

$$\beta = \arctan\left(\sqrt{f_x^2 + f_y^2}\right) \quad (1)$$

Assim,  $\beta$  representa a inclinação local do terreno, onde,  $f_x^2 + f_y^2$  é definido por aproximações das diferenças finitas, por meio das derivadas parciais  $f_x$  e  $f_y$ , nas direções de x e y (ortogonais entre si), respectivamente expressos nas equações 2 e 3.

$$f_x = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{Z_6 - Z_4}{2\lambda} \quad (2)$$

$$f_y = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{Z_2 - Z_8}{2\lambda} \quad (3)$$

O espaçamento da grade regular do MDT é representado por  $\lambda$ , cujo valor utilizado aqui utilizado é de 5 metros, adequado à escala adotada.

Para a representação da declividade em porcentagem ( $\alpha$ ), foi aplicada a equação 4 aos valores em graus de  $\beta$ .

$$\alpha = \tan \beta \cdot (100) \quad (3)$$

Igualmente à declividade  $\beta$ , o plano de curvatura ( $\psi$ ) e o perfil de curvatura ( $\varphi$ ) são definidos a partir dos valores das diferenças finitas, nas direções de x e y (MOORE *et al.*, 1993), acrescidos das segundas derivadas parciais, mostradas abaixo nas equações 5, 6 e 7.

$$f_{xx} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{Z_4 + Z_6 - 2Z_5}{\lambda^2} \quad (5)$$

$$f_{yy} = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{Z_2 + Z_8 - 2Z_5}{\lambda^2} \quad (6)$$

$$f_{xy} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9}{4\lambda^2} \quad (7)$$

Desse modo, o perfil ( $\varphi$ ) e o plano de curvatura ( $\psi$ ) são determinados pelas equações 8 e 9, respectivamente, (MOORE *et al.*, 1993).

$$\varphi = \frac{-2(f_{xx} f_x^2 + f_{xy} f_x f_y + f_{yy} f_y^2)}{f_x^2 + f_y^2} \quad (8)$$

$$\psi = \frac{2(f_{xx} f_y^2 - f_{xy} f_x f_y + f_{yy} f_x^2)}{f_x^2 + f_y^2} \quad (9)$$

### 3.2.3.2. Atributos topográficos secundários

O índice corrente de máximo fluxo, de umidade e o de capacidade de transporte de sedimentos são atributos topográficos secundários com grande potencial de aplicação nos diversos campos das ciências da terra, principalmente na geomorfologia e nas ciências do solo.

O índice corrente de máximo fluxo ( $\Omega$ ) é definido pelo produto da área específica de contribuição ( $A_c$ ) e a tangente da declividade ( $\beta$ ), conforme a equação 10.

$$\Omega = A_c \tan \beta \quad (10)$$

Onde  $A_c$  é a área específica de contribuição para o ponto central da janela (Figura 3.2-c). Isto é,  $A_c = (3\lambda * 3\lambda)$ . Ou seja, a área específica de contribuição ( $A_c$ ) é definida como o número de células, ou área, que contribui com o volume total de água, de uma determinada célula, é a área acumulada a montante por unidade de largura, transversal ao sentido do fluxo. (Figura 3.4).

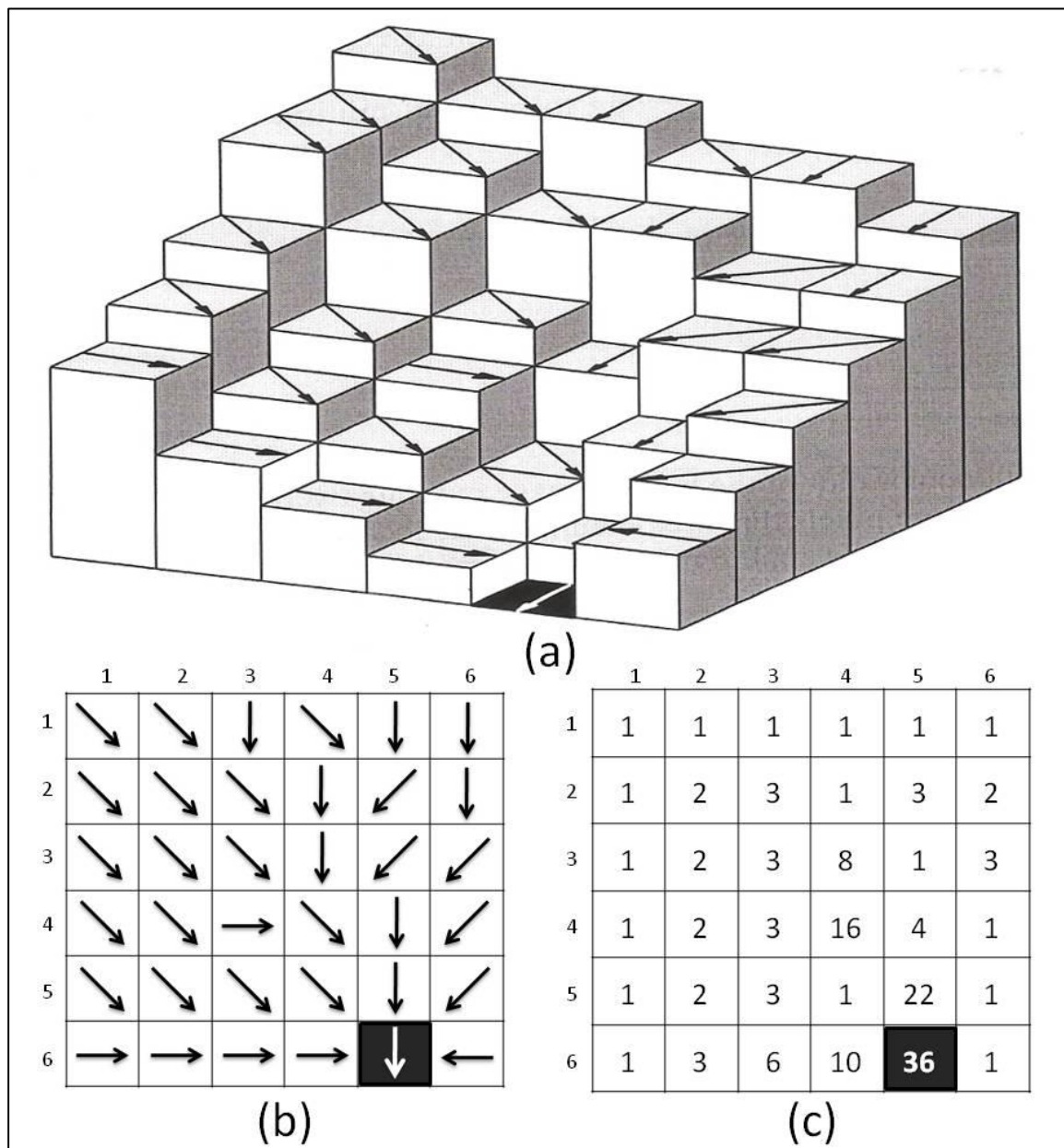


FIGURA 3.4 – MODELO DIGITAL (a); DIREÇÃO DO FLUXO (b); ÁREA ESPECÍFICA DE CONTRIBUIÇÃO ( $A_c$ ), ACUMULAÇÃO DO FLUXO OU ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (c)

FONTE: ADAPTADO DE TRAUTH (2007)

Observando a Figura 3.4, percebe-se a partir do modelo digital, que a área específica de acumulação na célula 1x1 (linha 1, coluna 1) é igual à área de uma célula apenas, ou seja, é igual a área da própria célula, uma vez que nenhuma outra célula contribui com ela. Na célula 2x2, a  $A_c$  é igual a soma da área de duas células, isto é, além da área da própria célula (2x2) têm ainda a contribuição da área da células 1x1. Essa analogia é feita para todas as células da área em estudo. Portanto, o índice corrente de máximo fluxo, de capacidade de transporte de sedimentos e da umidade topográfica são determinados a partir da vizinhança global e não, localmente, como ocorre com os índices primários.

O segundo índice usado é de umidade, definido pelo logaritmo natural da razão entre área de contribuição ( $A_c$ ) e a tangente da declividade ( $\beta$ ), de acordo com a equação 11.

$$w = \ln\left(\frac{A_c}{\tan \beta}\right) \quad (11)$$

A equação 11 mostra que o índice de umidade é função apenas da declividade e varia com as funções tangentes e logaritmo natural. Assim, esse índice está sujeito à seguinte restrição:  $0^\circ < \beta < 90^\circ$ . Analisando a equação 11, percebe-se que quando a declividade aproxima de  $0^\circ$ , o limite dessa função tende para infinito e, quando declividade 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 com caráter hidromórfico.

O índice capacidade de transporte de sedimentos ( $\tau$ ) é outro importante atributo topográfico secundário empregado no trabalho. Suas variáveis são a área de contribuição específica ( $A_c$ ) e  $\beta$ , conforme descrito na equação 12.

$$\tau = \left(\frac{A_c}{22.13}\right)^m \left(\frac{\text{sen}\beta}{0.0896}\right)^n \quad (12)$$

As constantes  $m$  e  $n$  apresentam os valores de respectivamente 0.6 e 1.3.

Este índice mensura a capacidade de transporte de sedimentos, varia com uma senoidal, conforme aponta a equação 10. Quanto maior a declividade do terreno ( $\beta$ ) e mais alto valor da  $A_c$ , maior é a capacidade de transporte de sedimentos e, por consequência, os solos formados nessa condição serão menos desenvolvidos.

O índice de capacidade de transporte de sedimentos ( $\tau$ ) está negativamente correlacionado com o índice de umidade ( $w$ ) e positivamente correlacionado com o índice de corrente de máximo fluxo ( $\Omega$ ).

### **3.2.4. Relação entre unidades de solos e atributos topográficos**

Para a avaliação das relações entre atributos topográficos derivados do MDT com unidades de solos existentes na área de estudo foi necessário executar três etapas principais: a) obter unidades de mapeamento convencionais de solos pré-existent na bacia do arroio do Corvo; b) discretizar os atributos topográficos em classes intervalares representativas e c) sobrepor as informações para analisar os resultados.

#### **3.2.4.1. Organização dos mapas de solos**

Os dois mapas de solos pré-existent sobre a área de estudo foram elaborados por Rocha (1990) e Lima (2005), ambos foram armazenados em um banco de dados geográfico em SIG organizado para bacia hidrográfica do arroio do Corvo, a fim de realizar análises espaciais por sobreposição com os atributos topográficos.

O mapa de solos elaborado por Rocha (1990) na escala 1:10.000 passa a ser designado no trabalho como mapeamento 01. Por apresentar nomenclatura do antigo sistema brasileiro de classificação, anterior aos SiBCS de EMBRAPA (1999) e EMBRAPA (2006), foi necessário efetuar a reclassificação para o novo sistema com base em análises de solos da área e verificação de campo. As unidades de solos delimitadas de modo expedito por Lima (2005) são designadas de mapeamento 02, foram extraídas do mapeamento de solos da bacia do rio Canguiri na escala 1:35.000.

#### **3.2.4.2. Discretização dos atributos topográficos**

A discretização dos valores hipsométricos considerou intervalos com agrupamento entre duas curvas de nível e classes que melhor se adequassem na representação da distribuição da elevação, conforme distribuição dos valores apresentadas no histograma das classes (Figura 3.5a). Resultou no conjunto de seis classes de elevação: valores inferiores a 905 m; entre 905 a 915 m, 915 a 925 m, 925 a 935 m, 935 a 945 m e superior a 945 m.

Os intervalos de declividade discretizados do atributo  $\alpha$  foram escalonados segundo os critérios de EMBRAPA (1999 e 2006): inferiores a 3% representam relevo plano, entre 3 a 8% relevo suave ondulado, 8 a 20% relevo ondulado, 20 a 45% relevo forte ondulado, entre 45 a 75% relevo montanhoso e superior a 75% relevo escarpado (Figura 3.5b).

O atributo plano de curvatura apresenta valores positivos, reclassificados por segmentos de vertente com convergência de linhas de fluxo, valores negativos atribuídos como segmentos divergentes e valores nulos, igual ou próximo de zero, que corresponde a áreas planares. A Figura 3.5c apresenta a discretização dessas três categorias no histograma, onde foram utilizados valores superiores a 0,01 para representar segmentos vertentes côncavos, inferior a -0,01 para convexos e entre -0,01 a 0,01 segmentos retilíneos. A escolha dos intervalos entre as classes foi feita de modo arbitrário, semelhante aos critérios de Valeriano e Carvalho Júnior (2003), que determinaram com base na apreciação visual dos mapas resultantes, de modo que a distribuição territorial das classes apresentasse um indicador diferenciado entre os tipos de relevo descritos.

O perfil de curvatura segue a mesma ordenação do atributo plano, cujos valores positivos correspondem a segmentos de vertentes convexos, os negativos segmentos côncavos e valores nulos, igual ou próximo de zero, corresponde a segmento retilíneo (VALERIANO, 2003). A Figura 3.5d apresenta a discretização em três categorias, valores superiores a 0,01 para representar segmentos vertentes côncavos, inferior a -0,01 para convexos e entre -0,01 a 0,01 segmentos retilíneos. Esses parâmetros foram determinados obedecendo as características topográficas da área de estudo.

Nos atributos topográficos secundários a discretização das classes foi orientada pela morfologia do relevo da área e nas unidades de mapeamento de solos existentes. Os intervalos apresentam subjetividade na sua separação e os valores apresentados nos índices são adimensionais.

O índice corrente de máximo fluxo foi discretizado em quatro classes, segundo apresentado no histograma dos valores apresentados (Figura 3.5e): ICMF1 com valores entre 0 e 5, ICMF2 com valores entre 6 e 15, ICMF3 com valores entre 16 e 30 e ICMF4 com valores entre 31 e 152. O índice capacidade de transporte de sedimentos procedeu a discretização de cinco classes: ICTS1 com valor igual a zero, ICTS2 com valor igual a 1, ICTS3 com valores entre 2 e 3, ICTS4 com valores entre 4 e 6 e ICTS5 com valores entre 7 e 34, conforme representação no histograma (Figura 3.5f).



10, IU5 igual a 11 e IU6 entre 12 e 27 (Figura 3.5g). Outras tentativas de classificação não apresentaram relações adequadas com os mapas de solos da área, principalmente com os de caráter hidromórfico e unidades presentes nos interflúvios. Tais resultados são semelhantes aos valores encontrados por Moore *et al.* (1993) e Chagas (2006).

#### 3.2.4.3. Sobreposição dos mapas convencionais com os atributos topográficos

As operações foram realizadas com aplicações de SIG, elaborado para a pesquisa. As classes de solos dos mapeamentos 1 e 2 foram sobrepostas com cada um dos atributos topográficos, resultando em percentuais de interseção entre as unidades de solos com as classes discretizadas dos atributos topográficos. As análises das relações foram obtidas a partir de tabelas e figuras elaboradas a partir das sobreposições.

### 3.2.5. Métodos adotados para identificação de unidades preliminares de solos

Foram aplicados dois métodos para predição de unidades preliminares de mapeamento de solos. Um deles faz a integração dos atributos topográficos por meio de sobreposição de temas para calcular matrizes, designado como método por tabulação cruzada, e outro executa a integração por RNA.

#### 3.2.5.1. Método de integração dos atributos topográficos por tabulação cruzada

Esse método se constitui na sobreposição das classes dos atributos topográficos na forma de matrizes, nas quais são executadas operações de cálculo dentro de um ambiente de SIG, considerando pesos atribuídos. Esse processamento foi realizado no *software ArcGis* 9.3.1 com o módulo *Spatial Analyst*.

Foram primeiramente atribuídos pesos às classes de cada um dos atributos utilizados, considerando o potencial de atuação da morfogênese. Na primeira matriz, a variável índice de capacidade de transporte de sedimentos foi discretizada em cinco classes, cujos pesos variam em valor crescente conforme maior capacidade de transporte de sedimentos ( $\tau_1=1$ ,  $\tau_2=2$ ,  $\tau_3=3$ ,  $\tau_4=4$  e  $\tau_5=5$ ) e a declividade em quatro classes que receberam pesos de valor ascendente segundo aumento na inclinação do terreno (0-3% - plano=1, 3-8% - suave ondulado=2, 8-20% - ondulado=3 e 20-45% - forte ondulado=4).

A matriz de tabulação das duas variáveis (Tabela 3.1) demonstra que há 20 combinações resultantes; dentre elas 14 ocorrem na área de estudo. As que representam muito baixo ICTS em relevo plano (11, 12) foram agrupadas, as que representam valores entre baixo a alto ICTS em relevo ondulado e/ou médio e alto ICTS em relevo plano foram consideradas em outro agrupamento e as restantes constituem um novo grupo. Assim as combinações resultaram em três agrupamentos: a) **Grupo 1**: 11 e 12, onde os processos erosivos são mais brandos, porém os deposicionais são fortemente atuantes, que equivale a atuação da morfogênese em detrimento da pedogênese; b) **Grupo 2**: 13,14, 21, 22, 23 e 24, nele os processos morfogenéticos erosionais e deposicionais são inferiores aos pedogenéticos e c) **Grupo 3**: 31, 32, 33, 34, 35 e 45, demonstrando que a morfogênese prevalece em relação à pedogênese.

TABELA 3.1 - MATRIZ DE TABULAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS DECLIVIDADE x ICTS

	Classes ( $\alpha$ )	Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos				
		$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$
declividade	0-3%	11	12	13	14	15
	3-8%	21	22	23	24	25
	8-20%	31	32	33	34	35
	20-45%	41	42	43	44	45

Outra combinação considerada foi a variável índice topográfico de umidade, discretizado em seis classes cujos pesos atribuídos seguem a lógica de menores valores para área com maior acúmulo de umidade e maiores valores para as áreas melhor drenadas ( $w_1=1$ ,  $w_2=2$ ,  $w_3=3$ ,  $w_4=4$ ,  $w_5=5$  e  $w_6=6$ ) e o índice de corrente de máximo fluxo que contém quatro classes sendo designados pesos em valor crescente segundo representação de aumento na corrente de fluxo ( $\Omega_1=1$ ,  $\Omega_2=2$ ,  $\Omega_3=3$  e  $\Omega_4=4$ ).

A segunda matriz de tabulação resultante (Tabela 3.2) apresenta 24 combinações possíveis, das quais 21 ocorrem na área de estudo. Essas foram organizadas em cinco agrupamentos: a) **Grupo 1**: 15, 16 e 26, nele ocorrem altos valores de umidade e baixos de corrente de fluxo hídrico, que representa áreas mal drenadas com saturação e estagnação hídrica; **Grupo 2**: 12, 13, 14, 23, 24 e 25, apresenta valores de umidade intermediários tendendo a baixo e valores baixos de corrente de fluxo hídrico, que indica áreas com forte influência hídrica, porém drenadas e com pouca atuação de processos erosionais; **Grupo 3**: 11, 21 e 22, demonstra baixa umidade e baixa corrente de fluxo hídrico, que expressam áreas muito bem drenadas com maior atuação da pedogênese em detrimento da morfogênese;

**Grupo 4:** 31, 32, 33, 34 e 35, representa áreas com valores de umidade diversos associada a intermediária tendendo a elevada corrente de máximo fluxo, que constituem área não saturadas porém com influência hídrica com maior atuação dos processos morfogênicos erosiconais e **Grupo 5:** 41, 42, 43 e 44, constituído de elevados valores de corrente de fluxo combinados a valores baixos à intermediários de umidade, representando áreas melhor drenadas com forte atuação erosivas.

TABELA 3.2 - MATRIZ DE TABULAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS ICMF x IU

Índice de Corrente de Máximo Fluxo	Índice Topográfico de Umidade					
	w6	w5	w4	w3	w2	w1
Ω1	16	15	14	13	12	11
Ω2	26	25	24	23	22	21
Ω3	36	35	34	33	32	31
Ω4	46	45	44	43	42	41

Por fim, os agrupamentos resultantes foram integrados em outra matriz de tabulação (Tabela 3.3), constituída por três colunas que são os grupos  $\alpha \times \tau$  e cinco linhas dos grupos  $\Omega \times w$ . O resultado da tabulação cruzada foi organizado em cinco agrupamentos, a) unidade 1: 11; b) unidade 2: 12, 21 e 22; c) unidade 3: 31 e 32; d) unidade 4: 13, 23, 33, 42 e 43; e) unidade 5: 51 e 52. Esses representam unidades geomórficas de paisagem, que expressam a dinâmica do ambiente em função da morfologia do relevo. Assim, partindo da interpretação do relevo para a predição de unidades de solos na bacia do arroio do Corvo, as unidades geomórficas levaram a classificação de três classes preliminares de solos presentes na bacia, em nível de ordem: a) Cambissolos representados pelas unidades geomórficas 4 e 5; b) Latossolos pelas unidades 2 e 3; c) Organossolos+Gleissolos pela unidade 1.

TABELA 3.3 - MATRIZ DE TABULAÇÃO PARA OBTENÇÃO DAS UNIDADES GEOMÓRFICAS

Agrupamento de classes ( $\Omega \times w$ )	Agrupamento de classes ( $\alpha \times \tau$ )		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Grupo 1	11	12	13
Grupo 2	21	22	23
Grupo 3	31	32	33
Grupo 4	41	42	43
Grupo 5	51	52	53

### 3.2.5.2. Integração dos atributos topográficos por RNA

Na predição das unidades de mapeamento dos solos classificadas por RNA foi utilizado o programa *MatLab*, que possui um módulo de redes neurais, denominado de *Neural network toolbox for use in MatLab*. A grande flexibilidade na manipulação e formatação de arquivos e diversidade de algoritmos implementados eficientemente (funções de ativação e transferência), foi o que justificou a escolha do programa.

#### 3.2.5.2.1. Levantamento de amostras para a RNA

A utilização de uma RNA se inicia com o processo de treinamento, com um conjunto de amostras de treinamento e outro para validação ou teste [verificação], coletado de modo independente um do outro (CHAGAS, 2006). Treinar uma RNA, segundo Ribeiro (2003) significa ajustar pesos de forma que o vetor de saída coincida com certo valor desejado de cada vetor de entrada.

Para isso, foram coletados pontos de forma distribuída em toda a bacia, totalizando setenta e cinco amostras de treinamento e vinte e cinco amostras de verificação para cada classe (Figura 3.6). Tomou-se a precaução de que as amostras estivessem bem distribuídas, de forma representativa, entre as classes na área de estudo. Assim, os pontos amostrais se referem a três classes de solos em nível de ordem, no primeiro nível taxonômico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de EMBRAPA (2006): Latossolo, Cambissolo e associação Organossolo + Gleissolo.

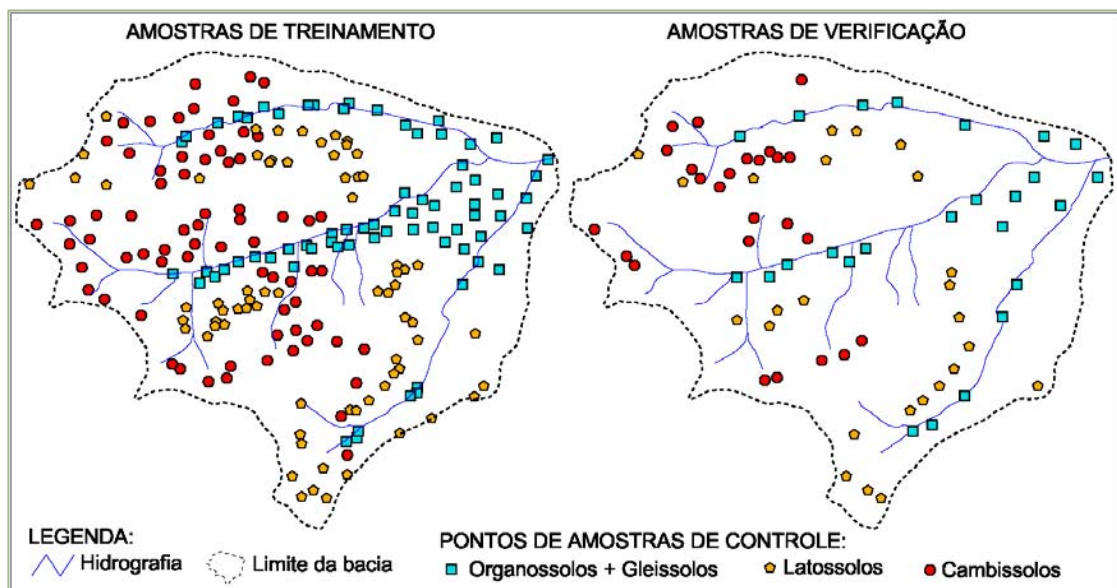


FIGURA 3.6 - AMOSTRAS DE TREINAMENTO E VERIFICAÇÃO DA RNA

A quantidade de amostras utilizadas no treinamento da RNA foi definida após diversos testes preliminares e, neles, foram verificados que com uma quantidade inferior de amostras de treinamento por classe não foram atingidos resultados satisfatórios no aprendizado da rede. Entretanto, uma quantidade maior de amostras também não melhorou o resultado do aprendizado, além de tornar o processamento mais lento.

Para cada ponto amostral, além da classe de solo foram associados os valores das variáveis consideradas (Tabela 3.4). Para isso foram extraídos das matrizes o valor dos atributos topográficos primários, secundários e a geologia nos pontos de treinamento e verificação. Visando evitar erros ocasionados por dados espúrios foi utilizado o valor médio do pixel sobre a amostra e dos quatro pixels vizinhos, nas direções norte, sul, leste e oeste (Figura 3.7). O que permitiu à rede associar a distribuição dos solos de acordo com os valores das variáveis, viabilizando a classificação. O levantamento das amostras e extração dos valores das variáveis foi executado em ambiente SIG no *software ArcGis* versão 9.3.1.

TABELA 3.4 – EXEMPLO DAS AMOSTRAS DE DADOS COLETADAS NO TREINAMENTO E VERIFICAÇÃO DA RNA COM OS VALORES DAS VARIÁVEIS

UTM (E)	UTM (N)	Z	$\alpha$	$\Omega$	$\tau$	w	$\psi$	$\phi$	g	s
688338	7188893	939	3	17	1	9	-0,0630	-0,1170	2	2
688339	7189178	936	3	31	2	10	0,0134	-0,0206	2	2
688638	7189204	924	1	29	1	11	0,0097	0,0317	1	1
688868	7189234	926	3	3	0	8	0,0438	-0,0886	2	2
689040	7189315	922	2	1	0	7	0,1488	-0,0509	2	2
688942	7189315	923	9	17	3	7	0,0191	-0,0607	2	2
688335	7189392	935	5	46	4	9	-0,0207	0,0171	2	2
689271	7189434	914	4	36	3	9	0,0289	0,1044	2	2
688964	7189479	914	0	10	0	12	-0,0464	0,1231	1	1
688377	7189552	939	3	21	2	9	-0,0157	0,0047	2	3
687955	7189594	930	12	106	13	8	-0,0083	0,2179	2	3
688408	7189620	941	2	4	0	8	0,1135	-0,0662	2	3
689275	7189771	906	2	72	3	11	0,0106	0,0079	2	2
688579	7189826	920	5	61	5	9	0,1762	0,0713	2	3
687877	7189838	916	4	62	4	10	0,0132	0,0128	2	2
687473	7189867	931	18	59	12	7	-0,0939	0,1891	2	3
687275	7189957	932	12	37	7	7	0,0019	-0,1761	2	3
688895	7190116	907	3	91	4	11	0,0089	-0,0015	2	2
688967	7190142	905	3	103	5	11	0,0099	-0,0262	2	2
688533	7190235	903	1	49	2	12	-0,0115	0,0196	1	1
etc										

NOTA: Z – HIPSOMETRIA;  $\alpha$  – DECLIVIDADE;  $\Omega$  – ÍNDICE DE CORRENTE DE MÁXIMO FLUXO;  $\tau$  – ÍNDICE DE CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS; w – ÍNDICE DE UMIDADE;  $\psi$  – PLANO DE CURVATURA;  $\phi$  – PERFIL DE CURVATURA; g – GEOLOGIA (CLASSES: 1 – SEDIMENTOS HOLOCÊNICOS E 2 – FORMAÇÃO GUABIROTUBA; s – SOLOS (CLASSES: 1 – ORGANOSSOLO+GLEISSOLO, 2 – LATOSSOLO, 3 – CAMBISSOLO)

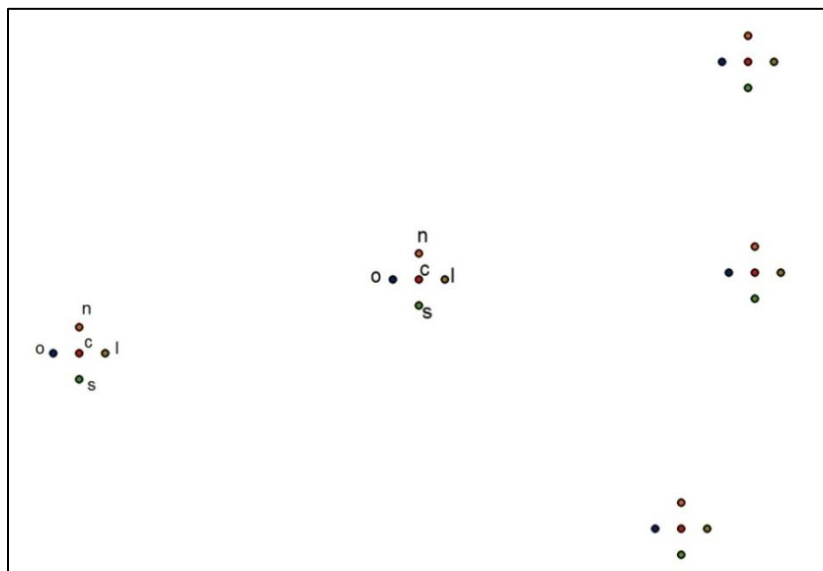


FIGURA 3.7 – EXEMPLO DE COLETA DE AMOSTRAS COM CINCO PIXELS  
 NOTA: c) AMOSTRA DO PIXEL CENTRAL; PIXELS NO RAIOS DE CINCO METROS DO CENTRO: n) AO NORTE; s) AO SUL; o) À OESTE E l) - À LESTE

Os valores das variáveis foram reescalados entre o intervalo 0 e 1, para facilitar o processo de treinamento da rede. De acordo com Chagas (2006), este procedimento é necessário para evitar a saturação da rede, uma vez que valores muito elevados podem impedir a convergência da rede.

As amostras de treinamento foram intercaladas no arquivo para que o treinamento da rede não se tornasse tendencioso; os valores das amostras foram reescalados entre zero e um. Esses dois processos foram executados no *software MatLab*.

#### 3.2.5.2.2. Arquitetura e algoritmo de aprendizado da RNA

A estruturação da arquitetura de uma RNA consiste em determinar o número de camadas e a quantidade de neurônios por camada. A arquitetura foi determinada a partir de uma extensa série de experimentos, até que foi encontrada a mais apropriada, que garantisse a melhor convergência com o menor número de iterações, resultando em uma resposta coerente com as amostras de verificação.

A RNA utilizada se constitui de quatro camadas (Figura 3.8): 1) camada de entrada com oito neurônios, que correspondem às variáveis empregadas; 2) primeira camada intermediária escondida (interna) com cento e trinta neurônios, sendo esse número estabelecido por tentativa e erro, conforme sugerido por Hirose *et al.* (1991), adicionando ou retirando neurônios nas camadas escondidas conforme o comportamento do erro durante a fase de treinamento; 3) segunda camada escondida com quarenta e três neurônios, uma vez que

considerou-se a regra de Hilton (1989) que, no caso de duas camadas intermediárias, o número de nós da segunda não deve exceder um terço do conjunto de nós da primeira; e 4) camada de saída com três neurônios, que representam as classes de solos.

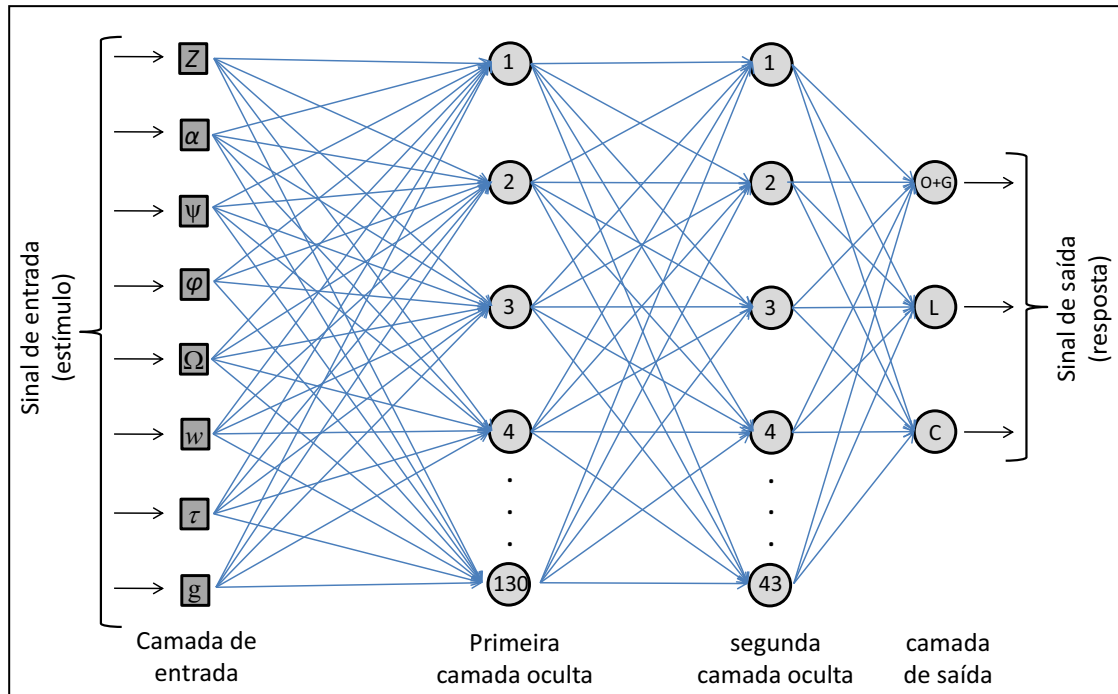


FIGURA 3.8 – ARQUITETURA DA RNA *PERCEPTRON MULTICAMADAS* UTILIZADA

A arquitetura da RNA adotada foi de multicamadas, com alimentação adiante (*feed-forward*), função de transferência sigmóide e algoritmo de aprendizado por retropropagação de erros, otimizada por *resilient*.

A variação retropropagação de erros foi desenvolvida por Reidmiller e Braun (1993) no intuito de minimizar as oscilações nos ajustes dos pesos no treinamento da RNA, a fim de atingir o menor de número de iterações e menor erro médio quadrático (EMQ) (RIBEIRO, 2003). No trabalho o EMQ foi determinado como mínimo de 0,001.

O *backpropagation* é o mais popular algoritmo de treinamento supervisionado, por apresentar características de robustez e flexibilidade, por isso vem sendo empregado em classificação de imagens. Suas principais complexidades são definir a taxa de erro de aprendizado e do termo de momento, pois a partir dessas taxas os pesos são alterados em consequência dos erros (RUMMELHART *et al.*, 1986 apud RIBEIRO, 2003)

Para Chagas (2006) a determinação da taxa de aprendizado para um problema específico não é uma tarefa simples, sendo que os valores mais típicos utilizados estão na faixa de 0,1 a 1,0. No trabalho, a taxa de aprendizado, também apresentada como taxa de distribuição do erro cometido no aprendizado, foi determinada como mínimo de 0,1,

associada ao número máximo de 15.000 épocas (número de iterações), sendo exibidas a cada conjunto de 50 iterações. A taxa de momento do erro cometido no aprendizado ("*momentum*") é de no mínimo 0,09 e o erro de aprendizado ("performance") deve ser inferior a 0,0001.

#### 3.2.5.2.3. Classificação das unidades preliminares de solo por RNA

As variáveis dos atributos topográficos obtidos de MDT e geologia, utilizadas na forma de imagens, foram combinadas em diferentes conjuntos e avaliadas quanto à capacidade de discriminação das unidades de solos.

Tendo-se as variáveis pré-processadas e utilizando como nível de abstração o *pixel*, foram coletadas amostras de treinamento para o aprendizado da rede, posteriormente foram executados testes de verificação a fim de obter a melhor combinação para classificação das unidades preliminares de solos na área de estudo.

#### 3.2.5.2.4. Avaliação de influência das variáveis nas unidades de solo

Com o intuito de avaliar a representatividade e influência de cada variável de entrada na delimitação de unidades de solo, foi empregado o método de validação cruzada múltipla, conhecido como método "deixe um de fora" (HAYKIN, 2001). Seu procedimento se dá pela substituição de uma das variáveis da rede por uma imagem de valor zero. Esse processo é repetido para todas as combinações que se queira avaliar.

Nesse trabalho foi primeiramente obtido um mapa preliminar de solos a partir da modelagem por RNA com o conjunto de todas as variáveis. Em seguida uma das variáveis foi substituída pela imagem zero, ou seja, a variável não foi considerada na modelagem para delimitar outra predição. Na próxima modelagem, a variável anterior foi reinsertada e uma segunda substituída pela imagem zero, assim sucessivamente para todas as variáveis. Este procedimento buscou avaliar a importância da variável deixada de fora na modelagem em questão. Em uma das situações testadas foram consideradas apenas quatro variáveis de entrada: declividade, ICMF, IU e ICTS, as mesmas empregadas no método de classificação por tabulação cruzada.

Os critérios utilizados na comparação das unidades de solos classificadas com o todas as variáveis, com as identificadas pelos conjuntos que apresentam ausência de uma variável ou mais, foram o menor número de iterações, que reflete na melhor convergência da rede (Figura 3.9), os valores de coeficiente Kappa e da exatidão global (EG).

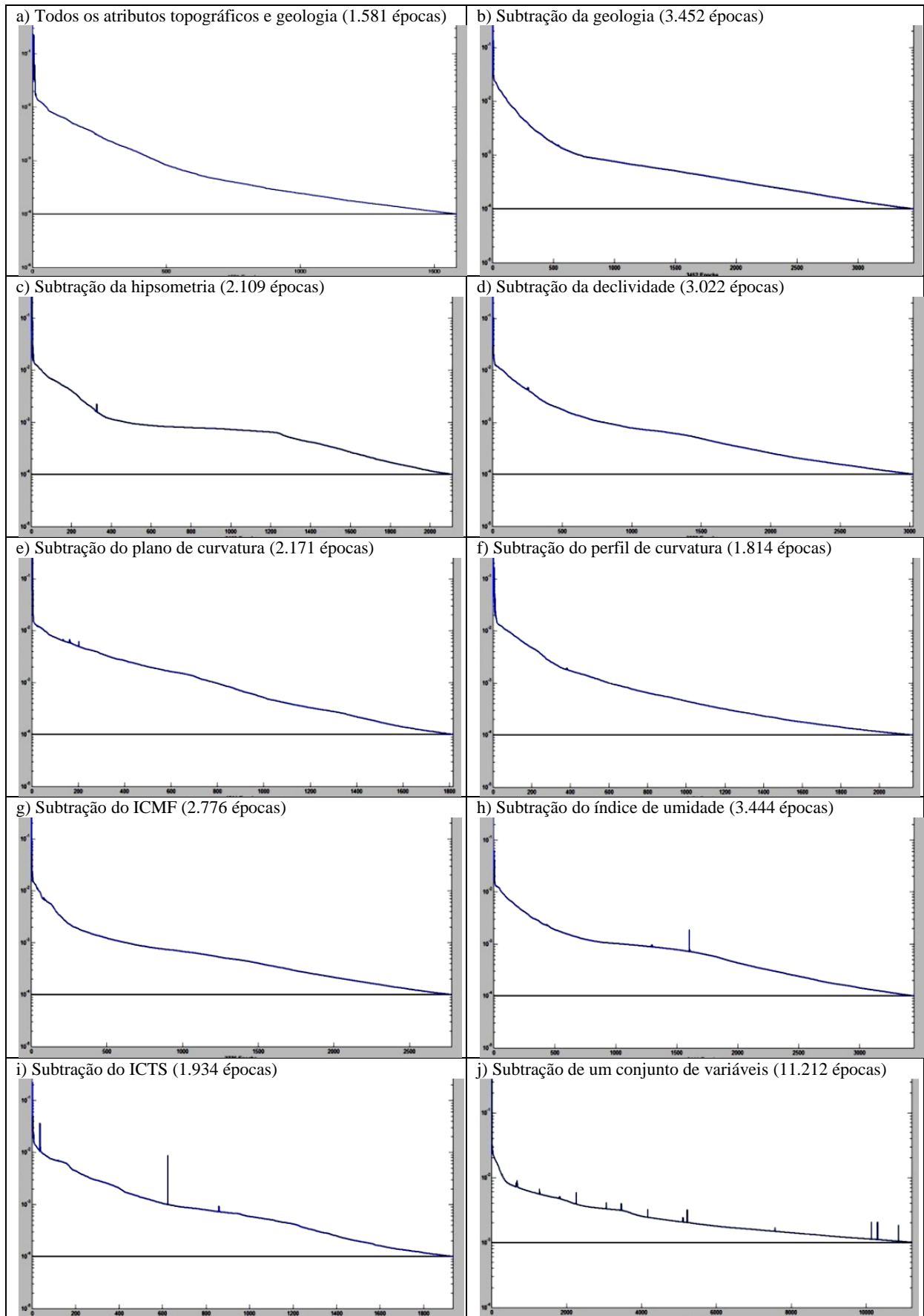


FIGURA 3.9 – GRÁFICO DE CONVERGÊNCIA DA RNA NOS TESTES DE VALIDAÇÃO CRUZADA

Nota: performance da rede apresentada no eixo Y do gráfico e número de épocas para convergência no eixo X

### 3.2.5.2.5. Generalização

Depois do treinamento foi efetuada a generalização, que consiste na aplicação do modelo matemático a todos os dados originais, não apenas aqueles usados no treinamento.

Para cada conjunto de variáveis foi executada a generalização, a qual gerou uma imagem classificada. Esta imagem foi submetida a um filtro não linear de mediana, para retirada de ruídos. A escolha desse filtro deu-se por que as bordas não são degradadas em extremo, e os valores originais são preservados (CENTENO, 2003).

### 3.2.5.3. Validação dos mapas preliminares com pontos de controle e apoio de campo

Os mapas preliminares de solos classificados pela RNA e por tabulação cruzada foram validados por um conjunto de 53 pontos de controle obtidos em trabalhos de campo por meio de observações e coletas de solo com descrição morfológica, seguindo a proposta de Lemos e Santos (2002), além de dados amostrais complementares descritos por Sugamoto (2002) e Lima (2005).

### 3.2.5.4. Comparação entre unidades de solos classificadas por tabulação cruzada e RNA com mapas de solos convencionais

Antes de realizar as comparações entre as unidades de solos classificadas com os mapeamentos pré-existentes na área de estudo, no intuito de avaliação da qualidade, os mapeamentos convencionais 01 e 02 foram comparados entre si, com as classes apresentadas em nível de ordem (EMBRAPA, 2006), com o objetivo de evidenciar o nível de exatidão que existe entre os dois mapas levantados por dois diferentes autores.

As unidades preliminares mapeadas por tabulação cruzada e RNA foram avaliadas entre si e também comparadas com os mapeamentos pré-existentes 01 e 02, cujos parâmetros utilizados nas avaliações de qualidade de imagem foram obtidos pelo coeficiente Kappa, Exatidão Global (EG) e acurácia do ponto de vista do usuário e produtor, por meio da análise da matriz de erros, também denominada de matriz de confusão.

A exatidão global é definida computando o número de pixels corretamente classificados, conforme equação 13:

$$EG = \frac{nc}{nt} \quad (13)$$

Onde:

$nc$  corresponde ao número de pixels corretamente classificados;

$nt$  ao número de pixels total da matriz.

A exatidão global não permite maiores conclusões, como por exemplo, determinar qual classe foi melhor classificada ou quais classes encontram-se associadas à maior confusão e são responsáveis pela maior parcela de erros. Uma melhor avaliação é obtida por meio da matriz de confusão (CENTENO, 2003).

Por meio da exatidão global representa-se também o percentual de concordância, uma vez que se EG for igual a 0,72, a concordância entre dois mapas analisados (C%) será igual a 72%, sendo a discordância (D%) igual a 28%. Assim, C% e D% são outros parâmetros de avaliação dos mapas. A espacialização das concordâncias e discordâncias é também apresentada, obtidas pela sobreposição entre os mapas na forma de dados matriciais.

Segundo Moreira (2001), o coeficiente Kappa é um método muito utilizado para avaliar a concordância ao comparar imagens, 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. Segundo o autor, para a determinação do valor Kappa emprega-se as equações a seguir (equações 14, 15 e 16):

$$K = \frac{Po - Pc}{1 - Pc} \quad (14)$$

$$Po = \frac{\sum_{i=1}^M n_{ij}}{N} \quad (15)$$

$$Pc = \frac{\sum_{i=1}^M n_{i+} n_{+j}}{N^2} \quad (16)$$

Onde:

$Po=EG$ , que corresponde a exatidão global (ou geral);

$Pc$  é a proporção de unidades que concordam por casualidade;

$M$  é o número de classes presentes na matriz de erro;

$n_{ij}$  representa o número de observações na linha  $i$  e coluna  $j$ ;

$n_{i+}$  e  $n_{+j}$  são os totais marginais da linha  $i$  e coluna  $j$ , respectivamente;

$N$  refere-se ao número total de unidades amostrais completadas na matriz.

A Matriz de Confusão, também denominada de matriz de erros, segundo Centeno (2003) é uma forma de representar as contradições entre a verdade de campo e o resultado do

processo de classificação. Nesta matriz 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 do novo mapa classificado, e os elementos da diagonal principal apresentam o nível de concordância entre os dois conjuntos de dados, conforme exemplo apresentado no Tabela 3.5.

TABELA 3.5 - EXEMPLO DE MATRIZ DE ERROS COMPARANDO CLASSES DE SOLOS PREDITAS PELA RNA E O MAPEAMENTO CONVENCIONAL 01

Mapeamento 01 (erros de omissão)	Classes	Unidades mapeamento de solos classificados por RNA (erros de inclusão)			
		Organossolo+Gleissolo	Latossolo	Cambissolo	Soma parcial
	Organossolo+Gleissolo	(acerto) <b>30370</b>	(erro) 6429	(erro) 2875	39674
	Latossolo	(erro) 3847	(acerto) <b>60622</b>	(erro) 14173	78642
	Cambissolo	(erro) 3097	(erro) 19659	(acerto) <b>38001</b>	60757
	Soma parcial	37314	86710	55049	179073

Os erros de omissão e inclusão que constam na matriz de 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, enquanto a taxa de erros de inclusão indica quanto uma classe foi superestimada.

Os erros de inclusão correspondem aos pixels que mesmo pertencendo a outra classe foram incluídos na classe mapeada. Por exemplo, uma classe que foi mapeada como Latossolo no mapa predito por RNA e que, no entanto, constitui um Cambissolo no mapa convencional 01. A Equação 17 apresenta a forma como o erro de inclusão é calculado.

$$Ein(i) = \frac{SC(i) - M(i,i)}{SC(i)} \quad (17)$$

Onde:

$Ein(i)$  significa o erro de inclusão;

$SC(i)$  é a soma parcial da coluna  $i$  da matriz de erros;

$M(i,i)$  são os elementos da diagonal da linha  $i$  da matriz de erros.

Os erros de omissão são pixels que pertencem a 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 Cambissolo no mapa convencional foi mapeada como Latossolo no mapa predito por RNA. A Equação 18 apresenta como o erro de omissão pode ser obtido.

$$Eom(i) = \frac{SL(i) - M(i,i)}{SL(i)} \quad (18)$$

Onde:

$Eom(i)$  significa o erro de omissão;

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

$M(i,i)$  são os elementos da diagonal da linha  $i$  da matriz de erros.

Os erros de omissão e inclusão levam ao conceito de exatidão do ponto de vista do produtor (EP) e exatidão do ponto de vista do usuário (EU), (CENTENO, 2003). A Tabela 3.6 exemplifica valores de exatidão do ponto de vista do produtor e do usuário; também apresenta os demais parâmetros de avaliação utilizados no trabalho para a comparação entre os mapas (EG, K, C% e D%).

TABELA 3.6 – EXEMPLO DOS PARÂMETROS AVALIADOS NA COMPARAÇÃO ENTRE OS MAPAS DE REFERÊNCIA E CLASSIFICADOS

Parâmetros avaliados nas comparações	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Conjunto
Exatidão do ponto de vista do produtor (EP)	76,55%	77,01%	62,50%	
Exatidão do ponto de vista do usuário (EU)	81,39%	69,91%	69,03%	
Exatidão Global (EG)				0,72
Coefficiente Kappa (K)				0,56
Área de concordância entre os mapas (C%)				72%
Área de discordância entre os mapas (D%)				28%

A exatidão do ponto de vista do produtor (EP) 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. Pode ser calculado conforme a Equação 19:

$$EP = \frac{M(i,i)}{SL(i)} \cdot 100 \quad (19)$$

A exatidão do ponto de vista do usuário (EU), demonstra se determinada classe na imagem classificada corresponde a essa na imagem de referencia, 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. EU é calculado por meio da Equação 20.

$$EU = \frac{M(i,i)}{SC(i)} \cdot 100 \quad (20)$$

#### 4. ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO COM UNIDADES DE SOLOS

Os atributos do relevo estão diretamente relacionados com os processos de formação do solo e possuem um grande potencial para serem utilizados em levantamentos pedológicos (KLINGEBIEL *et al.*,1987).

Sob essa perspectiva é importante entender primeiramente quais são as relações entre os limites espaciais das unidades de mapeamento com a topografia do terreno. A abordagem paramétrica do relevo modelada em SIG resulta em variáveis designadas atributos topográficos, que torna mais eficiente e precisa a caracterização do relevo sobre unidades de solos mapeados, por meio da sobreposição de temas.

Assim, o presente capítulo pauta-se na apresentação de resultados e discussões de análises das relações entre classes de dois mapeamentos de solos com atributos topográficos discretizados, derivados da análise digital do relevo. As classes foram obtidas a partir de dois trabalhos de levantamento convencionais de solos na área da bacia do arroio do Corvo. A partir dessa verificação foi possível compreender as congruências entre relevo e solo.

##### 4.1. MAPEAMENTOS DE SOLOS PRÉ-EXISTENTES NA ÁREA DE ESTUDO

Foram selecionados dois mapas de solos pré-existent na área de estudo, para fins de utilizá-los na sobreposição com os atributos topográficos. Ambos foram elaborados por método convencional por Rocha (1990) e Lima (2005), o primeiro na escala 1:10.000 e o segundo 1:35.000.

O mapa de solos elaborado por Rocha (1990) foi classificado de acordo com a antiga nomenclatura, anterior ao atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) da EMBRAPA (1999 e 2006). Nesse mapa havia quinze classes de solos que foram convertidas para o atual SiBCS no quarto nível categórico (subgrupo). Para isso, apoiou-se em um conjunto de amostras de solos levantadas em campo e outras apresentadas por Sugamoto (2002), Lima (2005).

Após a conversão para o atual SiBCS as classes foram agrupadas no segundo nível categórico (subordem), para adequar a sobreposição com os atributos topográficos. As legendas das conversões e nomenclaturas, bem como a área de cada classe e seu percentual de representação na bacia são apresentadas na Tabela 4.1. O mapa de solos adaptado de Rocha

(1990), organizado em nível de subordem, é designado no trabalho como Mapeamento 01 (Figura 4.1).

TABELA 4.1 – CONVERSÃO DE CLASSES DO MAPEAMENTO 01 E SUA DISTRIBUIÇÃO

Classificação antiga	Classificação atual (EMBRAPA, 2006)		Área (ha)	Área (%)
	subgrupo	subordem		
Hoal + HG1	ORGANOSSOLO MÉSICO Sáprico típico + GLEISSOLO HÁPLICO Alítico típico ambos fase campo e floresta tropical perenifólia de várzea, relevo plano a suave ondulado	OY+GX	93,23	21
LVa1	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico úmbrico	LVA	216,84	48
LVa2	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico típico			
LVa3 e LVa4	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico úmbrico			
Ca1 e Ca2	CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico plíntico	CX	99,05	22
Ca3, Ca4, Ca5 e Ca8	CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico			
Ca6	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico			
LVa1+Ca1	Associação LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico + CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico plíntico	LVA+CX	31,73	7
Ca5+LVa1	Associação CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico	CX+LVA	6,90	2
<b>TOTAL</b>			<b>447,75</b>	<b>100%</b>

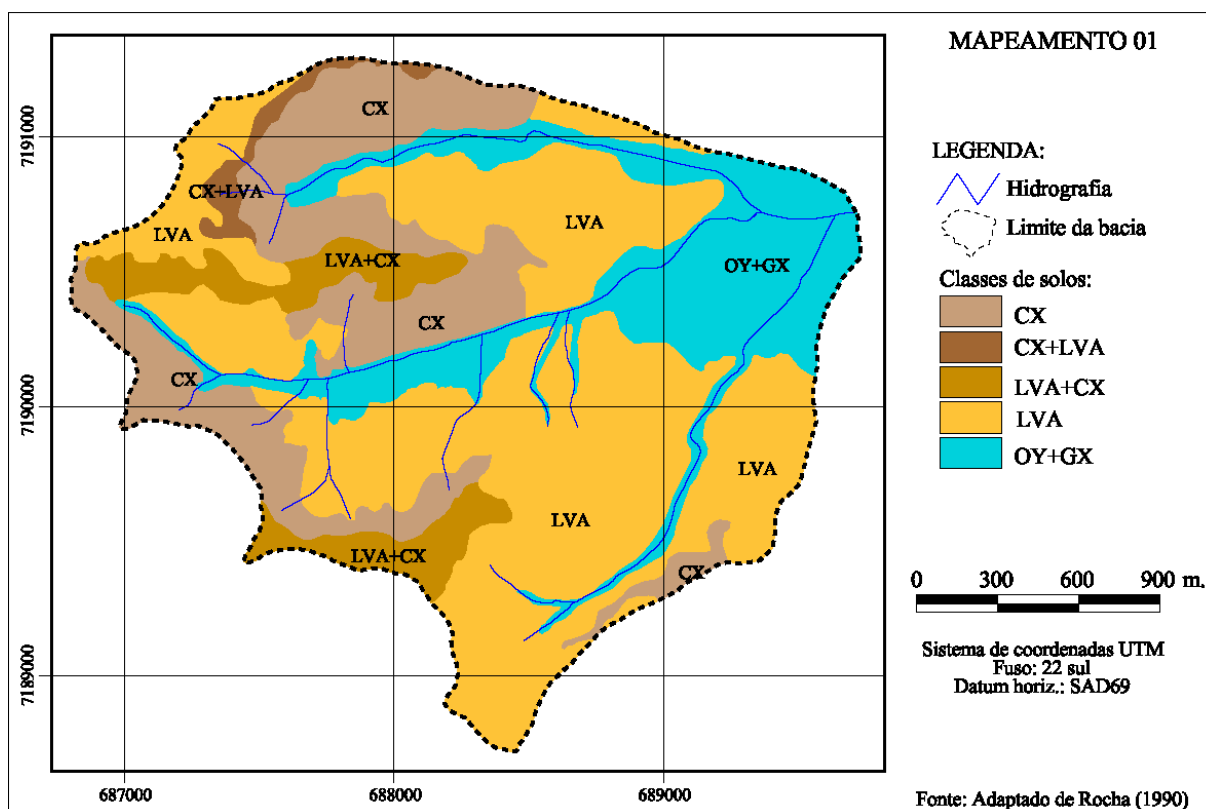


FIGURA 4.1 – MAPEAMENTO 01

Dentre as unidades de solos delimitadas de modo expedito por Lima (2005), ocorrem na área de estudo cinco classes em nível de subgrupo, que seguem o atual SiBCS. No entanto, para uniformizar sua representação com o mapa anterior foram agrupadas em nível de subordem. A descrição dos subgrupos, nomenclatura das subordens e a distribuição em área com percentual das classes na bacia do arroio do Corvo são apresentados na Tabela 4.2. O mapa organizado com as unidades mapeadas por Lima (2005) é designado no trabalho como mapeamento 02 (Figura 4.2).

TABELA 4.2 – DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SOLO DO MAPEAMENTO 02

Classificação atual (EMBRAPA, 2006)		Área	Área
subgrupo	subordem	(%)	(%)
GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico	GX	107,88	24
ORGANOSSOLO MÉSICO Sáprico típico	OY	43,16	10
CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico	CX	18,30	4
Associação CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico típico + CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico	CH	177,41	40
LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	LV	100,75	23
TOTAL		447,50	100

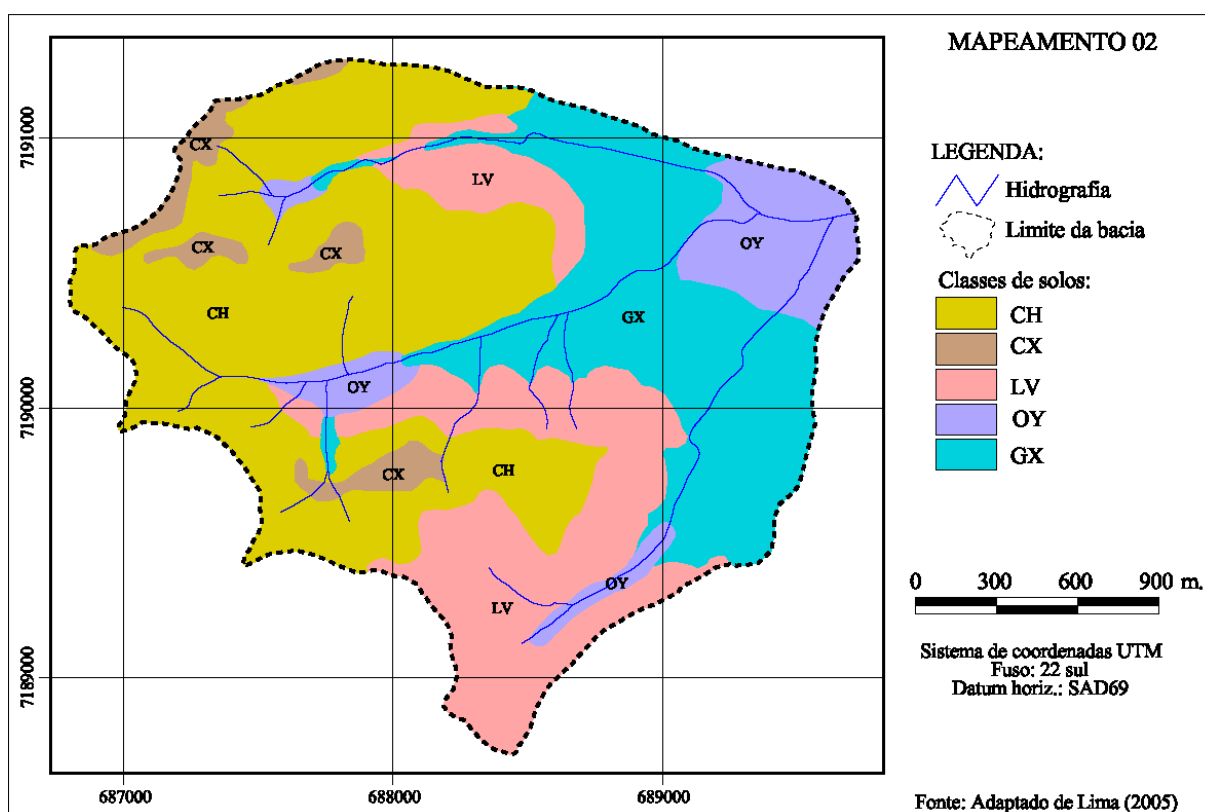


FIGURA 4.2 – MAPEAMENTO 02

Segundo as descrições de Lima (2005) a classe CXvd ocupa posições dos interflúvios, nos divisores de água aplainados, que por serem relativamente estreitos não há, em geral, condições para formação de solos mais evoluídos, tal como os Latossolos; CHa+CHd ocupa áreas de encostas correspondem à porções dissecadas da paisagem, estando usualmente em cotas inferiores aos solos observados em CXvd; GXve ocupa as áreas aplainadas no terço superior e médio das planícies aluviais. Estes solos formam-se pela gleização, em decorrência do regime redutor, que se processa em meio anaeróbico, com muita deficiência ou mesmo ausência de oxigênio, devido ao encharcamento do solo por longo período ou durante todo o ano; OYs é encontrada em áreas amplas e aplainadas no terço inferior e médio das planícies aluviais. O relevo encontrado nesta unidade de mapeamento é predominantemente plano; por último, LVd é encontrada em pedimentos amplos, entre as encostas e a planície aluvial. Possivelmente houve processos de rebaixamento dos topos da paisagem, que devem ter transportado materiais pré-intemperizados para cotas mais baixas, onde se desenvolveram os Latossolos da unidade LVd.

#### 4.2. RELAÇÃO ENTRE UNIDADES DE SOLO E ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

Para verificação das relações entre solos e relevo as unidades de mapeamento de solos obtidas dos mapeamentos 01 e 02 foram sobrepostas às classes discretizadas dos atributos topográficos.

Compreender as coincidências entre as classes das variáveis do relevo permite entender o comportamento dos solos e fazer previsões sobre sua ocorrência, além de indicar quais atributos se mostram mais relacionados, pois as características do relevo estão diretamente relacionadas com os processos de formação do solo e possuem um grande potencial para serem utilizadas em seu mapeamento (KLINGEBIEL *et al.*,1987).

##### 4.2.1. Hipsometria

Os valores hipsométricos na área de estudo variam de 884 a 954 m. As seis classes discretizadas foram: elevação inferior a 905 m, que corresponde a 23% da área da bacia; entre 905 a 915 m (23%); entre 915 a 925 m (19%), entre 925 a 935 m (16%), entre 935 a 945 m (14%) e superior a 930 m (4%). No mapa hipsométrico verificou-se que as menores altitudes estão localizadas na porção leste e no centro da área, nas porções de planícies, enquanto as maiores elevações estão nos interflúvios à noroeste, sul e sudoeste (Figura 4.3).



No mapeamento 02 (Figura 4.2) as duas classes de solos de caráter hidromórfico estão separadas, GX apresenta 65% de sua área representada pela classe 890 a 905 m e 21% pela classe 905 a 915 m, e OY apresenta 71% de sua área na classe 890 a 905 m e 28% da classe 905-915 m; os Latossolos (LV) predominam sobre a classe 905 a 915 com 46% e os Cambissolos CH apresentam maior ocorrência nas classes hipsométricas intermediárias e CX na classe superior 945 m em 56% (Tabela 4.3).

Quando somadas as duas classes hipsométricas de menor elevação, verifica-se que sobre elas a classe de solo OY+GX do mapeamento 01 apresenta sobreposição de 93%, enquanto a sobreposição das classes GX e OY do mapeamento 02 sobre esses intervalos hipsométricos foi de 86% e 99%, respectivamente (Figura 4.4). Assim, observou-se uma estreita relação entre solos de caráter hidromórfico com as classes de menor elevação, principalmente no mapeamento 02 onde o limite da classe GX é, em grande parte, coincidente ao limite da classe inferior a 905 m. Constatou-se, portanto, que na bacia do arroio do Corvo os Gleissolos e Organossolos tendem a ocorrer à jusante em menores elevações, nos ambientes de planícies e em seu entorno.

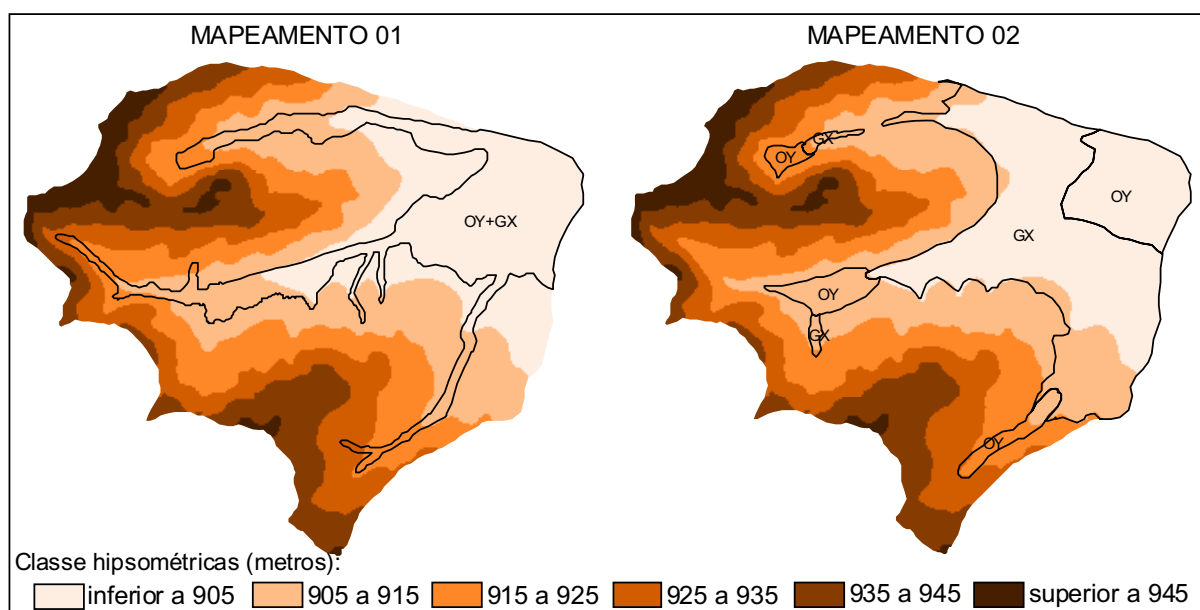


FIGURA 4.4 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX NAS CLASSES HIPSEMÉTRICAS

No mapeamento 01 os Cambissolos estão predominantemente associados à posições hipsométricas intermediárias nas classes 915 a 925 e 925 a 935 m, e mostraram pouca relação com as classes inferior a 905 e superior a 945 m (Figura 4.5). No mapeamento 02 a classe CH apresentou-se também relacionada às classes hipsométricas intermediárias, no entanto CX revelou coincidir em maior área com a classe hipsométrica superior 945 m com 59% de

sobreposição (Tabela 4.3). Essa unidade (CX) do mapeamento 02 apresenta limites similares aos Latossolos que ocorrem em posição de topo e interflúvios do mapeamento 01. Para Lima (2005) embora esta unidade de mapeamento não se enquadre no subgrupo latossólico no SiBCS, pois tem argila de atividade alta (Ta) e não possui estrutura bem desenvolvida do ponto de vista de manejo, seu comportamento é próximo ao dos Latossolos em termos de risco de erosão e podem ser consideradas semelhantes. No mapeamento 02 os limites da unidade de solo CH são aproximados aos da classe hipsométrica 905 a 915 m e CX mostra-se relacionada com a classe superior a 945 m (Figura 4.5).

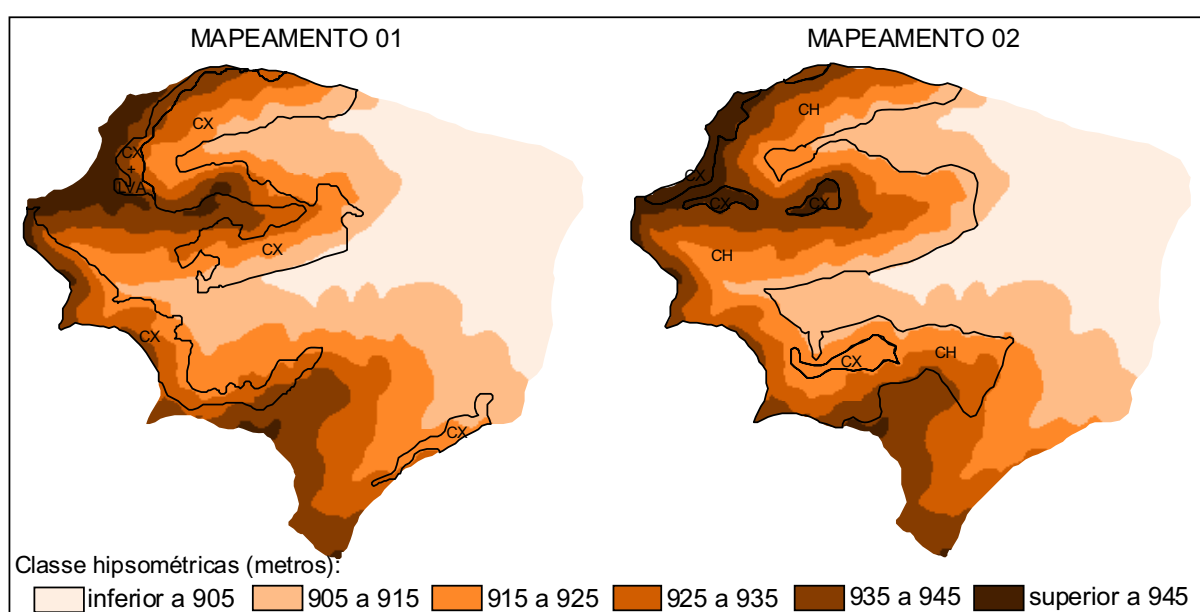


FIGURA 4.5 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS NAS CLASSES HIPSOMÉTRICAS

No mapeamento 01 os Latossolos predominam na área da bacia, ocorrem nas porções mais elevadas associados aos topos residuais aplanados e nas posições mais baixas associados ao retrabalhamento de material (Figura 4.6). No mapeamento 02 aparecem exclusivamente em posições inferiores do relevo, predominando em elevações entre 905-915 m, com 46%, (Tabela 4.3). Os Latossolos em posição de topo do mapeamento 01 estão classificados no mapeamento como Cambissolo (CX).

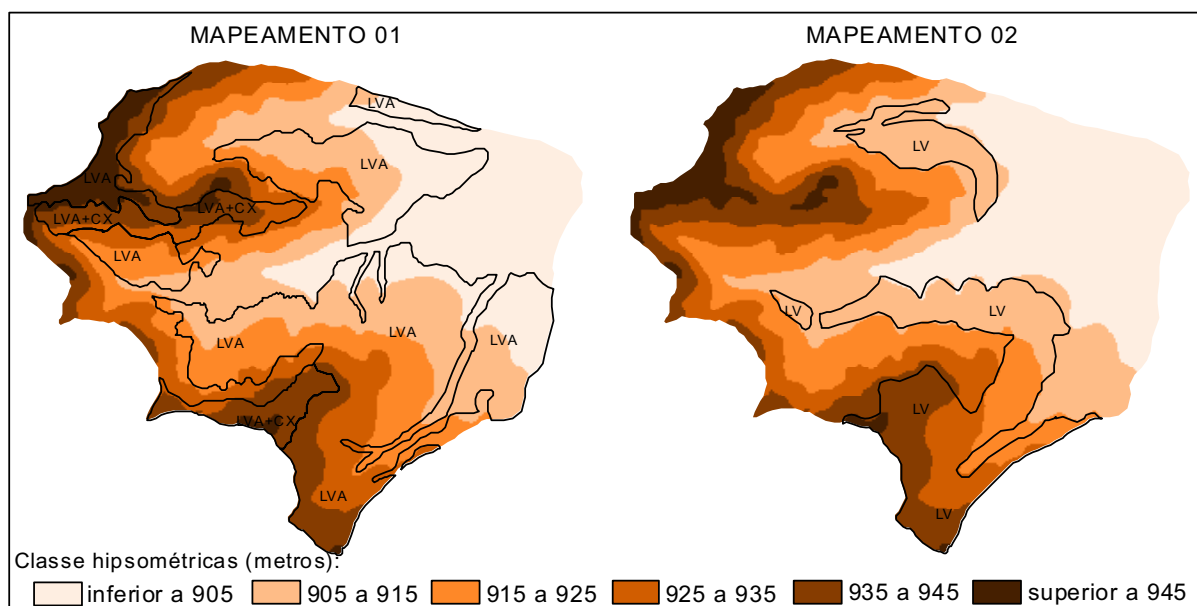


FIGURA 4.6 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS NAS CLASSES HIPSOMÉTRICAS

Considerou-se, a partir das avaliações, que: a) os Cambissolos estão posicionados nas classes hipsométricas intermediárias na bacia hidrográfica, cujos segmentos de vertente apresentam maior atuação dos processos morfogenéticos; b) os Latossolos ocupam na bacia posições altimétricas mais baixas, onde prevalecem os processos de pedogênese em detrimento da erosão, com aporte de material retrabalhado, no caso exclusivo do mapeamento 01, as áreas que se situam em posições mais elevadas são melhor preservadas dos processos de dissecação; c) os Gleissolos e Organossolos são coincidentes com as planícies aluviais no terço inferior da bacia, em ambientes agradacionais referentes ao depósitos holocênico.

#### 4.2.2. Declividade

A declividade é considerada um dos mais importantes atributos topográficos primários que controlam os processos pedogenéticos, de acordo com Gallant e Wilson (2000), ela afeta diretamente a velocidade do fluxo superficial e subsuperficial de água, conseqüentemente o regime hídrico, o potencial de erosão/deposição e muitos outros processos importantes na formação dos solos.

A representação da declividade em classes com agrupamentos de intervalos pode variar de acordo com o objetivo que o trabalho se propõe ou por adaptação às condições físicas da área estudada. Os intervalos selecionados para a bacia do arroio do Corvo seguem a proposta de EMBRAPA (1999 e 2006), que resultou em quatro classes segundo o mapa de declividade (Figura 4.7): a) valores inferiores a 3% representam - relevo plano; b) entre 3 a 8% - relevo

suave ondulado; c) 8 a 20% - relevo ondulado; d) 20 a 45% - relevo forte ondulado. As classes entre 45 a 75% - relevo montanhoso e superior a 75% - relevo escarpado, sendo que essas duas não ocorrem na bacia.

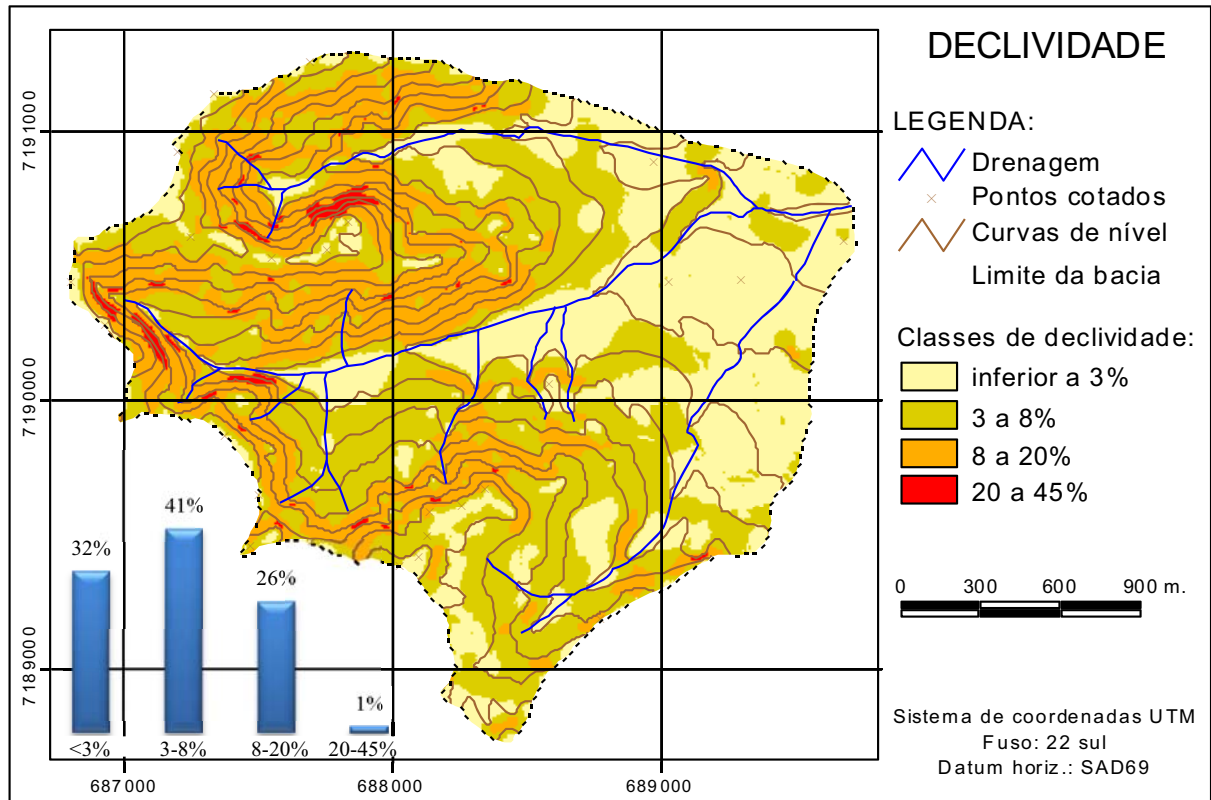


FIGURA 4.7 - MAPA DE DECLIVIDADE DA BACIA DO ARROIO DO CORVO

As maiores declividades na área de estudo estão associados com a unidade geológica da Formação Guabirotuba, com inclinações superiores a 8% e inferior a 45%, respectivamente relevo ondulado e forte ondulado, representando 33% da área. As menores declividade estão associadas, em grande parte, às áreas de depósitos recentes de aluviões e depósitos coluvionares secundários, cuja classe predominante na bacia é de 3 a 8%, que somada à classe inferior a 3%, representam 67% da área, distribuídas em relevo suave ondulado e plano, respectivamente (Figura 4.7).

No mapeamento 01 a unidade OY+GX prevalece sobre relevo plano (75%) com declividade inferior a 3%, os Latossolos sobre relevo suave ondulado (55%) com declividade de 3 a 8%, os Cambissolos sobre relevo ondulado (63%) com declividade de 8 a 20% e as associações CX+LVA e LVA+CX também em relevo ondulado representando 61% e 48%, respectivamente. No mapeamento 02 GX e OY predominam em relevo plano com o primeiro

com sobreposição de 78% e o segundo 70%, LV e CX em relevo suave ondulado (ambos 66%) e CH em relevo ondulado (59%), (Tabela 4.4).

TABELA 4.4 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E DECLIVIDADE

Classes de declividade (%)	Classes de solos do mapeamento 01					Classe de solos do mapeamento 02				
	OY+GX	LVA	LVA+CX	CX	CX+LVA	GX	OY	LV	CX	CH
Inferior a 3%	75	30	14	4	7	78	70	25	26	3
3 a 8%	21	55	37	29	28	22	28	66	66	36
8 a 20%	4	15	48	63	61	1	1	9	8	59
20 a 45%	0	0	1	4	4	0	0	0	0	3
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Verifica-se na Figura 4.8 que os limites dos solos de caráter hidromórfico que melhor coincidem com as classes de declividade são os apresentados no mapeamento 02, apesar do mapeamento 01 apresentar boa relação entre essa unidade de solo com o atributo topográfico. Constatou-se que os Gleissolos e Organossolos presentes na bacia estão fortemente associados às áreas planas com declividade inferior a 3%.

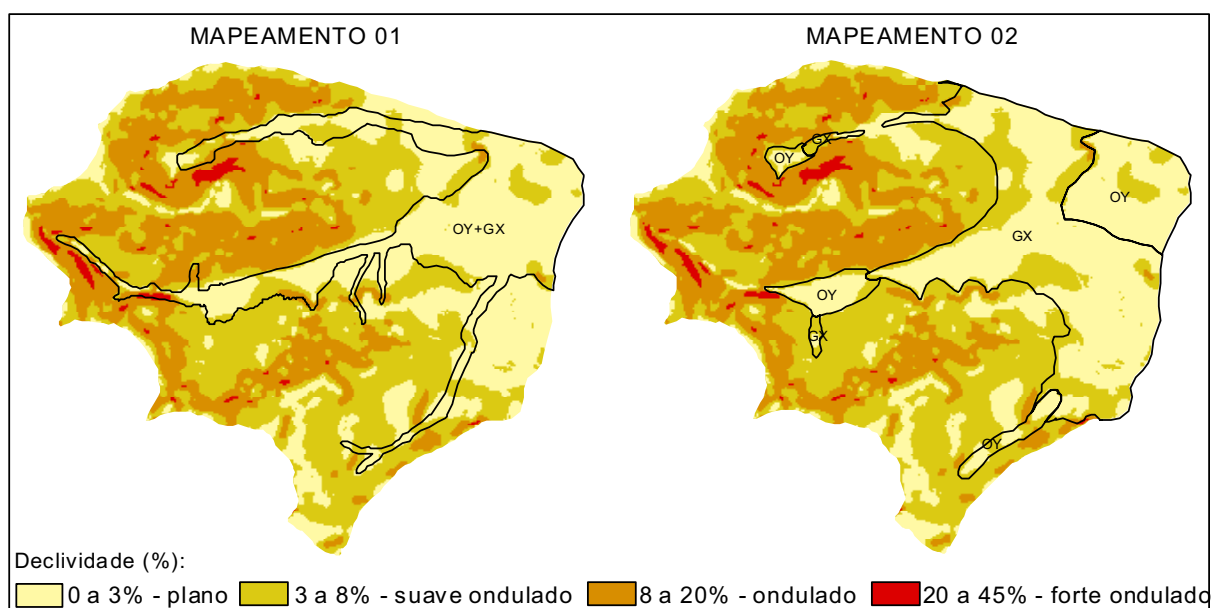


FIGURA 4.8 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX NAS CLASSES DE DECLIVIDADE

Evidenciou-se que na área de estudo os Cambissolos estão predominantemente associados a maiores declividades, geralmente em relevo ondulado e forte ondulado, ocupando posições hipsométricas intermediárias (Figura 4.9). A sobreposição entre os limites dos Cambissolos sobre a declividade revela similaridade, no mapeamento 01 mostra-se com melhor detalhamento e no mapeamento 02 mais generalizado devido às diferenças de escala.

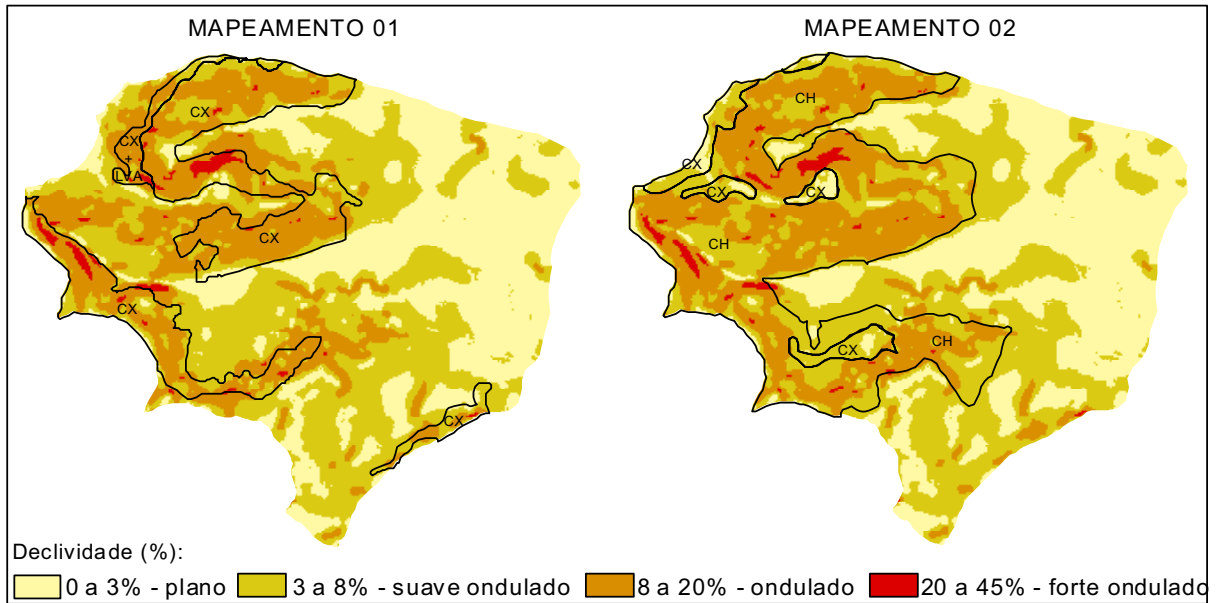


FIGURA 4.9 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS NAS CLASSES DE DECLIVIDADE

Os Latossolos ocorrem na área da bacia preferencialmente associados às menores declividades, geralmente relevo suave ondulado e em algumas situações plano, ocupando posições inferiores das vertentes (Figura 4.10). Estão associados aos colúvios quando ocorre nas posições mais baixas, verificado nos dois mapeamentos, ou posições elevadas em interflúvios, exclusivamente no mapeamento 01.

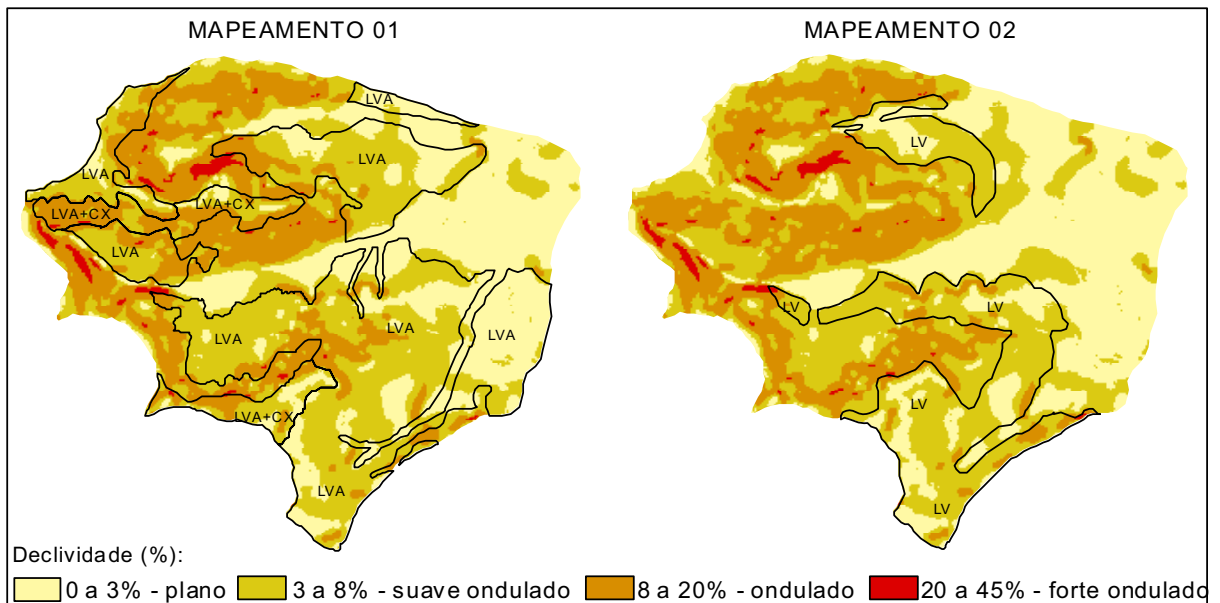


FIGURA 4.10 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS NAS CLASSES DE DECLIVIDADE

Portanto, verificou-se que: a) os solos OY e GX mostram-se condicionados às posições hipsométricas inferiores e com declividade inferior a 3%, preferencialmente em relevo plano, prevalecendo sobre áreas de planície aluvial, onde coincidem os depósitos de sedimentos mais

recentes, compostos por aluviões e depósitos coluvionares secundários; b) os demais solos, Cambissolos e Latossolos, estão distribuídos nas posições de vertentes, sobre a Formação Guabirotuba, o primeiro preferencialmente sobre relevo ondulado a forte ondulado e o segundo suave ondulado e por vezes plano.

#### 4.2.3. Perfil de Curvatura

O perfil de curvatura se refere à forma da vertente, cujo segmento pode ser classificado como convexo, côncavo ou retilíneo, ao ser analisada em perfil. Esse atributo topográfico é importante para caracterizar mudanças na velocidade do fluxo de água e processos relacionados ao transporte de sedimentos (GALLANT e WILSON, 2000 e CHAGAS, 2006).

Este atributo topográfico pode explicar grande parte da variabilidade espacial dos solos (ODEH *et al.*, 1991). Sua influência tem sido relacionada, principalmente, ao controle que as formas côncavas e convexas exercem sobre a distribuição de águas e materiais solúveis das partes mais elevadas para as mais baixas (CHAGAS, 2006).

Para Valeriano e Carvalho Júnior (2003) esta variável está relacionada aos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade, desempenhando importante papel sobre o balanço hídrico e os processos de pedogênese. Desempenha também importante papel sobre a evapotranspiração e o balanço hídrico (VALERIANO, 2003). É decisiva na aceleração ou desaceleração do fluxo da água sobre o terreno e, portanto, influencia a erosão do solo (MENDIONDO *et al.*, 1998).

Diversos autores apontam a importância da aplicação desse atributo topográfico para compreender a distribuição dos solos (PENNOCK *et al.*, 1987; HALL, 1983; VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003; CHAGAS, 2006 e MUÑOZ, 2009). Na escala 1:100.000 os solos puderam ser descritos por Muñoz (2009) pelas características locais a partir da curvatura vertical (ou perfil de curvatura), onde a partir da interpretação visual foram observadas relações entre manchas de solo e curvatura vertical.

O mapa de perfil de curvatura da bacia (Figura 4.11) apresenta segmentos de vertente convexas nos divisores de água, representando 32% da área da bacia, segmentos côncavos nos terços médio/inferior das vertentes em 49% da área e segmentos retilíneos ocupando principalmente áreas situadas no terço inferior da bacia com 19%.

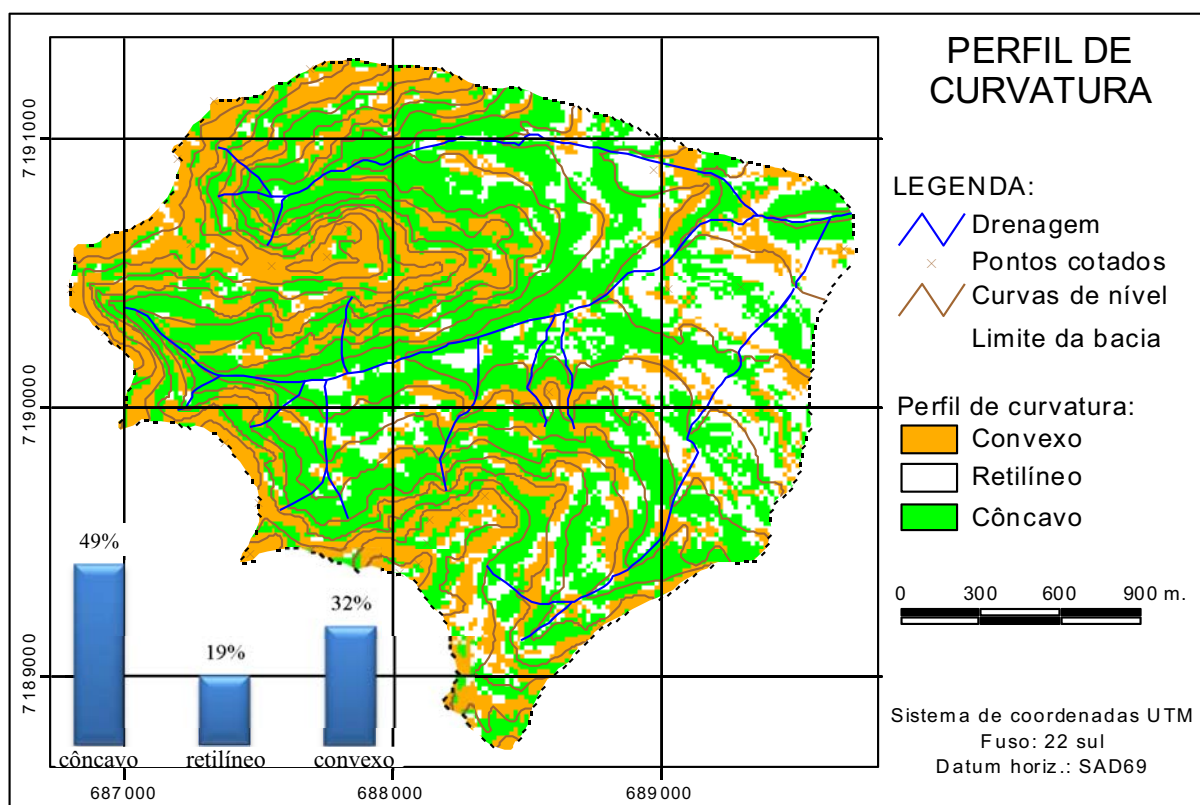


FIGURA 4.11 – MAPA DO PERFIL DE CURVATURA DA BACIA DO ARROIO DO CORVO

As intersecções entre unidades de solos e o tema perfil de curvatura demonstrou que: a) os solos de caráter hidromórficos OY+GX do mapeamento 01 e GX e OY do mapeamento 02 estão associados a vertentes côncavas, com sobreposição de 51%, 47% e 51%, respectivamente, secundariamente a segmentos retilíneos (com valores respectivos de 35%, 38% e 34%), em ambos os mapeamentos; b) os Latossolos LVA do mapeamento 01 e LV do mapeamento 02 ocorrem em vertentes côncavas (50% e 52%) e secundariamente a convexas (29% e 31%); c) os Cambissolos CX do mapeamento 01 e CH do mapeamento 02 apresentam-se sobre vertentes côncavas em predomínio com valores respectivos de 52% e 50% e secundariamente as convexas com 45% e 44%, cujos percentuais são aproximados. Essas duas classes de solos correspondem à mesma unidade presente na área de estudo, contudo, foram interpretadas como sendo distintas no segundo nível categórico dos mapeamentos 01 e 02. A unidade CX do mapeamento 02 e as associações LVA+CX e CX+LVA do mapeamento 01 predominam sobre vertentes convexas com 61% o primeiro, 61% o segundo e 52% o último (Tabela 4.5).

TABELA 4.5 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E PERFIL DE CURVATURA

Perfil de Curvatura	Classes de solos do mapeamento 01					Classe de solos do mapeamento 02				
	OY+GX	LVA	LVA+CX	CX	CX+LVA	GX	OY	LV	CX	CH
côncavo	51	50	32	52	45	47	51	52	33	50
retilíneo	35	21	7	4	4	38	34	17	6	5
convexo	14	29	61	45	52	15	15	31	61	44
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Verificou-se por meio da análise visual das Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, que não há nítida coincidência entre os limites das unidades de solos com o atributo perfil de curvatura. Apesar de não ter sido evidenciada uma estreita relação foi notada a tendência de ocorrer nos topos e interflúvios às classes LVA do mapeamento 01 e CX do mapeamento 02, inferindo que ambos são equivalentes apesar de classificados de forma distinta entre os dois mapas pré-existentis. A classe LVA+CX também se mostrou associada às posições topográficas em divisores de água menos elevados. Portanto, evidencia-se, em resumo, que os Gleissolos e Organossolos encontram-se predominantemente em segmentos de vertente côncavo e retilíneos, que em maior parte estão nas porções de planícies. Os Latossolos apresentaram-se preferencialmente em segmentos côncavos situados em posições inferiores do relevo e convexas situados em posições mais elevadas e os Cambissolos apresentam melhor distribuição em segmentos diferentes de retilíneas.

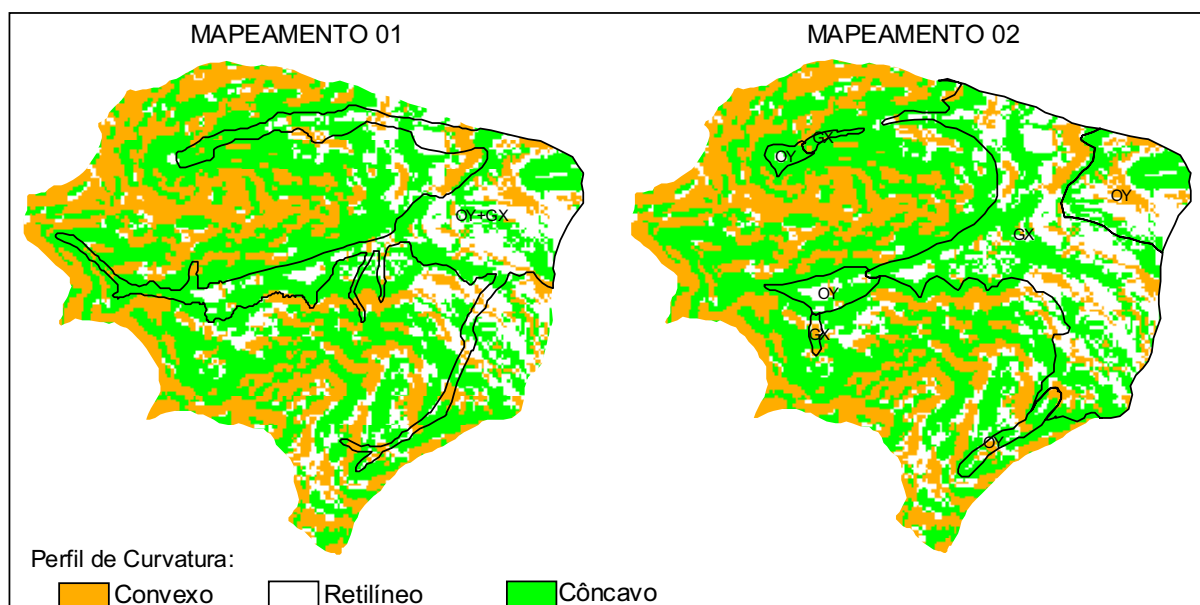


FIGURA 4.12 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX COM O PERFIL DE CURVATURA

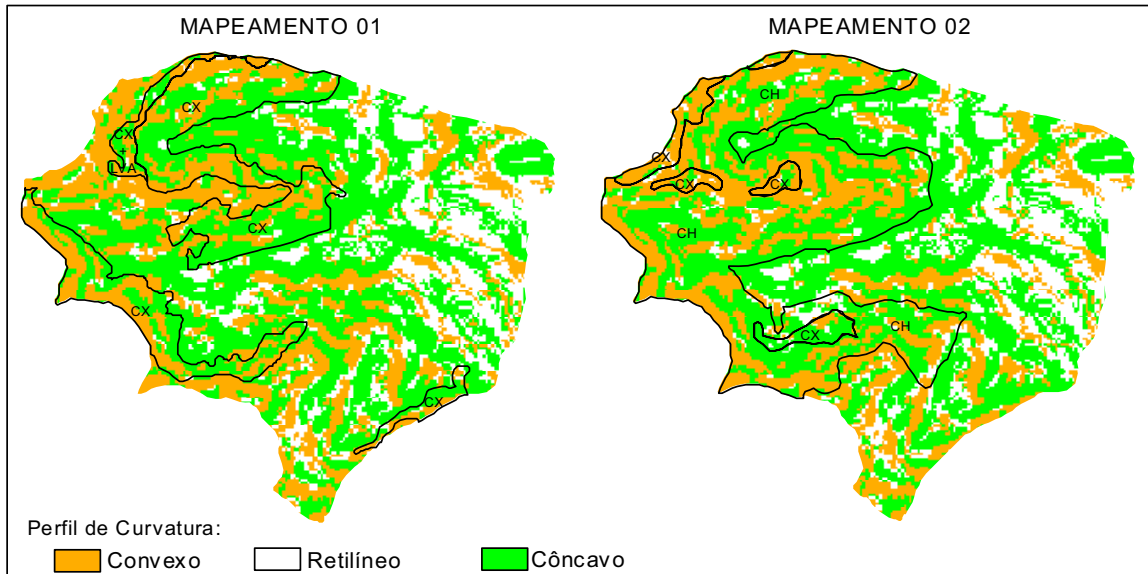


FIGURA 4.13 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O PERFIL DE CURVATURA

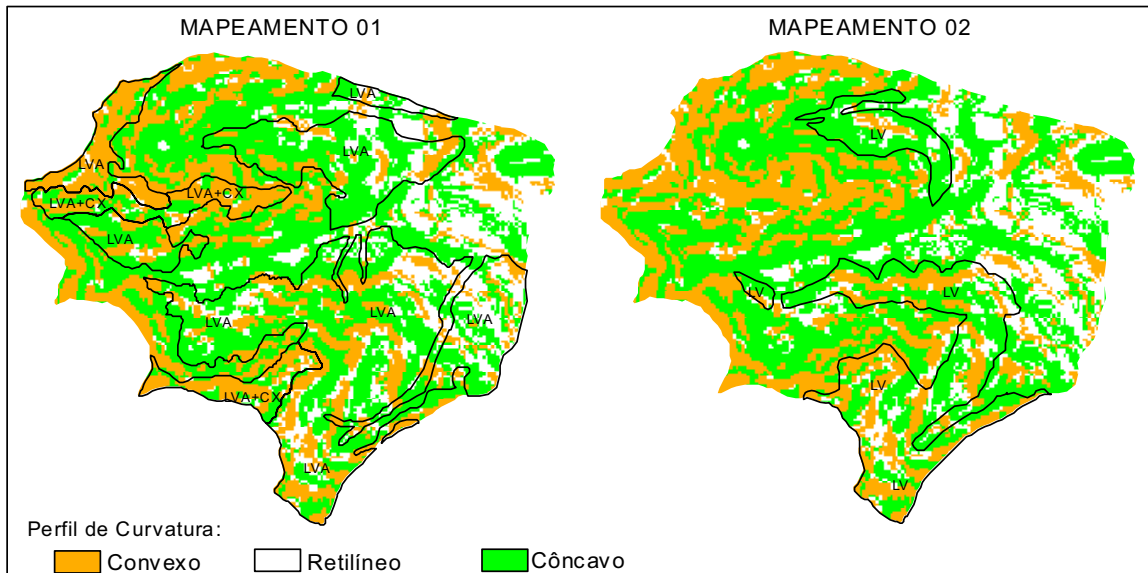


FIGURA 4.14 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS COM O PERFIL DE CURVATURA

A relação do perfil de curvatura e unidades de mapeamento de solos não se apresentou tão explícita no trabalho, esse fato pode ser justificado pela escala dos mapeamentos de solos, 1:10.000 e 1:35.000, não contemplar o detalhamento obtido no mapa do perfil de curvatura.

#### 4.2.4. Plano de Curvatura

O plano de curvatura, ou curvatura horizontal, refere-se ao caráter divergente ou convergente dos fluxos de matéria e energia nas vertentes, em projeção horizontal. As áreas convergentes representam os vales e as divergentes os interflúvios. A configuração da vertente de acordo com a curvatura em plano, ou em perfil, pode ser usada na identificação de áreas de distintos processos e dinâmica hidrológica (PENNOCK *et al.*, 1987).

Esse atributo mensura a propensão do fluxo hídrico em convergir ou divergir à medida que perpassa o terreno (GALLANT e WILSON, 2000), assim está relacionado aos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície e subsuperfície, proporcionados pela gravidade, desempenhando importante papel sobre o balanço hídrico e os processos de pedogênese (VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003). Esse atributo influencia a acumulação da umidade e do fluxo da água superficial e subsuperficial (MENDIONDO *et al.*, 1998).

A curvatura da vertente tende a influenciar grandemente na distribuição dos solos por meio das interações de processos pedológicos, hidrológicos e geomórficos que se processam (PENNOCK *et al.*, 1987). Portanto a aplicação desse atributo topográfico permite avaliar a distribuição dos solos na paisagem, uma vez que o movimento e a distribuição de água ao longo das vertentes são as principais razões para diferenças nos solos (HALL, 1983).

Na área de estudo o mapa que apresenta as classes do plano de curvatura mostram-se predominantemente divergentes (com divergência de linhas de fluxo) em 44% da área, convergente (com convergência de linhas de fluxo) em 37% e planar em 19%, convergentes e planares (Figura 4.15).

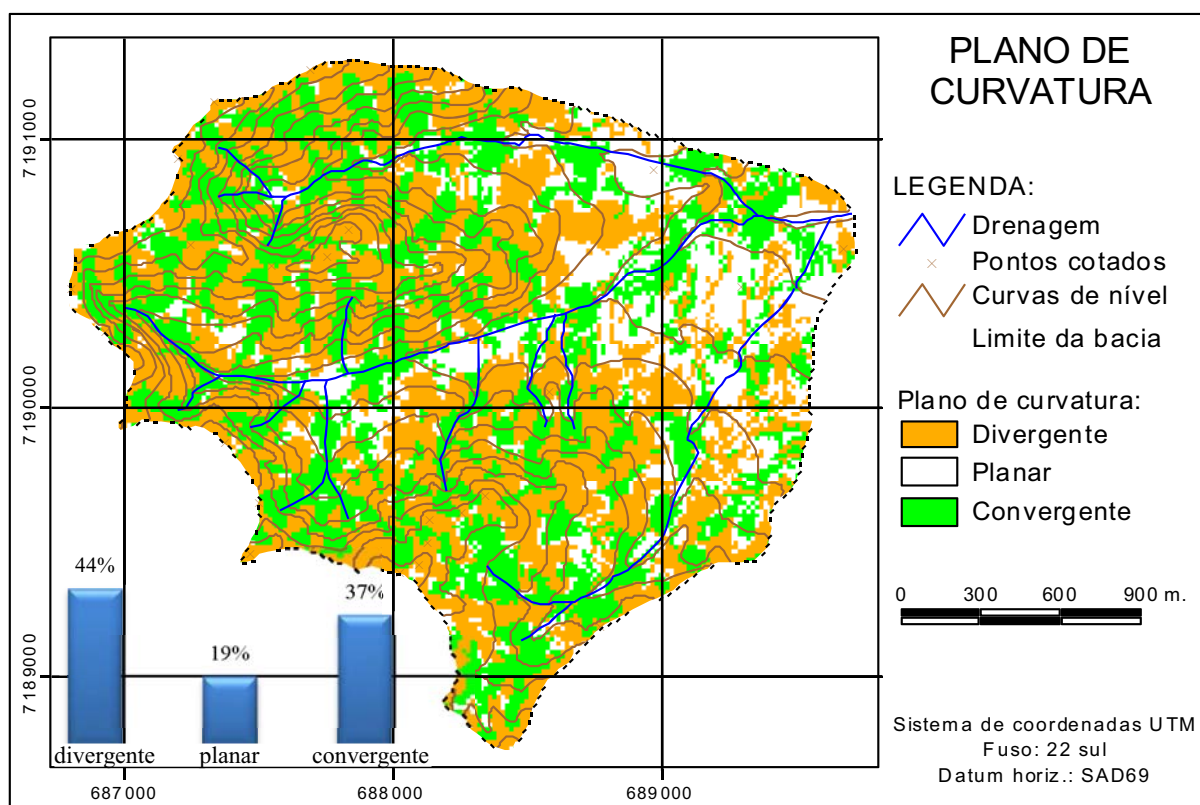


FIGURA 4.15 – MAPA DO PLANO DE CURVATURA DA BACIA DO ARROIO DO CORVO

Na bacia evidencia-se que: a) os solos de caráter hidromórfico ocorrem predominantemente sobre curvatura planar, 42% da unidade OY+GX do mapeamento 01 40% em GX e 42% em OY, ambos do mapeamento 02; b) os Latossolos LVA e LVA+CX do mapeamento 01 e LV do mapeamento 02 ocorrem principalmente sobre vertentes divergentes com os respectivos percentuais de 48%, 59% e 49%; c) os Cambissolos CX do mapeamento 01 e CH do mapeamento 02, que correspondem à mesma unidade observada em campo apresentam os mesmos valores 54% em vertentes divergentes e 42% em convergentes, a associação CX+LVA do mapeamento 01 possui valores semelhantes em segmentos divergentes e convergentes (49% e 50%, respectivamente) e a unidade CX do mapeamento 02 prevalece sobre vertentes divergentes com 62%, uma vez que essa classe apresenta-se em posições de topos (Tabela 4.6).

TABELA 4.6 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E PLANO DE CURVATURA

Plano de Curvatura	Classes de solos do mapeamento 01					Classe de solos do mapeamento 02				
	OY+GX	LVA	LVA+CX	CX	CX+LVA	GX	OY	LV	CX	CH
divergente	18	48	59	54	49	30	20	49	62	54
planar	42	19	5	4	1	40	42	15	8	4
convergente	39	33	36	42	50	30	38	36	30	42
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Os Gleissolos e Organossolos foram as unidades que apresentaram relação mais evidente na análise visual da sobreposição dos limites de solos sobre o plano de curvatura, onde prevalecem os segmentos planares associados aos convergentes (Figura 4.16).

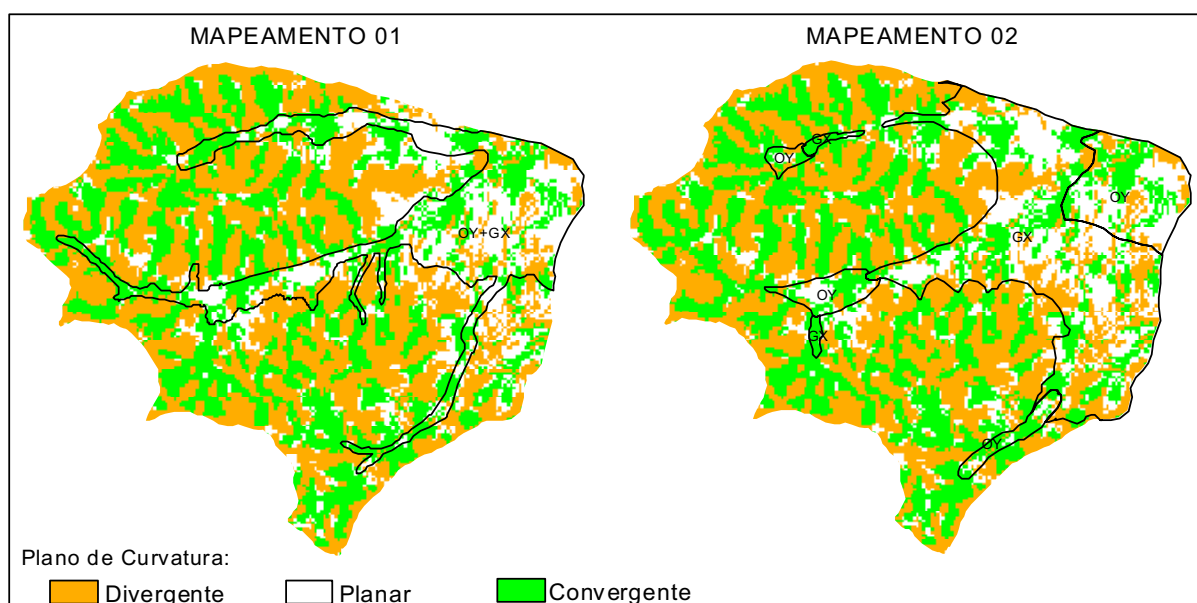


FIGURA 4.16 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX COM O PLANO DE CURVATURA

Os Latossolos e Cambissolos dos mapeamentos 01 e 02 não apresentaram clara relação com o plano de curvatura, evidenciada em análise visual nas Figura 4.17 e Figura 4.18. Esse resultado é justificado pelo nível de detalhe inferior dos mapas de solos em relação ao atributo topográfico, pois as escalas dos mapas 1:10.000 e 1:35.000 não representa as pequenas áreas de convergência e divergência de fluxo hídrico. Em estudo desenvolvido por Munõz (2009) os resultados do plano de curvatura também não mostraram características regionais passíveis de apoiar o delineamento de manchas do solo, fato atribuído à escala de trabalho por ela empregada (1:100.000).

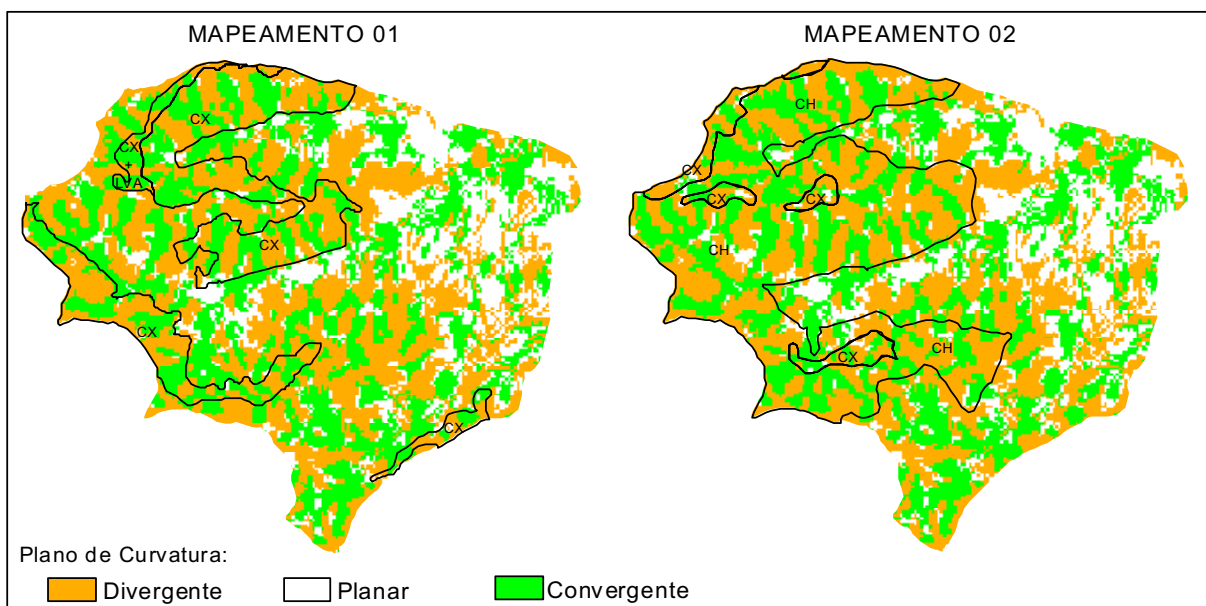


FIGURA 4.17 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O PLANO DE CURVATURA

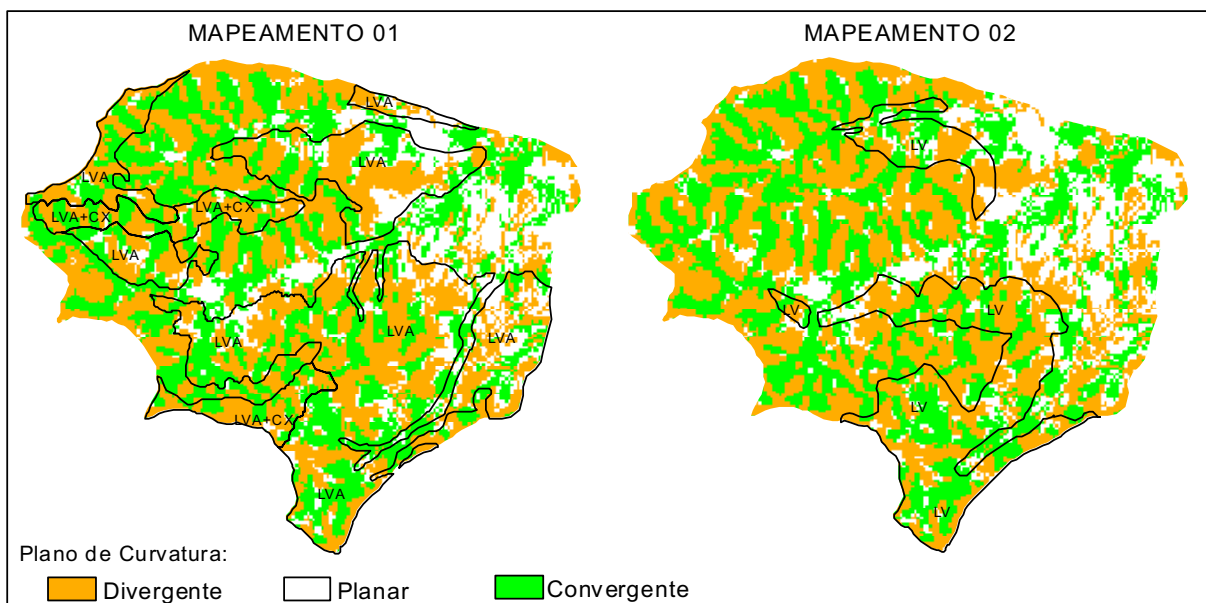


FIGURA 4.18 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS COM O PLANO DE CURVATURA

#### 4.2.5. Índice de Corrente de Máximo Fluxo

Esse índice é um atributo secundário do relevo, derivado de atributo primário (WILSON e GALLANT, 2000). A distribuição das classes do índice na área de estudo é demonstrada no mapa da Figura 4.19 na qual sua distribuição espacial está apresentada. Verifica-se que a classe ICMF1 representa 24% da área da bacia, ICMF2 42%, ICMF3 26% e ICMF4 7%.

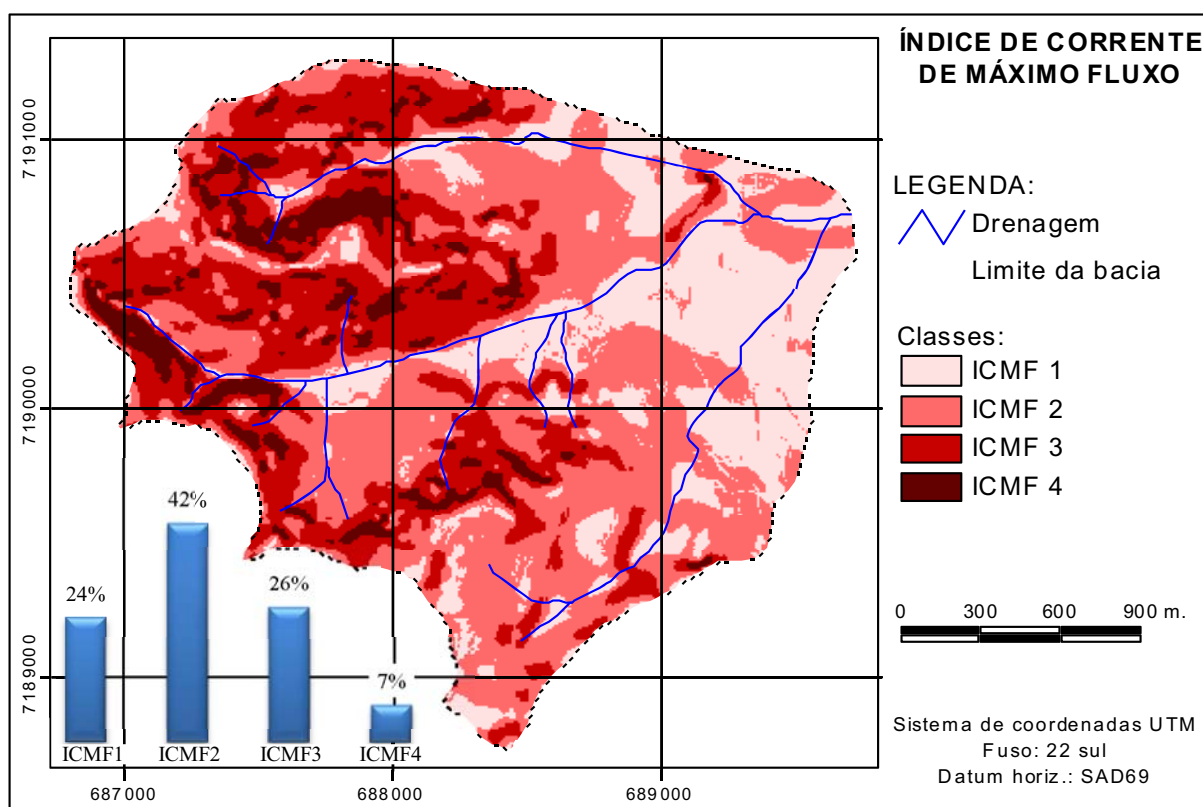


FIGURA 4.19 - MAPA DO ÍNDICE DE CORRENTE DE MÁXIMO FLUXO

Para Daniels e Hammer (1992), dentre os processos sobre as vertentes, o que mais afeta as propriedades do solo é a quantidade, fluxo e distribuição sazonal da água. Estes autores afirmam que os fluxos de água, superficial e subsuperficial, ao longo da vertente, é a principal geradora de variabilidade espacial dos solos. Nesse sentido, havendo mudança nesse índice, as propriedades dos solos mudam e, por consequência as respectivas classes de solos.

No mapeamento 01 verificou-se que os solos OY+GX coincidem predominantemente com os menores valores do índice com 63% de sobreposição sobre a classe ICMF1 e secundariamente na classe ICMF2 com 32%. No mapeamento 02 sobre as unidades GX e OY predominam as classes inferiores, ICMF1 com 63% sobre a primeira e 55% sobre a segunda e, secundariamente, ICMF2 com 36% sobre a primeira e 43% sobre a segunda (Tabela 4.7). Em análise visual na Figura 4.20 pode ser verificado que foi encontrada boa relação entre as

unidades de solos de caráter hidromórficos da bacia com a classe ICMF1, onde os limites mostram similaridades.

TABELA 4.7 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E ICMF

Classes do ICMF	Classes de solos do mapeamento 01					Classe de solos do mapeamento 02				
	OY+GX	LVA	LVA+CX	CX	CX+LVA	GX	OY	LV	CX	CH
ICMF1	63	20	9	3	5	63	55	16	15	2
ICMF2	32	59	32	22	24	36	43	68	68	27
ICMF3	4	19	49	53	44	1	2	16	17	54
ICMF4	1	2	9	22	27	0	0	0	0	18
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

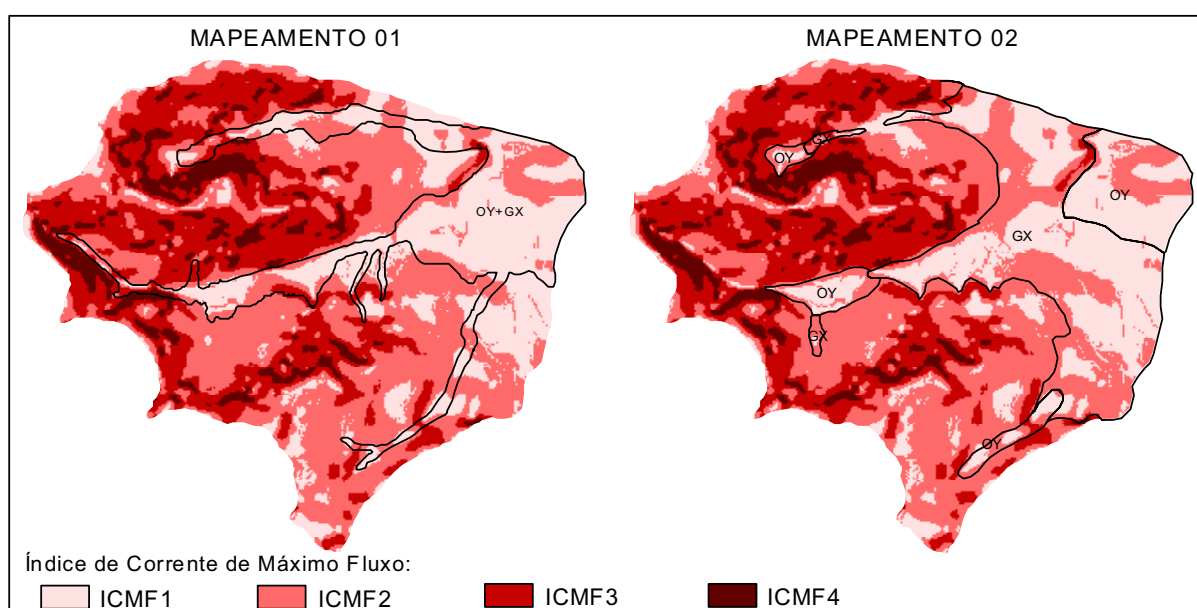


FIGURA 4.20 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX COM O ICMF

Quanto aos Cambissolos, os resultados são opostos e apresentam interseção com as classes de maior valor do atributo topográfico, prevalecendo sobre ICMF3. No mapeamento 01 CX apresenta 53% sobre ICMF3 e as associações CX+LVA e LVA+CX 44% e 49%, porém secundariamente a primeira associação apresenta 27% sobre ICMF4 e a segunda 32% sobre ICMF2. No mapeamento 02 a unidade CH apresenta predomínio da classe ICMF3 com 54%, na mesma tendência verificada nas anteriores, no entanto CX ocorre em maior expressão na classe ICMF2, com 68% (Tabela 4.7). Deve ser considerado que os limites dessa última unidade são interpretados no mapeamento 01 como Latossolo.

A sobreposição dos limites das unidades de solos com o atributo topográfico ICMF (Figura 4.21), demonstra que os Cambissolos de ambos os mapeamentos apresentam estreita relação com esse índice, pois os contornos das unidades de solos expressam em muitos casos

coincidências com as classes discretizadas do ICMF e também seguem uma mesma tendência de distribuição na bacia.

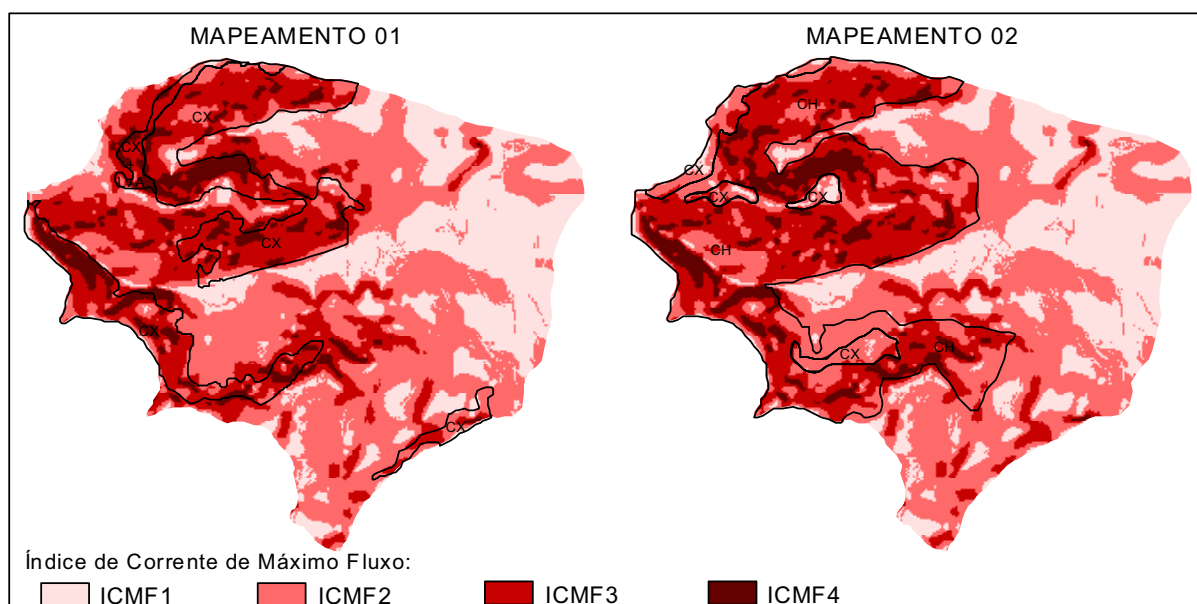


FIGURA 4.21 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O ICMF

As unidades de Latossolos predominam em classes do ICMF com valores intermediários, entre as de Gleissolos e Organossolos com Cambissolos. Possuem sobreposição em maior parte da classe ICMF2. No mapeamento 01 a unidade LVA apresenta-se com 59% e no mapeamento 02 LV com 68%, ambos sobre a classe ICMF2 (Tabela 4.7). A Figura 4.22 revela que as unidades de Latossolos dos dois mapeamentos estão distribuídas preferencialmente sobre ICMF2, ao contrário dos Cambissolos que predominaram sobre ICMF3 e os solos de caráter hidromórfico sobre ICMF1.

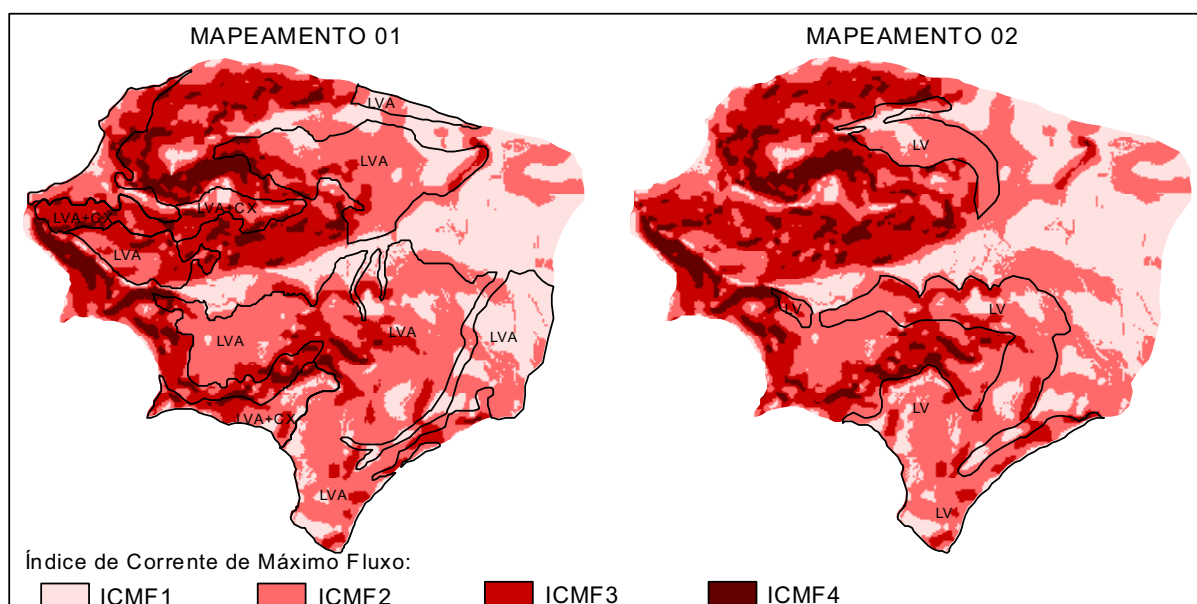


FIGURA 4.22 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS COM O ICMF

#### 4.2.6. Índice de Umidade

O índice topográfico de umidade é um muito usado para identificar áreas úmidas (GESSLER *et al.*,1995) e apresenta potencial na separação de unidades de solos que se encontram em relevo aplainado, ou em baixadas com possibilidade de acumulação de umidade (SIRTOLI, 2008). Esse índice foi empregado por Chagas (2006) para classificar unidades de solos em mapeamento digital, mostrando-se eficiente na separação de Gleissolos que ocorriam em relevo plano de outras classes que situadas em áreas planas e suave onduladas e nos topos de morros.

O índice de umidade apresenta valores elevados para áreas mais saturadas e menores para área bem drenadas com menos contribuição de fluxo de montante. Na área de estudo os valores obtidos para este índice variam de 1 a 26, cujas seis classes discretizadas são apresentadas na forma de mapa: IU1, IU2, IU3, IU4, IU5 e IU6. A primeira classe representa 9% da área da bacia do arroio do Corvo, a segunda 15%, a terceira 23%, a quarta 21%, a quinta 15% e a última 17% (Figura 4.23).

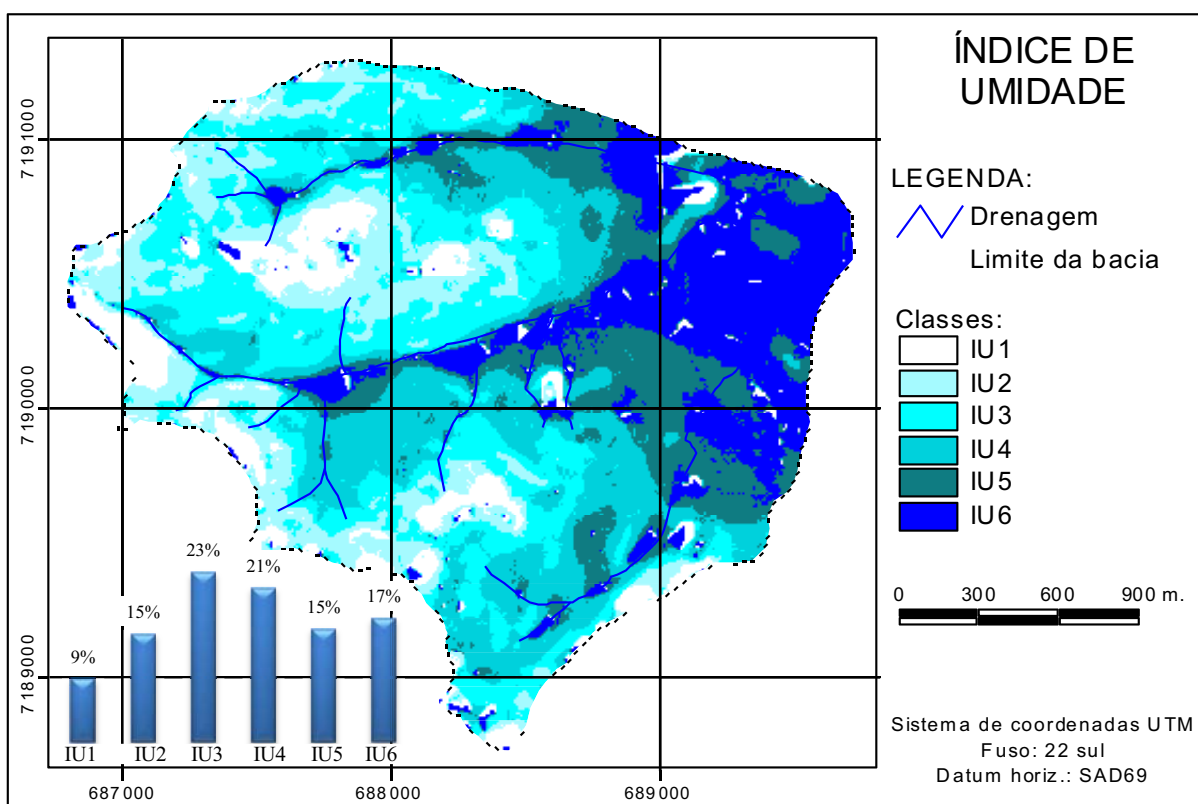


FIGURA 4.23 - MAPA DO ÍNDICE DE UMIDADE

Os solos de caráter hidromórfico apresentam-se sobre as classes com valores mais elevados do índice de umidade. No mapeamento 01 a unidade OY+GX sobrepõe-se em 57% sobre a classe IU6 e 26% em IU5 e no mapeamento 02 a unidade GX compreende 63% sobre a classe IU6 e 24% sobre IU5 e OY está distribuído com igual representação de 41% sobre IU6 e IU5 (Tabela 4.8).

TABELA 4.8 - RELAÇÕES ENTRE UNIDADES DE SOLO E ÍNDICE DE UMIDADE

Classes do Índice de umidade	Classes de solos do mapeamento 01					Classe de solos do mapeamento 02				
	OY+GX	LVA	LVA+CX	CX	CX+LVA	GX	OY	LV	CX	CH
IU1	2	5	28	18	8	1	2	7	22	14
IU2	1	7	45	33	43	0	0	6	24	31
IU3	3	24	24	39	46	1	2	19	30	43
IU4	11	35	2	8	2	11	13	51	21	11
IU5	26	20	0	1	0	24	41	14	1	0
IU6	57	10	2	1	0	63	41	3	3	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Os limites das unidades de Gleissolos e Organossolos obtidos dos mapeamentos 01 e 02, apresentaram uma nítida relação com o índice de umidade. O limite das unidades delineadas sobre o índice demonstra que as classes IU6 e IU5 relacionam-se bem com solos de caráter hidromórfico, situadas nas porções de planícies da bacia (Figura 4.24). Esses ambientes se apresentam com saturação hídrica devido ao fluxo acumulado das vertentes.

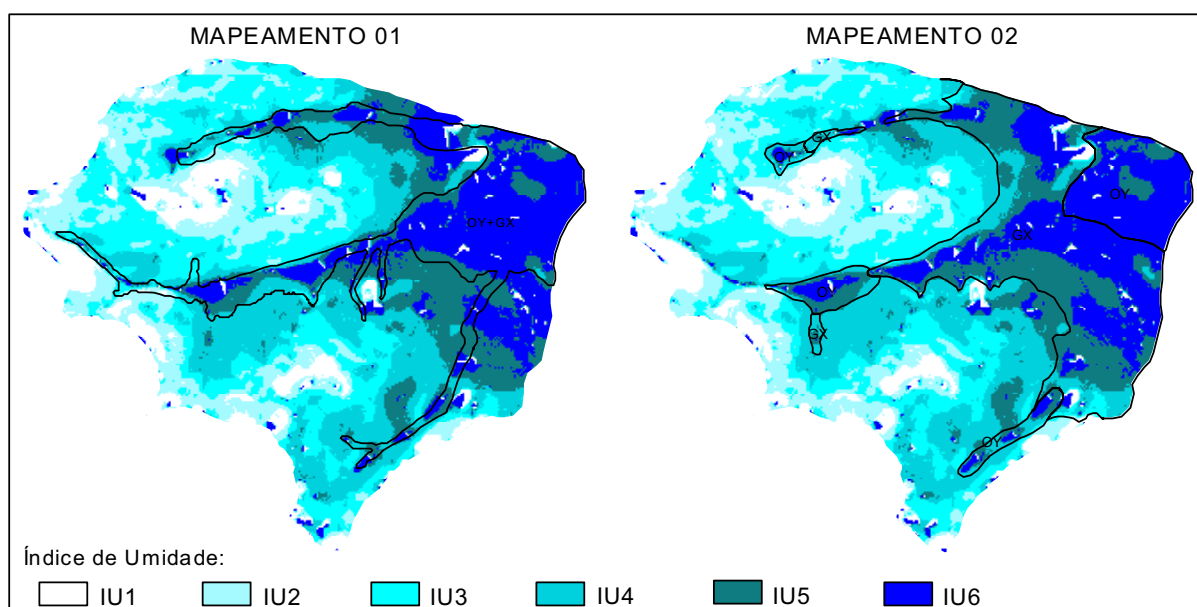


FIGURA 4.24 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX COM O ÍNDICE DE UMIDADE

As unidades de mapeamento da ordem dos Cambissolos são coincidentes com as classes que representam menores índices de umidade, principalmente em IU3, IU2 e IU1. No mapeamento 01 CX predomina na classe IU3 com 39% e em IU2 com 33%; a associação CX+LVA prevalece sobre IU3 com 46% e em IU2 com 43%. No mapeamento 2 as unidades CX e CH prevalecem na classe IU3 com 30% e 43%, respectivamente, secundariamente estão sobre IU2 com 24% a primeira e 31% a segunda (Tabela 4.8). A Figura 4.25 demonstra nos mapeamentos 01 e 02 que ocorre boa relação entre esse índice e os Cambissolos, evidenciados pela relativa concordância entre os limites das classes.

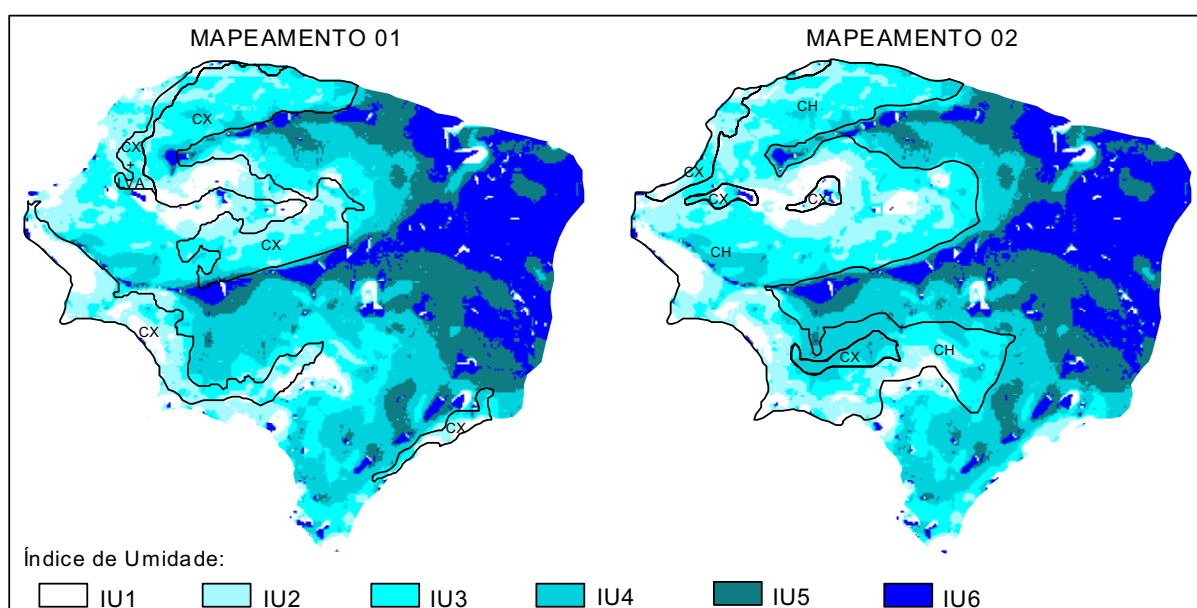


FIGURA 4.25 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O ÍNDICE DE UMIDADE

Os Latossolos mapeados na bacia são coincidentes em sua maioria com as classes de umidade de valor intermediário. No mapeamento 01 a unidade LVA predomina sobre a classe IU4 com 35% e em IU3 com 24%, enquanto a associação LVA+CX prevalece sobre classes com valores mais baixos IU3 e IU2 com respectivamente 46% e 43%. No mapeamentos 02 os Latossolos também prevalecem sobre classes intermediárias do índice de umidade, LV ocorrem em maior domínio a classe IU4 com 51% e secundariamente IU3 com 19%. Em análise visual pode ser percebido na Figura 4.26 que os Latossolos apresentam boa coincidência entre sua delimitação com as classes do atributo topográfico de umidade, tanto os situados em posições mais baixas do relevo nos mapeamentos 01 e 02, como também os posicionados nos topos no caso do mapeamento 01, onde os valores de umidade são menores.

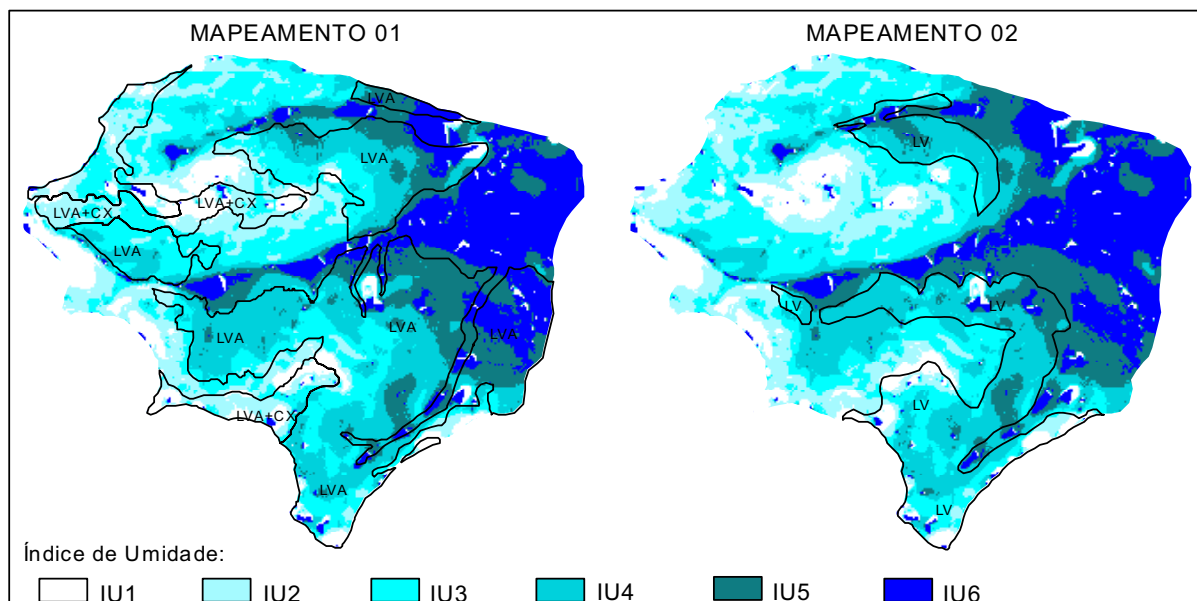


FIGURA 4.26 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE LATOSSOLOS COM O ÍNDICE DE UMIDADE

Nas posições de relevo superior, o valor do índice de umidade apresentou tendência à diminuir devido ao menor acúmulo de fluxo de montante, enquanto nas posições topográficas inferiores os valores se mostraram mais elevados, uma vez que a inclinação da vertente é somada à variável de acumulação de fluxo superficial. Portanto, as unidades de Cambissolos e Latossolos em posições de topo apresentam menores valores, os Latossolos situados em terço médio e inferior das vertentes valores intermediários e os solos de caráter hidromórfico, entendido como Gleissolos e Organossolos, valores elevados. Esses últimos demonstraram estreita relação com o índice de umidade, pois sua distribuição é condicionada às duas principais variáveis que se combinam no cálculo da umidade, a declividade e a acumulação de fluxo hídrico, que resultam ambientes de hidromorfia.

#### 4.2.7. Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos

Esse índice também se caracteriza com um atributo topográfico secundário. Sua representação na forma de mapa procedeu a partir da discretização de cinco classes: ICTS1 que representa 15% da área de estudo, ICTS2 30%, ICTS3 28%, ICTS4 19% e ICTS 5 8% (Figura 4.27).



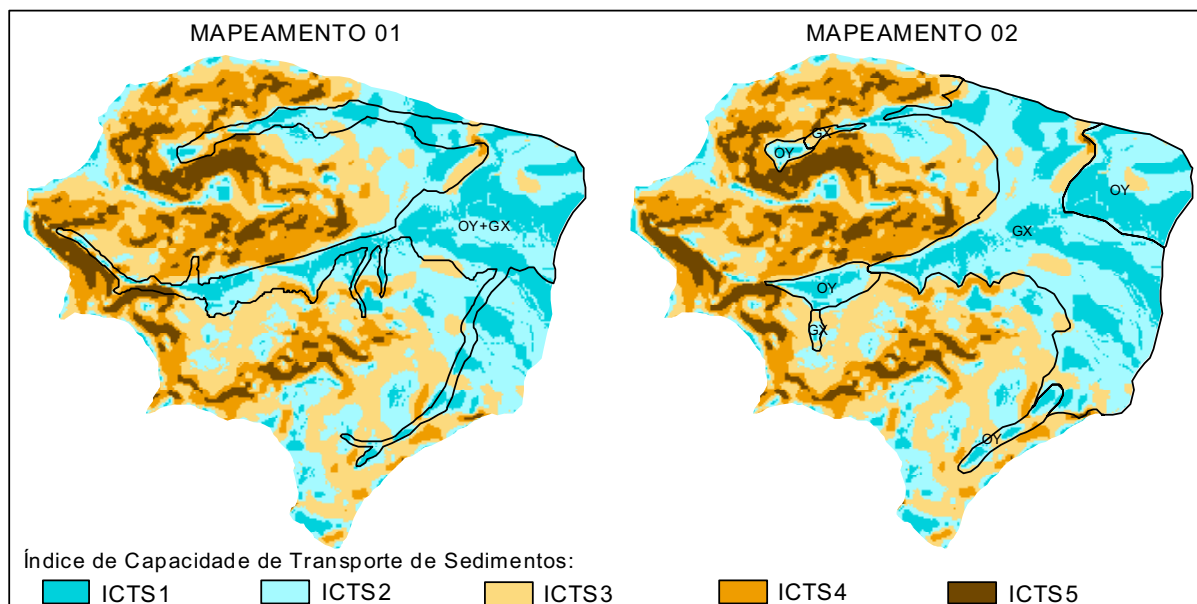


FIGURA 4.28 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE OY E GX COM O ICTS

Os Cambissolos coincidem com as classes do índice que apresentam valores mais elevados, que estão situadas principalmente sobre as vertentes mais declivosas, onde normalmente ocorrem solos mais jovens e/ou menos evoluídos. No mapeamento 01 a unidade CX predomina sobre a classe ICTS4 com 42% de sobreposição, secundariamente nas classes ICTS3 e ICTS5 ambas com 25%; a associação CX+LVA prevalece sobre ICTS4 e ICTS5, com respectivamente 34% e 30% de concordâncias sobre elas. No mapeamento 02 a unidade CH sobrepõe-se em 41% com ICTS4 e 32% com ICTS3 e na unidade CX em 44% de área com a classe ICTS3 e 40% com ICTS2 (Tabela 4.9). Os limites das unidades da ordem dos Cambissolos obtidos dos dois mapeamentos apresentaram boas coincidências com o índice analisado (Figura 4.29), evidenciando a tendência de classes de maior valor coincidirem com as delimitação dos Cambissolos. Por isso o ICTS demonstra potencialidade de aplicação não apoio à classificação e predição de unidades de mapeamento.

Os Latossolos mostram-se mais associados às classes ICTS3 e ICTS2, no mapeamento 01 apresentam-se sobrepostos em 38% sobre a primeira e 37% sobre a segunda. A unidade associação LVA+CX desse mapeamento prevalece sobre a classe ICTS4 em 37% e ICTS3 em 30%. No mapeamento 02 LV predomina sobre a classe ICTS3 em 46% e secundariamente ICTS2 em 37% (Tabela 4.9). Foram observadas similaridades entre os contornos das unidades de Latossolos com as classes discretizadas do índice de capacidade de transporte de sedimentos, pois esses solos apresentaram-se predominantemente sobre os índices intermediários (ICTS2 e ICTS3), tanto as unidades mapeadas nos terços inferiores das vertentes como as traçadas sobre os divisores d'água (Figura 4.30). Os valores mais baixos

desse índice estão associados com solos de caráter hidromórficos (ICTS1 e ICTS2) e os mais elevados aos Cambissolos (ICTS5, ICTS4 e ICTS3).

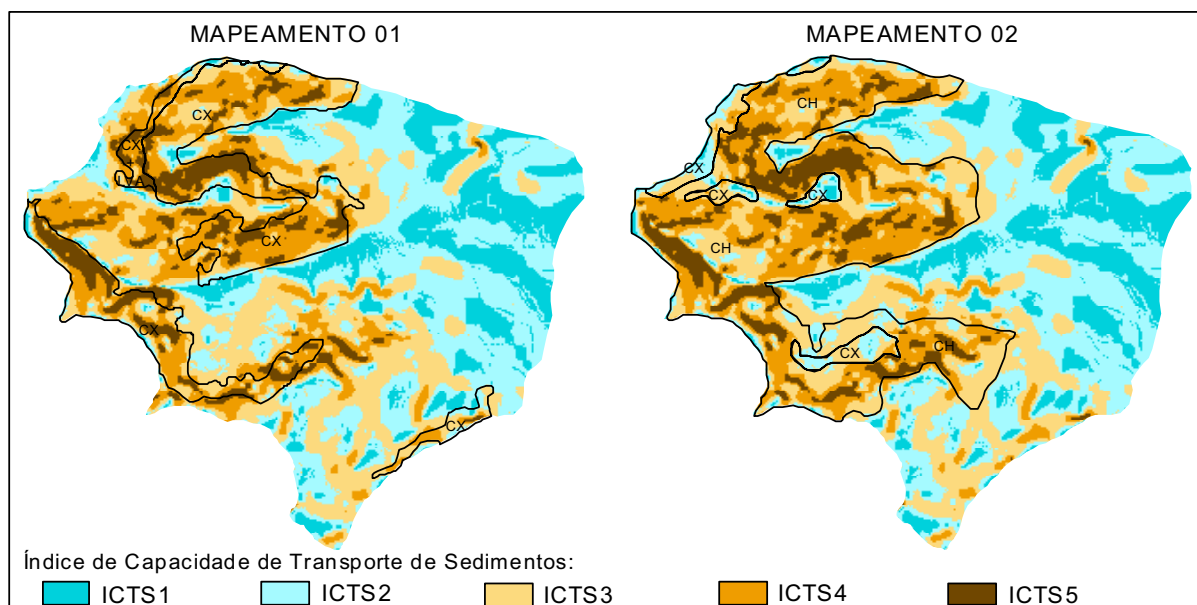


FIGURA 4.29 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O ICTS

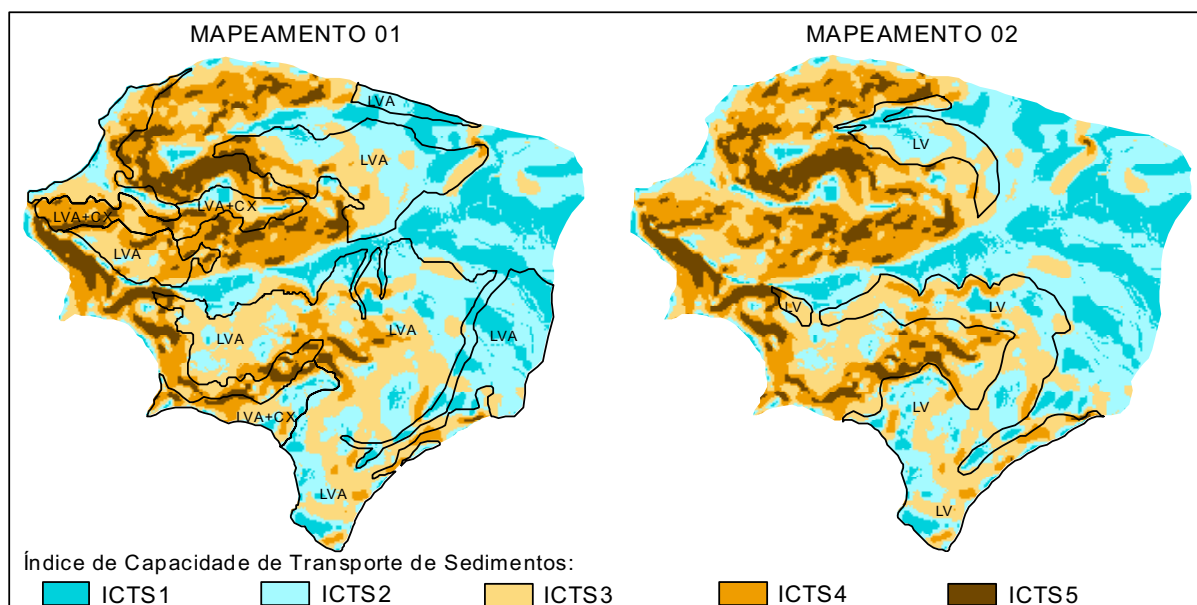


FIGURA 4.30 – SOBREPOSIÇÃO DOS LIMITES DE CAMBISSOLOS COM O ICTS

## 5. MAPEAMENTO DE UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS

A análise digital do relevo foi empregada na predição de unidades preliminares de mapeamento de solo na bacia do arroio do Corvo a partir de atributos topográficos modelados em SIG, onde foram aplicadas operações de classificação em matrizes por tabulação cruzada e por meio de Redes Neurais Artificiais.

O principal mérito da análise digital do terreno é a maior eficiência obtida no trabalho de campo após a realização da classificação digital preliminar, apoiada num modelo de ocorrência de solos previamente conhecido (IPPOLITI *et al.*, 2005). O mapeamento pedométrico melhora os trabalhos de mapeamentos de solos, resultando em mapas mais objetivos e detalhados (HENGL, 2003).

As unidades preditivas de solos foram validadas por um conjunto de amostras de controle, reconhecimento de campo e comparação com mapas de solos convencionais pré-existent na área de estudo.

### 5.1. PREDIÇÃO POR TABULAÇÃO CRUZADA

Por meio de operação de tabulação cruzada organizada na forma de matrizes contendo as classes dos atributos topográficos, foram obtidas cinco classes de unidades geomórficas (Figura 5.1), que representam ambientes com dinâmica de processos naturais relacionadas às formas do relevo. Para Irvin *et al.* (1997) a delimitação automática de geformas é uma técnica promissora no mapeamento de solos. A partir da interpretação dessas é que foram delineadas unidades preliminares de mapeamento de solo na bacia do arroio do Corvo, com base na premissa de que, por meio da identificação de atributos do relevo os solos podem ser agrupados em unidades preliminares de mapeamento, nos quais acreditam conter solos similares (HUDSON, 1992).

A complexidade de se analisar e sobrepor um grande número de variáveis, inviabilizou o trabalho com todos os atributos topográficos gerados, assim, devido a limitação constatada, considerou-se na obtenção das unidades apenas os atributos que apresentaram melhor relação com as classes de solos dos mapeamentos 01 e 02, tratado no capítulo anterior. As variáveis consideradas foram os índices de corrente de máximo fluxo ( $\Omega$ ), topográfico de umidade ( $w$ ), de capacidade de transporte de sedimentos ( $\tau$ ) e a declividade ( $\alpha$ ).

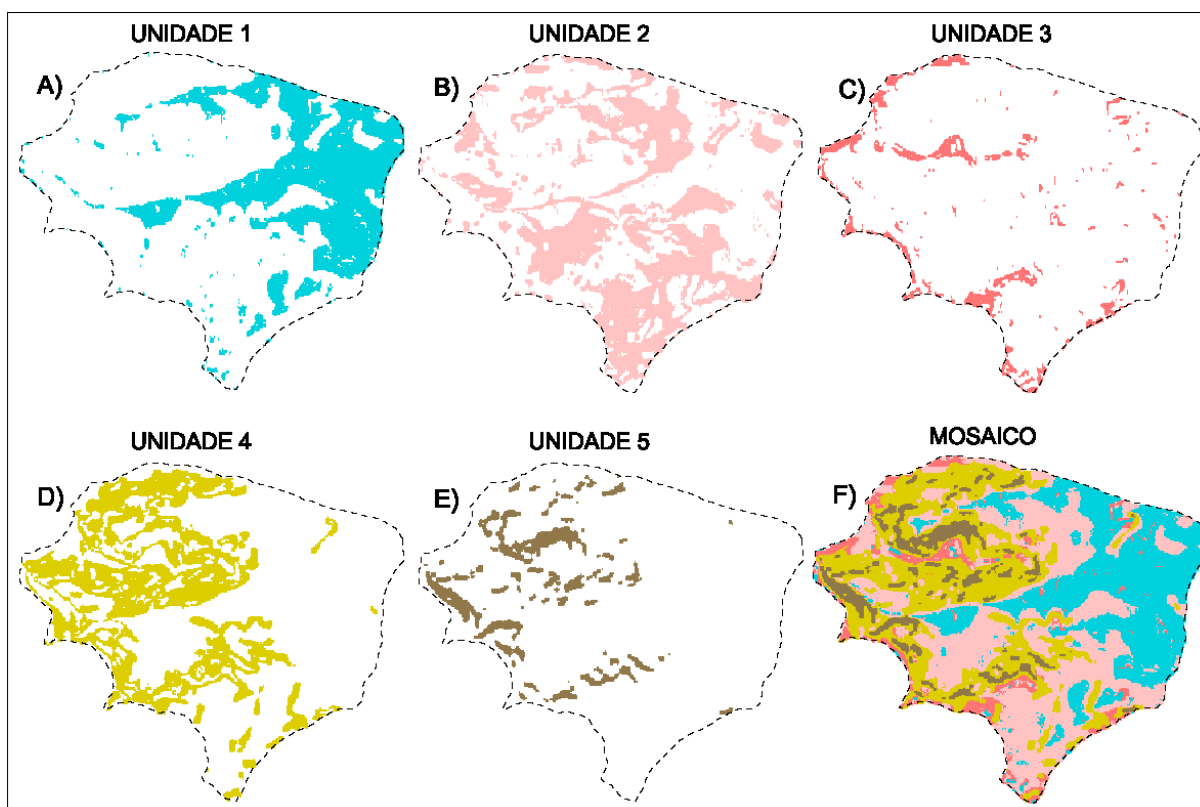


FIGURA 5.1 - UNIDADES GEOMÓRFICAS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

A interseção dos atributos topográficos: ICMF, IU, ICTS e declividade, resultou em unidades preliminares de mapeamento de solo, que corresponde a primeira etapa nos levantamentos de solos, úteis tanto na amostragem, como no desenvolvimento de modelos de localização de unidade de solos na paisagem.

A unidade 1 (Figura 5.1-A) combina classes de elevado valor do índice umidade – IU ( $w_5$  e  $w_6$ ) com baixos valores dos índices de corrente de máximo fluxo – ICMF ( $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ ), de capacidade de transporte de sedimentos – ICTS ( $\tau_1$  e  $\tau_2$ ) e declividade (inferior a 3%). A composição das classes desses atributos topográficos culmina em ambientes com baixa energia de transporte de material que constituem áreas deposicionais, marcados pela presença de constante saturação hídrica, caracterizando um ambiente de hidromorfia situado nas planícies aluviais da bacia.

A unidade 2 (Figura 5.1-B) é composta por classes de valores intermediários do IU ( $w_2$ ,  $w_3$  e  $w_4$ ) e do ICTS ( $\tau_3$  e  $\tau_4$ ), associados às classes com baixos valores do ICMF ( $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ ) e de declividade (entre 3 e 8%). As geoformas que se configuram por essas classes de atributos topográficos ocupam posições de terço inferior das vertentes, locais de acumulação de fluxo de escoamento, porém não apresentam saturação hídrica. Ocorrem em segmentos côncavos

com baixa energia erosiva. Nesses ambientes os processos pedogenéticos predominam sobre os morfogenéticos. Essa unidade ocupa predominantemente o terço inferior da bacia, excetuando as planícies.

A unidade 3 (Figura 5.1-C) detém classes com valores baixos de umidade ( $w_1$  e  $w_2$ ), combinado a classes com baixos valores do ICMF ( $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ ), do ICTS ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  e  $\tau_4$ ) e declividade inferior a 8%. A combinação dos atributos resulta em baixo potencial de atuação dos processos de morfogênese, baixa capacidade de transporte de material por erosão hídrica, evidenciados pelas combinações de  $\Omega$ ,  $\tau$  e  $\alpha$ . São ambientes bem drenados, situados em interflúvios preservados e em posições de terço superior de vertentes convexadas. As boas condições de drenagem do solo são evidenciadas pela combinação de baixos valores encontrados nas classes de  $w$ , associados aos baixos valores de fluxo acumulado pela área de contribuição, devido a posição de topo e terço superior dessa unidade.

A unidade 4 (Figura 5.1-D) combina valores elevados de ICMF ( $\Omega_3$ ), com IU inferior a  $w_6$  e declividades superiores a 8%. As geoformas decorrentes dessa configuração expressam alto potencial de transporte de material, situados predominantemente nos terços intermediários das vertentes, onde a associação da área de contribuição de acúmulo de fluxo hídrico de montante aos valores altos de declividade resulta em paisagens com solos bem drenados, com elevado potencial ao transporte de material por erosão hídrica de fluxo laminar. Nesses ambientes os processos morfogênicos prevalecem sobre a pedogênese.

A unidade 5 (Figura 5.1-E) representa um ambiente com forte atuação morfogenética, onde os processos erosivos atuam mais intensamente na bacia, constituem ambientes bem drenados, com solos menos desenvolvidos em relação aos demais ocorrentes na área de estudo. São resultantes da combinação da classe com valor superior a  $\Omega_4$  do ICMF, associados a IU inferior a  $w_5$ , declividade superior a 8% e elevados valores de ICTS.

O mosaico que contém as cinco unidades geomórficas na bacia do arroio do Corvo (Figura 5.1-F) foi interpretado visando definir as unidades preliminares de solos, resultando em três classes no primeiro nível categórico do SiBCS (EMBRAPA, 2006): Latossolos, Cambissolos e associação de Organossolos+Gleissolos (Figura 5.2).

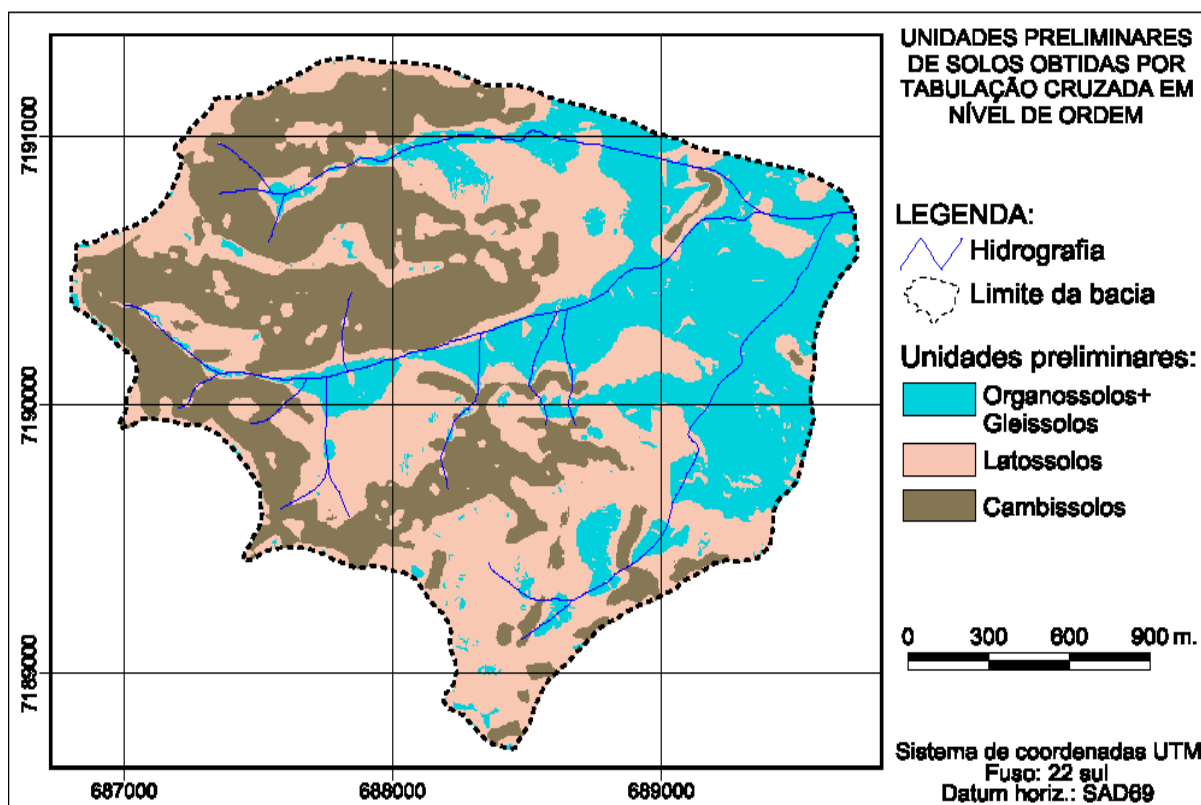


FIGURA 5.2 - MAPA PRELIMINAR DE UNIDADES DE SOLO OBTIDO POR MEIO DE TABULAÇÃO CRUZADA ENTRE OS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

Organossolos apresentam conteúdo de constituintes orgânicos preponderantes em relação aos minerais, saturação por água permanente ou periódica, ou ocorrem em áreas úmidas de ambiente altomontanos. A ordem dos Gleissolos caracteriza-se por hidromorfia e forte gleização, resultante de processos de redução do ferro por efeito de flutuação de nível do lençol freático, em condições de regime de excesso de umidade permanente ou periódica EMBRAPA (2006).

De acordo com essas características ambos estão associados a ambiente úmidos, com saturação hídrica e acumulação de matéria orgânica. Têm ocorrência em regiões planas e alagadas, geralmente em planícies de inundação de rios e córregos e áreas deprimidas (IBGE, 2007). Essa associação de grupamentos está relacionada com a unidade geomórfica 1, por isso, foi interpretada como a unidade de mapeamento preliminar de solo Organossolos+ Gleissolos (Figura 5.2).

Esses solos situam-se no terço inferior da bacia do arroio do Corvo e apresentam caráter hidromórfico. Estão associados, principalmente, à áreas de baixada e várzea na área de estudo, onde ocorrem, predominantemente, solos hidromórficos e semihidromórficos. Os solos hidromórficos são solos com gênese relacionada à saturação hídrica plena durante períodos

significativos no ano, com subsequente morfologia expressa por processos de redução (gleização e/ou mosqueados) dentro de 50 cm de profundidade. Os semi-hidromórficos são solos cuja formação está relacionada à presença do caráter gleico, eventualmente podendo ser identificado o regime hídrico de saturação plena do solo, porém em curtos períodos do ano (CURCIO, 2006).

Os Latossolos são solos constituídos por horizonte B latossólico. Apresentam evolução avançada com atuação expressiva de processo de latolização, resultando em maior intemperização dos minerais constituintes e os Cambissolos constituem um grupamento de solos pouco desenvolvidos com horizonte B incipiente, evidenciando uma pedogênese pouco avançada (EMBRAPA, 2006). Estes solos são caracterizados como não-hidromórficos, isto é, com gênese relacionada à não-saturação hídrica (CURCIO, 2006).

Nos pedimentos inferiores da bacia, representados na unidade 2, ou nas partes elevadas, em interflúvios preservados, delineados na unidade 3 (Figura 5.1), predominam Latossolos (Figura 5.2). Os interpretados pela unidade 2 fazem limite com as unidades de solos de caráter hidromórfico; apresentam relevo plano em pedimentos amplos inferiores, situados entre o terço médio das vertentes e a planície aluvial. São resultantes do processo de retrabalhamento das vertentes, à montante (LIMA, 2005), com contribuição de material alóctone. Sua posição na paisagem implica em maior acúmulo de fluxo hídrico resultando em maior disposição de água. Ao contrário dessas características, os Latossolos resultantes da unidade 3 situam-se nas posições de interflúvio, em divisores de água aplainados da bacia. Constituem pedimentos mais antigos preservados, sem retrabalhamento atual de material. Essas áreas são aplainadas, com relevo suave ondulado, constituídos por solos profundos e bem drenados.

Os Cambissolos (Figura 5.2) são representados pelas unidades geomórficas 04 e 05 (Figura 5.1). Segundo Lima (2005) esses solos se localizam em vertentes com relevo predominantemente ondulado e nos interflúvios relativamente estreitos, onde não há, em geral, condições para a formação de solos mais evoluídos. Os Cambissolos da unidade 05 apresentam maior inclinação das vertentes e maiores valores dos índices de corrente de máximo fluxo e capacidade de transporte de sedimentos e menor valor do índice de umidade, em relação à unidade 04.

Para averiguar a adequabilidade da delimitação das unidades preliminares de solos mapeadas, foram avaliadas cinquenta e três amostras de campo (Quadro 5.1), interpretadas até o quarto nível taxonômico da EMBRAPA (2006), representadas na forma de pontos sobre as unidades mapeadas (FIGURA 5.3). A importância da checagem de campo é destacado por

Ippoliti, *et al.* (2005), de modo não só a observar variações não evidentes no material cartográfico, mas também promover ajustes, onde necessário.

Pt.	Classe de solos	Pt.	Classe de solos
1	CXvd - Cambissolo Háplico Alumínico Ta Distrófico típico	28	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico
2	LVAe - Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico câmbico	29	CHd - Cambissolo Húmico Distrófico típico
3	CXbd - Cambissolo Háplico Alumínico Tb Distrófico típico	30	CHd - Cambissolo Húmico Distrófico típico
4	CXbd - Cambissolo Háplico Alumínico Tb Distrófico típico	31	LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico
5	CXbd - Cambissolo Háplico Alumínico Tb Distrófico típico	32	LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico câmbico
6	CXbd - Cambissolo Háplico Alumínico Tb Distrófico típico	33	LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico câmbico
7	CXbd - Cambissolo Háplico Alumínico Tb Distrófico típico	34	LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico câmbico
8	CXbd - Cambissolo Háplico Alumínico Tb Distrófico típico	35	LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico câmbico
9	LVAe - Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico câmbico	36	LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico câmbico
10	CXa - Cambissolo Háplico Alumínico típico	37	LVAe - Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico câmbico
11	CXa - Cambissolo Háplico Alumínico típico	38	LVd - Latossolo Vermelho Distrófico câmbico
12	CXa - Cambissolo Háplico Alumínico típico	39	LVd - Latossolo Vermelho Distrófico câmbico
13	CXa - Cambissolo Háplico Alumínico típico	40	LVd - Latossolo Vermelho Distrófico câmbico
14	CXa - Cambissolo Háplico Alumínico típico	41	LVd - Latossolo Vermelho Distrófico típico
15	CXa - Cambissolo Háplico Alumínico típico	42	LVe - Latossolo Vermelho Eutrófico câmbico
16	CXa - Cambissolo Háplico Alumínico típico	43	GXvd - Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico
17	CXa - Cambissolo Háplico Alumínico típico	44	GMa - Gleissolo Melânico Alumínico típico
18	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico	45	GMd - Gleissolo Melânico Distrófico típico
19	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico	46	Gme - Gleissolo Melânico Eutrófico típico
20	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico	47	OYs - Organossolo Mésico Sáprico típico
21	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico	48	OYs - Organossolo Mésico Sáprico típico
22	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico	49	OYs - Organossolo Mésico Sáprico típico
23	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico	50	CXvd - Cambissolo Háplico Alumínico Ta Distrófico típico
24	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico	51	CXvd - Cambissolo Háplico Alumínico Ta Distrófico típico
25	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico	52	GMd - Gleissolo Melânico Distrófico típico
26	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico	53	LVAe - Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico câmbico
27	CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico		

QUADRO 5.1 – DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE DE CAMPO

As amostras de solos avaliadas que coincidem com a delimitação da unidade de Organossolos+Gleissolos são: 15, 32, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49 e 52 (Quadro 5.1 e Figura 5.3), destas amostras duas não corresponderam com a classe de solo dessa unidade, sendo a primeira um Cambissolo Háplico Alumínico típico e a segunda um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico câmbico. Em checagem de campo foi verificado que nesses dois pontos a unidade de Organossolos+Gleissolos ficou superestimada nas proximidades e entorno dos pontos 32 e 15, evidenciando que os quatro atributos topográficos utilizados na obtenção das unidades por tabulação cruzada em classes discretas mostrou-se insuficiente para definir limites precisos nas áreas desses pontos. Algumas incongruências também foram percebidas em pequenos polígonos dessa classe que se situam em posições de topo.

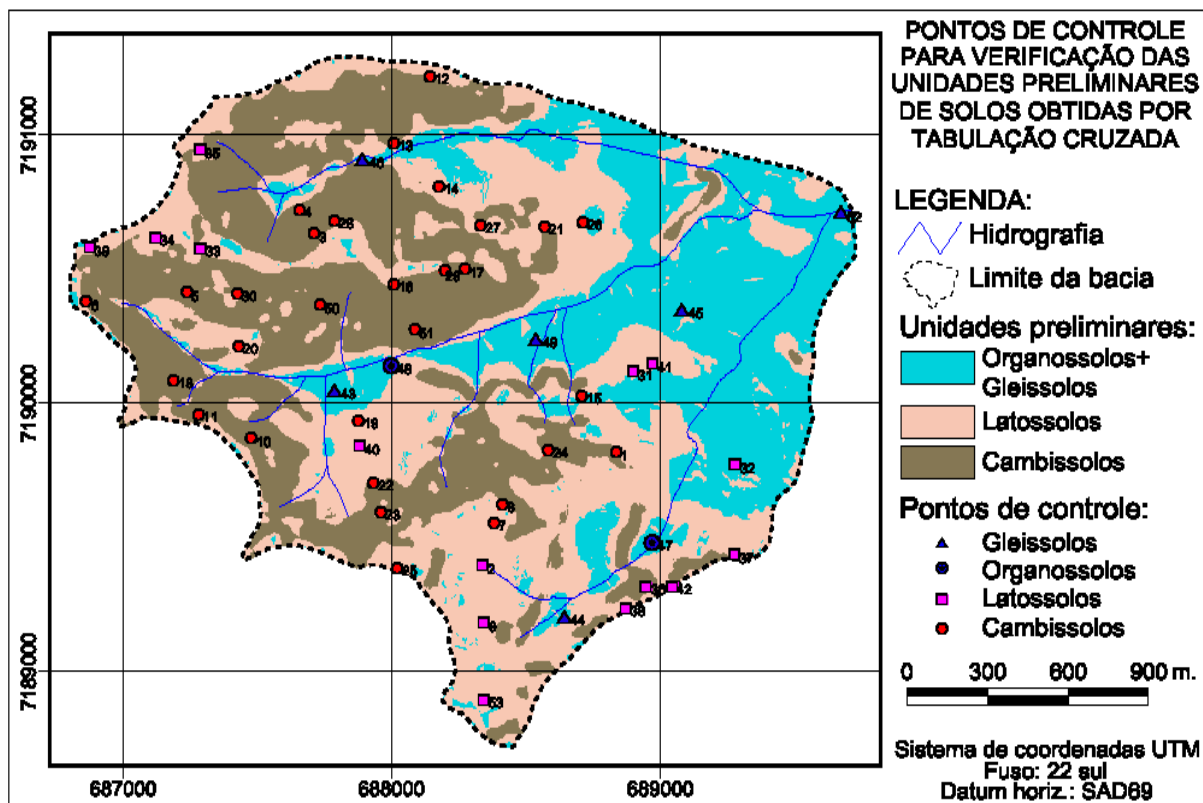


FIGURA 5.3 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLES PARA VERIFICAÇÃO DAS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA

Constatou-se que as inconsistências verificadas em posições de topos e planícies estão relacionadas ao nível de generalização da representação topográfica do MDT, uma vez que este foi gerado a partir da base cartográfica com curvas de nível com 5 metros de equidistância vertical, limitando, portanto, considerar formas do relevo que não representadas nesse intervalo altimétrico, principalmente em áreas mais planas, em posições de topos e divisores d'água e nas planícies.

Na unidade interpretada como Latossolo, verificaram-se vinte e duas amostras sobrepostas: 2, 7, 8, 9, 14, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 31, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 53 (Quadro 5.1e Figura 5.3), sendo que nove delas não conferem com a mesma classe, em nível de ordem, da unidade mapeada. Percebeu-se que dentre as amostras não coincidentes os Cambissolos de caráter latossólico foram inclusos em grande número nessa unidade, amostras: 19, 20, 21, 25, 26 e 27. A classe de solo com caráter latossólico apresenta horizonte B incipiente, porém com características similares às do B latossólico, contudo não atende aos requisitos para ser classificado como um Latossolo (EMBRAPA, 2006). Devido à classe Cambissolos de caráter latossólico ocorrer em paisagens semelhantes à do Latossolo sobre a Formação Guabirotuba, pois as classes discretizadas dos atributos topográficos se assemelham

nessas áreas, houve dificuldade em separá-las no método de mapeamento por tabulação cruzada.

A unidade dos Latossolos apresentou ainda intersecção com amostras de Cambissolo Háplico Alumínico Ta Distrófico típico, Cambissolo Háplico Alumínico Tb Distrófico típico, nas amostras 7 e 8, e Cambissolo Háplico Alumínico típico na amostra 14. A presença dessas discordâncias demonstra que há limitações das variáveis aqui adotadas, em virtude principalmente da abrangência das classes dos atributos que foram discretizadas em intervalos arbitrários. Outra indicativa dessa situação é a necessidade de serem testados outros atributos topográficos para uma melhor delimitação entre os Latossolos e Cambissolos sobre a Formação Guabirotuba. Outrossim, indicam que, os índices secundários e a declividade não são suficientes para distinção dessa unidade de solos na área de estudo.

Na unidade delineada como Cambissolo as amostras analisadas que estão contidas no polígono são: 1, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 22, 23, 24, 28, 29, 30, 36, 50 e 51 (Quadro 5.1 e Figura 5.1). Dessas, apenas a amostra de verificação de campo 36 é discordante da unidade, que corresponde a Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico câmbico. No entanto, esse ponto pode ser considerado como uma inclusão na unidade de mapeamento. Outrossim, é importante salientar que, sobre a Formação Guabirotuba, em alguns casos os Cambissolos e Latossolos ocorrem concomitantemente em relevo aplainado e são morfologicamente semelhantes, sendo que o segundo se diferencia por apresentar  $CTC < 17$  cmol/kg de argila. Nesse sentido, Lima (2005) comenta que Cambissolos dessa região apresentam comportamento próximo a Latossolos em termos de risco a erosão, apesar de ter argila de atividade alta (Ta) e não possuir estrutura tão desenvolvida, principalmente pelo fato destas unidades de solos serem bem drenados, profundos e estarem localizados em relevo suave ondulado em posição de topo.

Uma das limitações verificadas no método por tabulação é que se faz necessário discretizar os atributos topográficos, para que a partir dessas classes seja realizada a sobreposição das variáveis. Os intervalos adotados para separação das classes são arbitrários e subjetivos, além de que necessitam de uma avaliação preliminar das relações entre as classes dos atributos topográficos com a distribuição das classes de solos existentes.

## 5.2. PREDIÇÃO POR REDE NEURAL ARTIFICIAL

A combinação de atributos superficiais e estratigráficos é usada para identificar populações de solos, pois sua posição na paisagem pode ser considerada uma aproximação geográfica (RUHE, 1956). Assim, é possível deduzir que uma classe taxonômica de solos contém atributos que são correlacionados com a forma do relevo e/ou outro atributo superficial identificável dentro da paisagem, particular do solo (YOUNG e HAMMER, 2000).

As RNA's como método de integração de variáveis que visam à predição de unidades de mapeamento de solos, embora ainda bastante incipiente no Brasil, conta com a contribuição dos trabalhos de Chagas (2006) e Sirtoli (2008).

O emprego das RNA's para classificação de unidades preliminares de mapeamento de solos na bacia do arroio do Corvo considerou um conjunto de variáveis, designadas atributos topográficos primários, secundários e a geologia. Inicialmente foram executados inúmeros treinamentos com diferentes combinações de parâmetros, aplicados em todas as variáveis, alternando o número de camadas, de neurônios por camadas, de épocas, taxas de momento e de erro de aprendizado. A arquitetura mais adequada foi com camada de entrada em função de todas as variáveis, sete atributos topográficos mais a geologia; duas camadas intermediárias escondidas, a primeira com centro e trinta neurônios e a segunda com quarenta e três, conforme a regra de Hilton (1989); e a camada de saída em função das unidades de mapeamento de solos consideradas, que constituem três classes de solos em nível de ordem, com algoritmo de aprendizado por retropropagação de erros.

A RNA foi treinada com setenta e cinco amostras para cada classe de solo e a verificação foi com vinte e cinco amostras. O treinamento que apresentou o menor número de iterações para convergência dos resultados foi com todas as variáveis e a rede convergiu em 1581 épocas. Outras arquiteturas testadas não apresentaram boa convergência da RNA.

A partir da rede treinada com a melhor combinação de variáveis, os parâmetros foram aplicados a todo conjunto de dados, cujo processo consiste na simulação da RNA, que resultou na delimitação de três classes preliminares de solos na bacia, no primeiro nível hierárquico do SiBCS (EMBRAPA, 2006): Organossolos+Gleissolos, Latossolos e Cambissolos (Figura 5.4).

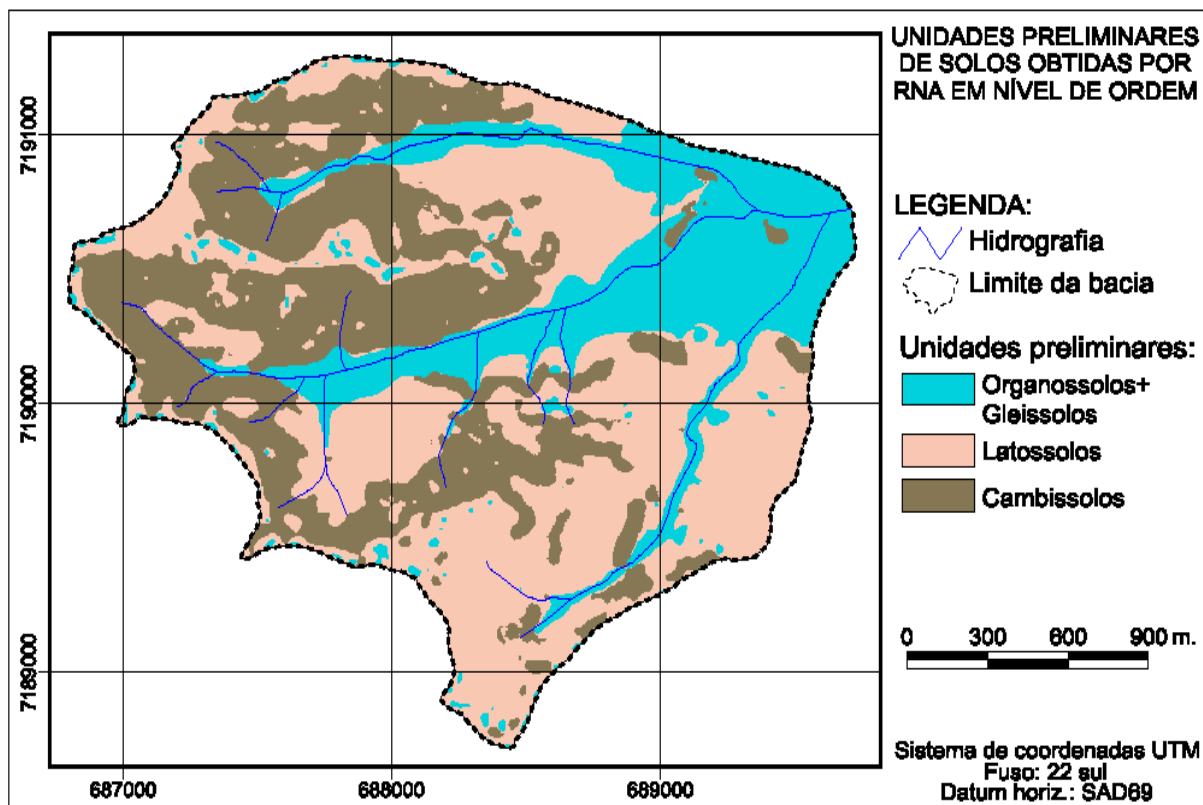


FIGURA 5.4 - MAPA DE UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADOS POR RNA

A aceitação do mapa preliminar de solos classificado pela RNA, contou com a validação por reconhecimento expedito de campo, onde foram confirmados os limites das classes. Também fez-se a conferência por meio das cinquenta e três amostras de controle, relacionadas no Quadro 5.1.

Dentre as oito amostras de solos avaliadas, em controle de campo, que representam Organossolos ou Gleissolos, todas coincidem com a delimitação da unidade Organossolo+Gleissolo classificada pela RNA (Quadro 5.1 e Figura 5.5), o que demonstra que o limite obtido pela RNA se apresentou melhor, em comparação a essa mesma classe obtida no método por tabulação cruzada que apresentou resultado divergente em duas amostras.

A Figura 5.6 apresenta exemplo ilustrativo de um perfil de Organossolo presente na bacia (ponto 48) e a Figura 5.7 um perfil de um Gleissolo (ponto 49), ambos na mesma unidade preditiva, agrupados como solos de caráter hidromórfico.

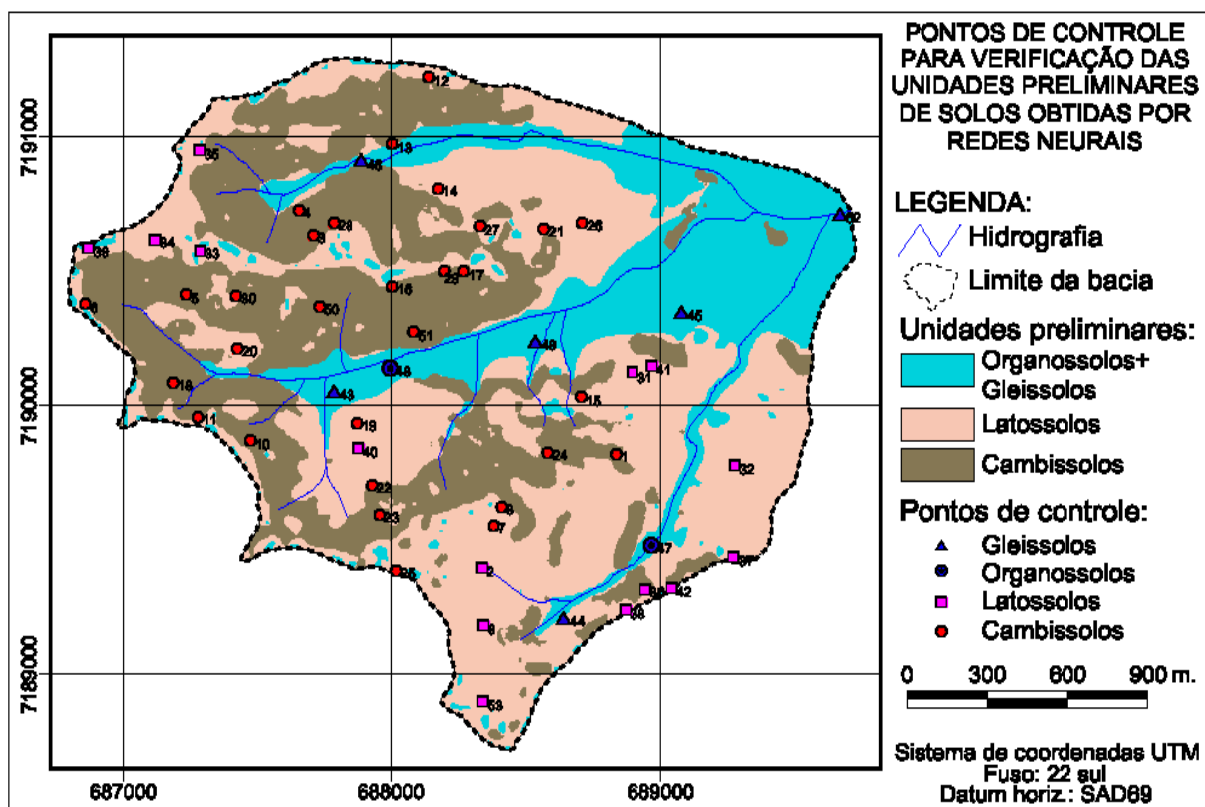


FIGURA 5.5 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE DE CAMPO PARA VERIFICAÇÃO DO MAPA DAS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR RNA



FIGURA 5.6 - PERFIL DE ORGANOSSOLO REFERENTE AO PONTO 48  
AUTOR: A. SIRTOLI (2006)



FIGURA 5.7 - PERFIL DE GLEISSOLO REFERENTE AO PONTO 49  
AUTOR: A. SIRTOLI (2006)

Apenas uma das amostras de campo de Latossolo (ponto 36), dentre as quinze que contam no Quadro 5.1, uma não coincidiu com a unidade de Latossolo obtida pela RNA (Figura 5.5). A amostra 36 representa um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico câmbico, está situada sobre uma unidade classificados como Cambissolo. A discordância dessa amostra mostra-se aceitável, pois ela representa uma inclusão sobre a unidade, devido à generalização cartográfica. A Figura 5.8 apresenta um perfil de Latossolo, referente ao ponto 31.



FIGURA 5.8 - PERFIL DE LATOSSOLO REFERENTE AO PONTO 31  
AUTOR: A. SIRTOLI (2006)

Dentre as amostras de campo da classe dos Cambissolos, dez não coincidiram com a unidade de Cambissolo obtida pela RNA: amostras 7, 8, 14, 15, 19, 20, 21, 25, 26 e 27, evidenciadas na Figura 5.5 e descritas no Quadro 5.1. Esse resultado demonstra dificuldades nesses pontos específicos, onde as características do relevo são semelhantes e os atributos topográficos possuem valores equivalentes aos encontrados para Latossolos, dificultando assim o aprendizado da RNA e, por consequência, sua classificação. Em alguns casos as divergências se devem a inclusões dos pontos sobre as unidades mapeadas, devido a generalizações na representação.

A Figura 5.9 demonstra dois perfis de Cambissolos situados na bacia do arroio do Corvo, referentes aos pontos 29 e 30.

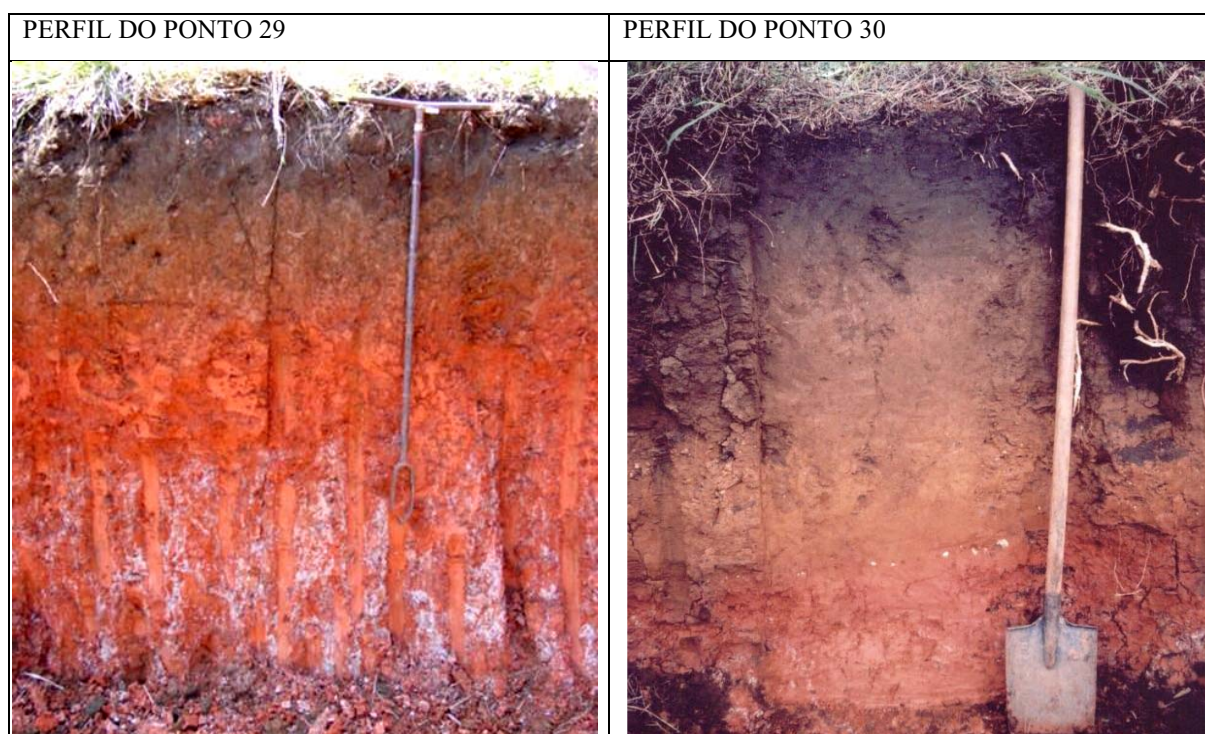


FIGURA 5.9 - PERFIL DE CAMBISSOLO REFERENTE AOS PONTOS 29 E 30  
AUTOR: A. SIRTOLI (2006)

As unidades de Latossolo e Cambissolo classificadas pela RNA mostraram-se equivalentes às obtidas por tabulação cruzada, segundo critérios de avaliação com as amostras de campo, pois apresentaram o mesmo número de pontos discordantes.

Portanto, as características do relevo mostraram-se diretamente relacionadas à distribuição dos solos na bacia do arroio do Corvo. Nela os atributos topográficos foram eficientes na parametrização do relevo e demonstraram potencial para serem aplicados em modelos preditivos de solos. A integração dessas variáveis em SIG e RNA apresentaram

resultados satisfatórios, oferecendo instrumentos auxiliares à cartografia e ao levantamento de solos em escala local.

### 5.2.1. Análise de validação cruzada múltipla da RNA

Com o objetivo de verificar a influência de cada variável na classificação das unidades de mapeamento de solos na bacia do arroio do Corvo pela RNA, foi aplicado o método validação cruzada múltipla, ou “deixe um de fora”, (HAYKIN, 2001), no qual foram executadas simulações substituindo as variáveis uma a uma por uma imagem de valor zero. Esse procedimento exclui a contribuição da variável substituída e permite identificar o quanto cada uma mostra-se representativa no conjunto e contribui na classificação das unidades de solos consideradas. Outra combinação simulada na RNA foi com quatro variáveis na camada de entrada: declividade, ICTS, IU e ICMF, as mesmas utilizadas na classificação pelo método de tabulação cruzada.

Os critérios adotados para avaliar a contribuição de cada uma das variáveis extraídas do conjunto foi o erro médio quadrático (EMQ), o percentual de acertos na etapa de treinamento, o número de iterações na convergência da rede, o coeficiente Kappa e a Exatidão Global (EG), associados à avaliação visual da imagem. Os resultados obtidos podem ser verificados na matriz de significância dos conjuntos avaliados (Tabela 5.1).

TABELA 5.1 – MATRIZ DE SIGNIFICÂNCIA DOS CONJUNTOS AVALIADOS

<b>Variáveis consideradas no processamento</b>	<b>Coefficiente Kappa</b>	<b>Exatidão Global</b>	<b>Iterações</b>	<b>EMQ</b>	<b>Acertos no treinamento</b>
Todas as variáveis	1	1	1581	0,0334	97,33%
Subtração da hipsometria	0,7919	0,8683	2109	0.0675	96%
Subtração da declividade	0,7524	0,8466	3022	0.0949	94,66%
Subtração do plano de curvatura	0,7242	0,8226	1814	0.0469	97%
Subtração do perfil de curvatura	0,7495	0,8384	2171	0.0420	96%
Subtração do ICMF	0,7098	0,8207	2776	0.1249	96%
Subtração do IU	0,6543	0,7851	3444	0.0813	96%
Subtração do ICTS	0,7537	0,8484	1934	0.1352	94,66%
Subtração da geologia	0,431	0,605	3452	0.1396	94,66%
Subtração do conjunto: hipsometria, geologia, plano e perfil de curvatura	0,4662	0,6384	11212	0,1291	93,33%

O conjunto formado por todas as variáveis destacou-se por apresentar menor número de iterações na convergência da rede, menor valor de EMQ e maior percentual de acertos no

treinamento, aceito como melhor resultado. Por isso foi tomado como referência na comparação com os demais conjuntos formados pela subtração de uma variável; desse modo o coeficiente Kappa e EG mostram-se como iguais a 1. A imagem resultante é utilizada como parâmetro de comparação na avaliação visual é a apresentada na Figura 5.10-A.

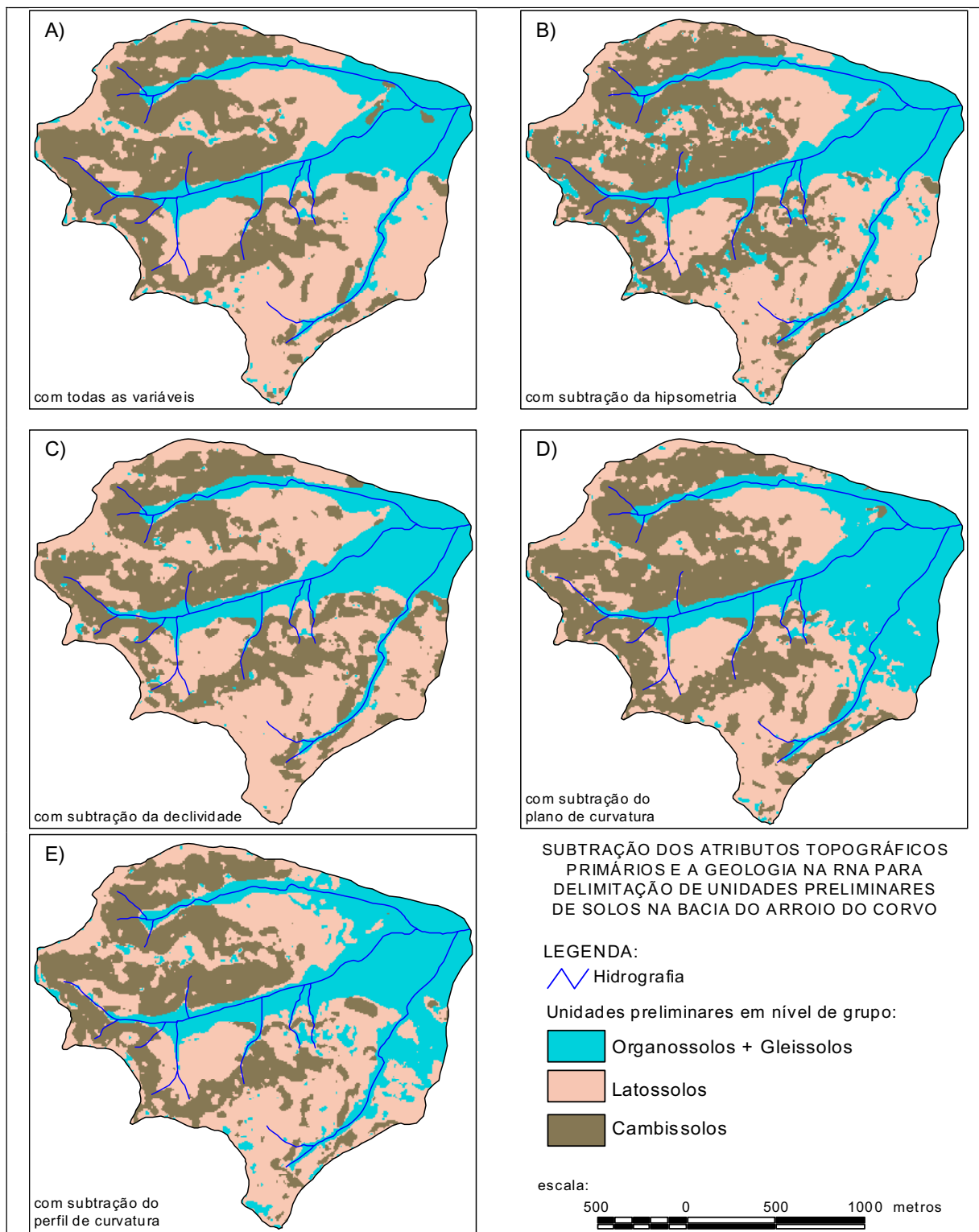


FIGURA 5.10 - SUBTRAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PRIMÁRIOS E GEOLOGIA NA RNA

Na primeira etapa da validação cruzada foram substituídos os atributos topográficos primários. Ao extrair a variável hipsometria do conjunto, a imagem resultante (Figura 5.10-B) mostrou problemas na classificação da unidade de Organossolo+Gleissolo (O+G), criando diversos pequenos polígonos distribuídos entre as unidades de Cambissolos e Latossolos, predominantemente nas posições intermediárias das vertentes. O peso aleatório atribuído pela rede à variável hipsometria foi de elevado valor, representativo, principalmente, para determinar que na área de estudo a classe O+G está situada nas menores elevações, correspondentes às planícies, assim, quando suprimida essa variável do conjunto aumentaram os erros de classificação.

Outro problema verificado foi a dificuldade de definir os limites precisos entre os Latossolos e Cambissolos, principalmente nas posições mais elevadas, onde ocorreram ruídos na forma de pequenos polígonos dispersos. Isso se deve pelo fato de que a rede não apresentou uma classificação adequada dos solos na bacia com a ausência da hipsometria no conjunto de variáveis, pois a distribuição dos solos está relacionada com a elevação, onde os Cambissolos tendem a prevalecer em posições intermediárias das vertentes, Latossolos nas posições de terço inferior das vertentes e topos e Organossolos+Gleissolos nos menores valores de elevação, as áreas de planícies.

Apesar das limitações apresentadas, esse conjunto apresentou a melhor correspondência com a imagem de referência, considerando a subtração dos atributos topográficos primários. Sua exatidão global é de 0,8683 (Tabela 5.2), que significa que há 86% de concordância entre as imagens e o coeficiente Kappa obtido é de 0,7919, que segundo critérios qualitativos de Landis e Koch (1977) (Tabela 5.2), apresenta qualidade muito boa. Resultou no número de iterações não muito distante ao obtido com a imagem referência, o EMQ e percentual de acertos no treinamento foram também aproximados.

TABELA 5.2 – 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
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Boa
0,61 – 0,80	Muito Boa
0,81 -1,00	Excelente

FONTE: ADAPTADO DE LANDIS E KOCH (1977)

A declividade se mostrou a variável mais efetiva na predição das unidades de mapeamento de solos, entre os atributos topográficos utilizados por Crivelenti (2009). Seu emprego é de uso generalizado em levantamento de solo, associada geralmente ao atributo de elevação (IPPOLITI *et al.*, 2005). Diversos outros autores, dentre eles Klingebiel *et al.* (1987), Dikau (1989), Irvin *et al.* (1997), Hermuche *et al.* (2003), Chagas (2006), Sirtoli *et al.* (2008b), Sirtoli (2008) e Cáten *et al.* (2009), utilizaram a declividade, conjuntamente com outras variáveis, em modelos preditivos de mapeamento de solos.

A substituição da variável declividade na camada de entrada da RNA pela imagem de valor zero se mostrou insuficiente para a classificação adequada de unidades de solos que ocupam as posições de topos e terços inferiores. Apresentou extrapolação dos limites da unidade de Latossolos situados nos topos, superestimando sua área sobre os Cambissolos (Figura 5.10-C). Isso se deve ao fato de que na fase de treinamento a rede não obteve o aprendizado de os Latossolos que estão situados nos divisores têm seus limites condicionados, sobretudo, à declividade. Outro erro cometido foi a criação de polígonos de Cambissolos em algumas posições de terço inferior, onde prevalece a ocorrência de Latossolos na bacia, provenientes do material retrabalhado das vertentes, o que demonstra que a variável declividade nesses ambientes é determinante para identificar unidades de Latossolos.

No entanto, de modo geral, esse conjunto apresentou bom resultado de comparação com a imagem referência, cuja EG foi igual a 0,8466, expressando 84% de concordância entre as unidades classificadas, e o coeficiente Kappa foi de 0,7524, que equivale a muito boa qualidade de imagem (LANDIS e KOCH, 1977), mesmo necessitando do dobro de épocas, com 3022 interações para convergir, de apresentar menor percentual de acertos de treinamento e resultar em EMQ três vezes superior a imagem de referência (Tabela 5.2). Esses três últimos parâmetros indicam que a arquitetura da RNA utilizada apresentou maior dificuldade de classificação.

O atributo plano de curvatura, como regra geral, segundo Chagas (2006), apresenta relação à espessura dos solos, sendo que os mais profundos e mais evoluídos ocupam vertentes convexas, onde foram classificados por RNA Latossolos em posições de topo. Os solos mais rasos (lépticos, líticos, saprolíticos e câmbicos) e menos evoluídos tendem a ocorrer em vertentes côncavas, na bacia do arroio do Corvo, sobre elas ocorrem Cambissolos. A ocorrência desses solos mais rasos, associados a essas condições está relacionada, juntamente com a elevada declividade, com um maior fluxo convergente de água nestas áreas, o que favorece a morfogênese, levando estes solos a um constante rejuvenescimento por

erosão. As vertentes côncavas situadas em terço inferior com baixa declividade resultaram em Latossolos, enquanto vertente planares associadas à baixa declividade representam ambientes de hidromorfia, com saturação hídrica, geralmente associados às planícies aluviais, onde ocorrem Organossolos e Gleissolos.

O teste de validação cruzada com a subtração desse atributo apresentou como principal deficiência a identificação da unidade O+G, a qual é superestimada e seus limites avançam sobre áreas de Latossolos, situados nas posições inferiores das vertentes, próximos da planície (Figura 5.10-D). Esse resultado é explicado devido às áreas com incoerência na classificação apresentarem características similares às que ocorrem O+G, isto é, ambientes com: declividades inferiores a 3%, baixos valores hipsométricos, do ICMF e ICTS e altos valores do IU. Assim o atributo topográfico que diferencia essas áreas, e que define o limite entre os Latossolos e O+G é o plano de curvatura, uma vez que ambientes de hidromorfia apresentam valores igual ou muito próximo de zero, que correspondem a superfícies planares.

Na avaliação do conjunto os valores apresentaram-se satisfatórios, cujo coeficiente Kappa é 0,7242, muito bom de acordo com a classificação de Landis e Koch (1977) e EG de 0,8226, que corresponde a 82% de concordância com o mapeamento da imagem de referência (Tabela 5.2). A rede apresentou convergência com 1814 iterações, EMQ 0,0469 e 97% de acertos no treinamento, o que demonstra que, embora a classificação obtida com a ausência do atributo plano de curvatura não tenha oferecido resultados ruins, eles são inferiores aos obtidos com todo o conjunto. Isso demonstra a importância do plano de curvatura na identificação de unidades de solos, corroborando com as aplicações de Dikau (1989), Irvin *et al.* (1997), Chagas (2006), Sirtoli (2008), Cáten *et al.* (2009), Crivelenti (2009), que utilizaram diferentes métodos de integração na predição de solos.

Para Chagas (2006), os atributos de elevação, declividade, aspecto e plano de curvatura são os que mais se correlacionam com a distribuição dos solos, e a sua utilização facilitou a identificação de classificação de solo por meio de classificados por RNA e MAXVER.

Na análise de influência da variável perfil de curvatura, verificou-se que a retirada desse atributo do conjunto resultou em erros na determinação dos limites entre a unidade de O+G com os Latossolos que se situam nas posições inferiores das vertentes. Foram também erroneamente criados pequenos polígonos distribuídos sobre a unidade de Latossolos como O+G (Figura 5.10-E). A resposta a isso está associada à eficiência do atributo perfil de curvatura em permitir melhor delimitação de solos de caráter hidromórfico, uma vez que esses

estão muitas vezes associados à curvatura retilínea em relevo plano, onde na bacia geralmente aparecem associados às planícies aluviais em ambientes de saturação hídrica.

O conjunto composto pela subtração do perfil de curvatura apresenta coeficiente Kappa 0,7495, classificação muito boa da imagem comparando-a com o conjunto de referência, segundo classificação de Landis e Koch (1977). O EG foi de 0,8384, que corresponde a 84% de concordância entre as unidades mapeadas e a de referência. A convergência da rede ocorreu com 2.171 iterações, EMQ de 0,0420 e 96% de taxa de acertos no treinamento (Tabela 5.2).

Os resultados demonstram que embora a ausência do perfil de curvatura na simulação não tenha significado grandes erros na classificação da rede, é uma variável que juntamente com as demais melhora a predição de unidades de solos, principalmente nos limites entre solos de caráter hidromórficos e Latossolos situados em posições de colúvio, como é o caso que ocorre na bacia do arroio do Corvo.

O resultado obtido diverge dos resultados alcançados por Sirtoli (2008), que considerou que a o perfil de curvatura exerceu influência negativa na delimitação de unidades preliminar de solos em sua RNA, que foi aplicada em uma área de estudo como as mesmas características geológica, geomorfológicas e pedológicas. Chagas (2006) também não detectou relações explícitas entre esse atributo topográfico e a discriminação de solos em sua área de estudo, situada em Domínio de Mares de Morros (RJ).

Ao contrário desses dois autores, Crivelenti (2009) aponta que obteve resultados mais efetivos na predição de unidade de mapeamento de solos utilizando o perfil de curvatura do que utilizando o plano de curvatura, cuja área de estudo localiza-se na região central do estado de São Paulo. Muñoz (2009) evidencia também em seu trabalho que os solos puderam ser descritos pelas características locais a partir da curvatura vertical.

Portanto, a redução de qualidade no mapeamento de unidades de solos, quando extraídas as variáveis plano ou perfil de curvatura, demonstra que são de elevada importância na distinção e delimitação mais precisa de unidades de solos. Os resultados concordam com os preceitos de Pennock *et al.* (1987), de que o uso das variáveis perfil e plano de curvatura ajudam a identificar áreas de diferentes regimes de umidade, permitindo uma avaliação mais acurada da distribuição dos solos na paisagem. De acordo com Valeriano (2003) e Valeriano e Carvalho Júnior (2003), esses dois atributos topográficos estão diretamente relacionados ao acúmulo de água e matéria orgânica no solo e desempenham importante papel sobre os

processos de pedogênese. Para Moore *et al.* (1991) essas variáveis estão relacionadas ao fluxo hídrico, taxas de erosão e deposição e teor de água no solo, por isso esses atributos correlacionam-se às características de solos.

Na avaliação de significância dos atributos secundários, verificou-se que a o conjunto com ausência do índice de corrente de máximo fluxo (ICMF) apresenta coeficiente Kappa inferior aos das variáveis anteriormente analisadas, 0,7098, mas que na avaliação qualitativa de Landis e Koch (1977) representa muito boa classificação em comparação à imagem de referência. O parâmetro de Exatidão Global foi de 82% de concordância com a classificação obtida pela rede com todas as variáveis (Tabela 5.2).

Os principais erros verificados com a ausência do ICMF foram: a) limites superestimados dos Cambissolos sobre os Latossolos, principalmente nos divisores de água; b) criação de pequenos polígonos da classe de Cambissolos dispersos sobre unidades de Latossolos, principalmente na porção sul da bacia e em posições de terço inferior das vertentes; c) criação de pequenos polígonos da classe de Organossolo+Gleissolo distribuídos em posições de terço intermediário das vertentes, sobre unidades de Cambissolos e alguns desses nas posições de terço inferior sobre o domínio dos Latossolos (Figura 5.11-A).

A criação de pequenos polígonos, que constituí dados espúrios, demonstra que o atributo extraído é importante para integridade da classificação, devendo por isso ser considerado na fase de aprendizado e aplicado na fase de simulação da rede. A estreita relação entre solos e o ICMF foi apresentada no capítulo anterior e outrora evidenciada por Sirtoli *et al.* (2008a).

Esse conjunto de dados de entrada convergiu na rede com 2776 iterações, o EMQ obtido foi de 0,1249, muito superior aos obtidos com ausência de cada um dos atributos primários (Tabela 5.2). O percentual de acertos no treinamento foi de 96%. Os resultados mostram que a RNA utilizada teve maior dificuldade na interpretação dos solos com a ausência do ICMF na camada de entrada, em relação aos testes anteriores.

Quanto ao índice topográfico de umidade (IU), sua ausência no conjunto revelou ser o de maior relevância dentre todos os atributos topográficos utilizados na predição dos solos da área de estudo. Conforme aponta Sirtoli (2008), isso se deve porque o IU tem grande peso na separação das diferentes unidades de solos que se encontram em relevo aplainado, ou em baixadas, ambientes com possibilidade de acumulação de umidade, uma vez que, de acordo com McKenzie e Ryan (1999), esse índice é uma variável topográfica útil para compreender o

movimento de água e sedimento nas vertentes. Assim, a retirada dessa variável apresentou coeficiente Kappa igual a 0,6543 e EG de 0,7851, em comparação à imagem de referência (Tabela 5.2). Foi o conjunto que necessitou de maior número de épocas para convergir, em 3444 iterações, comparando aos anteriormente analisados. Isso corresponde ao aumento de dificuldade na classificação pela ausência do IU.

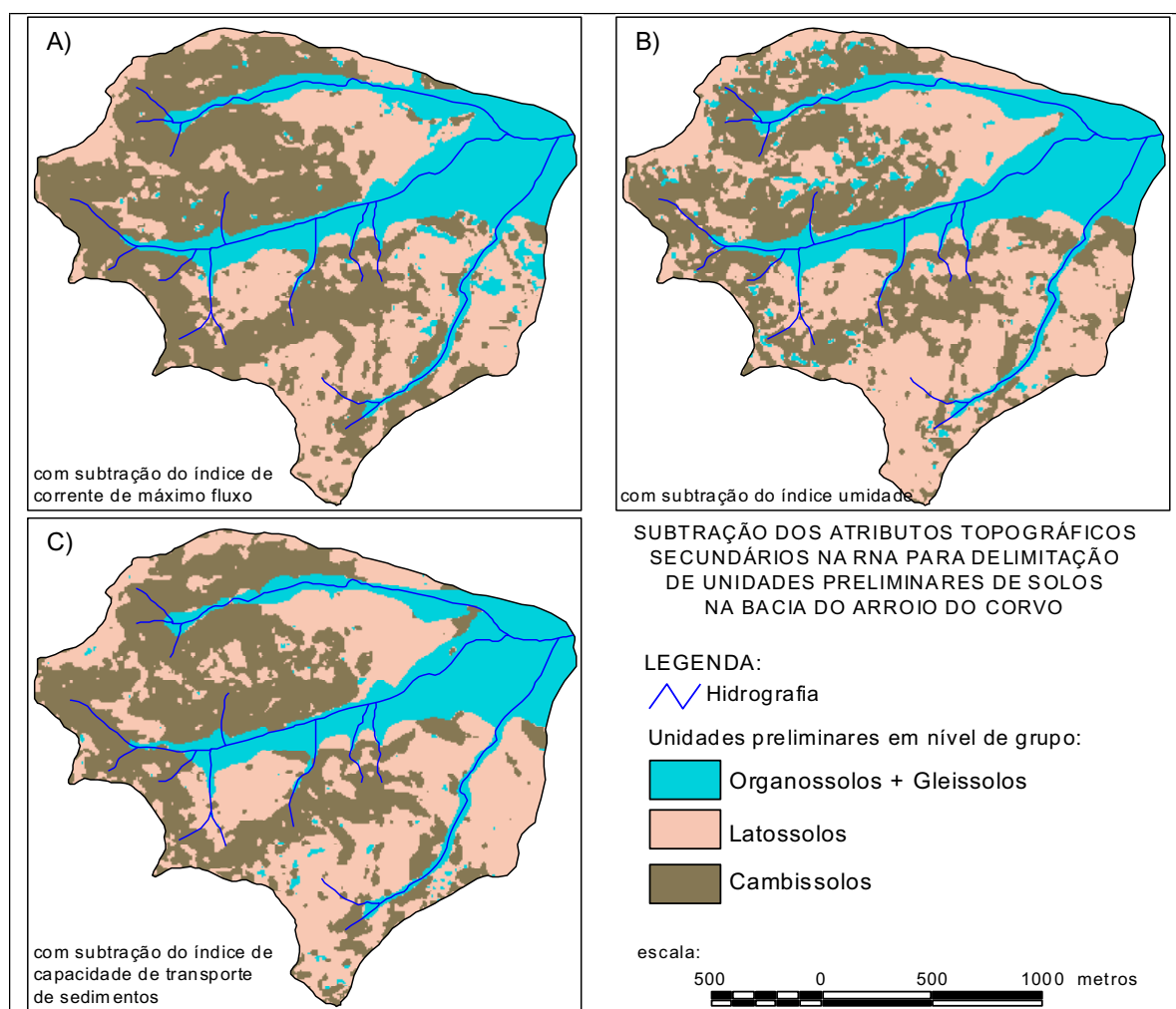


FIGURA 5.11 - SUBTRAÇÃO DAS VARIÁVEIS DOS ATRIBUTOS SECUNDÁRIOS NA RNA

Verifica-se na imagem classificada pelo conjunto (Figura 5.11-B) que ocorreram erros de classificação, principalmente por apresentar conjuntos de polígonos muito fragmentados para cada classe. Com isso, houve dificuldade de definição dos limites entre os Latossolos em posições de topos com os Cambissolos; foram criados diversos polígonos pequenos da classe de Organossolo+Gleissolo, distribuídos em posições elevadas, principalmente sobre o domínio dos Cambissolos, pequenos polígonos classificados como Cambissolos apareceram dispersos sobre áreas de domínio dos Latossolo. Por isso, a imagem tornou-se menos nítida.

Portanto, o IU é uma importante variável a ser considerada, uma vez que sua ausência dificultou a determinação precisa entre as unidades preliminares de mapeamento de solos; assim, na área de estudo, auxilia na determinação de limites mais precisos da unidade Organossolo+Gleissolo, situados em posição de planície. Em acordo com essa indicação, Chagas (2006) empregou esse índice na predição de unidade de solos evitando classificação equivocada, principalmente para separação dos Gleissolos, que ocorrem em relevo plano, de outras classes de solos que ocorrem em áreas plana e suave onduladas em topos de morros. Moore *et al.* (1993) verificou alta correlação desse índice com propriedades do solo, tais como espessura do horizonte A, teor de matéria orgânica, entre outros.

A substituição do índice de capacidade de transporte de sedimentos (ICTS) pela imagem de valor zero apresentou a melhor qualidade, em comparação com os outros dois conjuntos, dos quais foram substituídos os atributos topográficos secundários pela imagem de valor zero. Mostrou-se como o que menos afetou a qualidade da classificação pela RNA, dentre os atributos secundários utilizados na área de estudo. O coeficiente Kappa obtido foi de 0,7537 e EG 0,8484, que corresponde a concordância de 85% em relação a imagem de referência. A rede obteve convergência com 1934 iterações, resultando num alto EMQ igual a 0,1352, com 94,66% de acertos no treinamento (Tabela 5.2).

Apesar de apresentar melhores resultado em comparação com os dois conjuntos anteriormente avaliados, a ausência do ICTS no aprendizado e simulação da RNA apresentou erros e resultou na distribuição incorreta de pequenos polígonos de Cambissolos sobre a unidade de Latossolo (Figura 5.11-C), além de dificultar a delimitação de Latossolos situados nas posições de topos. A imagem resultante mostrou-se ainda com excesso de ruídos, constituídos por pequenas áreas com classificação errada.

Por isso, a ausência dessa variável na camada de entrada da Rede Neural diminuiu a eficiência no mapeamento de solos. Contribui com essa afirmativa a relação demonstrada entre as unidades de solos previamente mapeadas com esse índice, conforme é apresentado no capítulo anterior.

O conjunto testado na rede com a ausência da variável geologia, considerando apenas os atributos topográficos, resultou na pior classificação. A classe Organossolo+Gleissolo foi superestimada, não apresentando limites precisos com as demais unidades, e foi confundida com os Latossolos de baixada, apresentando muitos polígonos O+G distribuídos indistintamente de forma errada em toda área (Figura 5.12).

O índice Kappa obtido foi de 0,4310, qualidade boa, segundo critério de Landis e Koch (1977), e EG de 0,6050, que corresponde a 60% de acerto. Esses dois parâmetros também resultam no pior resultado comparativo com a imagem de referência. Por não considerar a geologia a RNA obteve baixo desempenho, com EMQ de 0,1396 e 94,66% de acerto de treinamento, e também demonstrou maior dificuldade de convergência com 3452 iterações (Tabela 5.2).

Portanto, verificou-se significativa relevância da geologia no aprendizado da Rede Neural e posterior classificação dos solos com melhor eficiência. Corroborando com essa constatação, Chagas (2006) considerou a geologia como uma das variáveis mais influentes na predição de solos obtida por RNA e MAXVER. Resultado semelhante foi obtido por Crivelenti (2009), que concluiu que a geologia foi a variável mais influente na predição das unidades de mapeamento de solos em seu trabalho.

Em testes de validação cruzada para mapeamento preliminar de solos, Sirtoli (2008) também apontou para a importância desta variável ambiental na classificação de solos por RNA, verificando a dependência pela geologia nos conjuntos avaliados. Esse autor percebeu que a retirada da geologia da rede acarretou na redução da exatidão da imagem classificada.

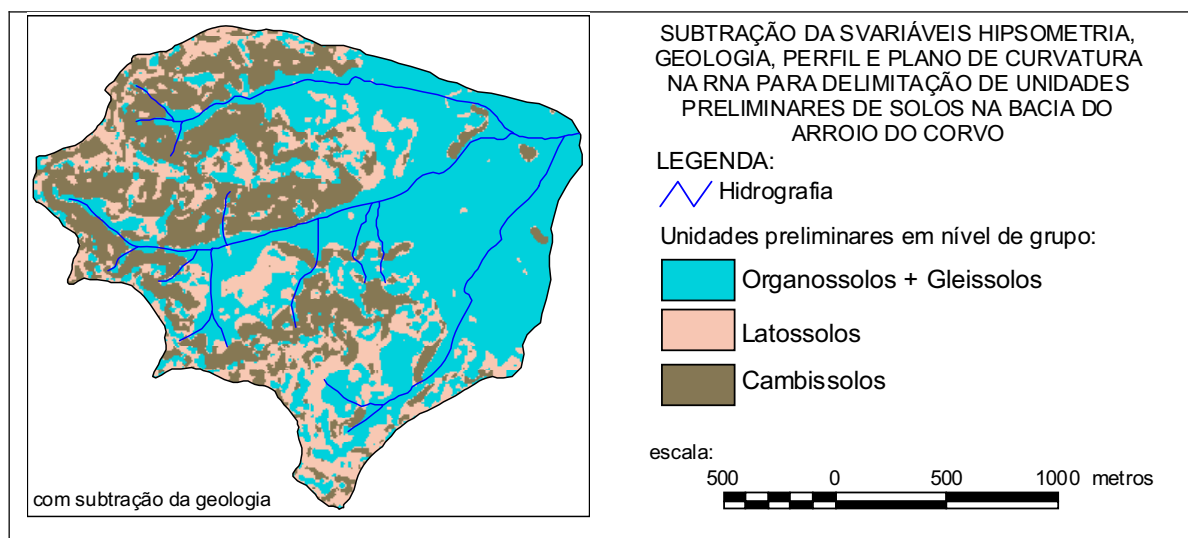


FIGURA 5.12 - SUBTRAÇÃO DA VARIÁVEL GEOLOGIA NA RNA

O último conjunto testado na rede considerou apenas quatro atributos topográficos: ICMF, IU, ICTS e declividade. A escolha desse conjunto foi pautada nas quatro variáveis utilizadas no mapeamento preliminar de solos por método de tabulação cruzada, visando com isso, obter uma classificação na RNA com as mesmas variáveis, a fim de compará-las.

O coeficiente Kappa da imagem classificada é de 0,4662 e EG de 0,6384, que corresponde a 64% de concordância com a imagem referência. Por se utilizar de poucos atributos a rede convergiu com 11.212 épocas, um número muito superior de iterações em comparação aos conjuntos anteriores. O EMQ obtido foi de 0,1291 e 93,33% de acertos de treinamento (Tabela 5.2).

As unidades mapeadas nesse conjunto apresentaram problemas, principalmente relacionados à dificuldade de definir limites mais precisos para a unidade de solos de caráter hidromórfico, a qual foi superestimada e incorporou áreas de Latossolos, tanto nas posições inferiores das vertentes como nos topos e divisores. Outro problema verificado foi a criação de pequenos polígonos da classe O+G que apareceram distribuídos em posições de Cambissolos nos terços intermediários das vertentes, além do elevado número de fragmentos nas classes, representando ruídos na forma de pequenos polígonos incorretos (Figura 5.13).

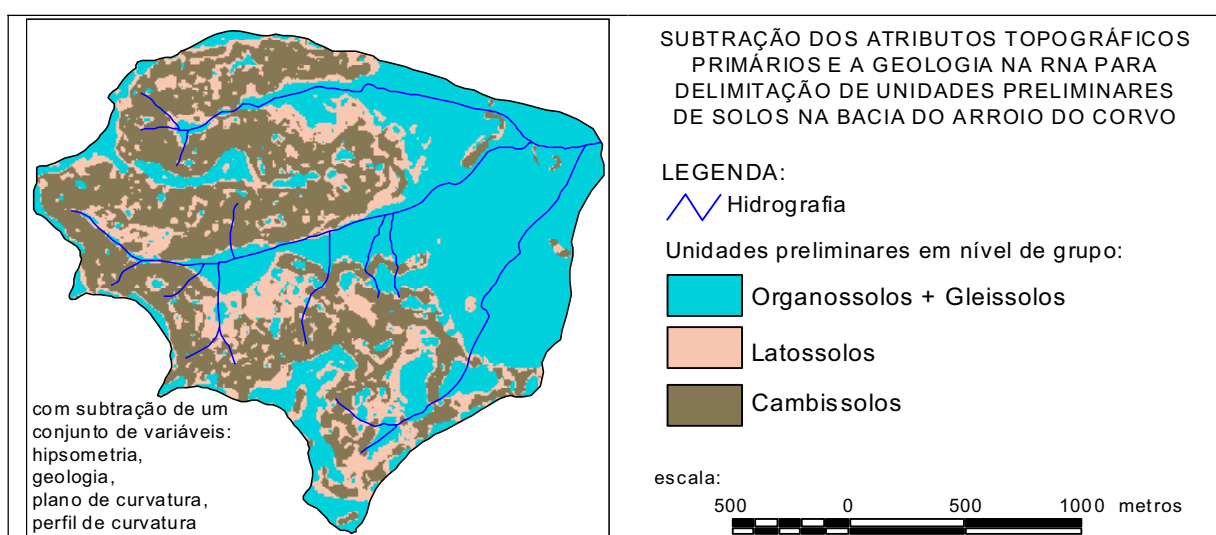


FIGURA 5.13 - INTEGRAÇÃO NA RNA DAS MESMAS VARIÁVEIS ADOTADAS NA DELIMITAÇÃO DE UNIDADES PRELIMINARES DO MÉTODO POR TABULAÇÃO CRUZADA

Apesar dos quatro atributos topográficos resultarem em unidades preliminares de solos com qualidade satisfatória no método de tabulação cruzada, sozinhos, se mostraram ineficientes para a classificação da RNA, pois as demais variáveis são importantes na forma de conjunto para o aprendizado da rede e para que resulte em uma classificação consistente.

As quatro variáveis se mostraram suficientes e adequadas na predição por tabulação cruzada porque nesse método os atributos são discretizados e as classes são preliminarmente comparadas com mapas de solos pré-existentes, fato que oferece informações prévias da relevância de cada atributo no processo de atribuição de pesos. Já no método das RNA isso

não ocorre, pois a mesma possui habilidade de utilizar dados não discretos, onde não é necessária uma análise de tabulação prévia das variáveis com classes de solos a priori; os pesos das variáveis são definidos aleatoriamente pela rede e não arbitrados pelo operador e também a combinação dos atributos é interpretada pela rede a partir das amostras de treinamento e verificação na etapa de aprendizado, onde se mostraram necessárias todas as variáveis.

Portanto, os testes realizados na validação cruzada não mostraram melhora na classificação das unidades de solos quando as variáveis, uma por uma, foram substituídas pela imagem de valor zero. Ao contrário disso, percebeu-se que o aprendizado da Rede Neural com os oitos nós da camada de entrada (atributos topográficos e geologia) resultou na melhor identificação das classes: onde os limites foram melhor definidos, ocorreram menos problemas com a geração de ruídos constituídos por pequenos polígonos não representativos, melhor convergência da rede com menor número de iteração, maior clareza do mapa e maior proximidade com a realidade de campo.

Verificou-se que embora o EMQ seja utilizado como uma medida do desempenho da RNA, os valores obtidos não se mostraram adequados para a escolha do melhor conjunto de variáveis, uma vez que não apresentou correlação direta aos coeficientes Kappa e EG.

### 5.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS UNIDADES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA, TABULAÇÃO CRUZADA E OS MAPEAMENTOS PRÉ-EXISTENTES

Após a classificação de uma imagem é desejável conhecer a confiabilidade do mapa obtido, a fim de avaliar sua qualidade. Essa avaliação pode ser feita comparando o resultado com um mapa ou outros levantamentos que descrevam a verdadeira classificação. Essa comparação permite identificar erros e visualizar sua distribuição espacial (CENTENO, 2003).

Desse modo, os mapas preliminares de solos obtidos pelo método de tabulação cruzada e classificados por Redes Neurais Artificiais foram comparados aos mapas de solos pré-existent na área de estudo, designados mapeamento (ou mapas) 01 e 02. Esse processo visa avaliar a qualidade das unidades preditivas com unidades mapeadas por método convencional. No entanto, antes dessa validação as unidades de mapeamento 01 e 02, classificados por Rocha (1990) e Lima (2005), foram comparadas entre si, considerando o primeiro nível hierárquico dos solos do SiBCS (EMBRAPA, 2006).

Os parâmetros utilizados nas avaliações de qualidade de imagem foram: a) o coeficiente Kappa; b) Exatidão Global (EG); c) a avaliação visual da imagem, com a diferenciação de áreas de concordância e discordância entre os mapas e d) avaliação da acurácia do ponto de vista do usuário e do produtor, por meio de análise da matriz de erro. Para facilitar as discussões e apontamentos nos mapas, relativos às áreas de concordância e discordâncias, foram enumeradas quatorze regiões.

### **5.3.1. Comparação entre as unidades de solos dos mapas pré-existentes**

Na avaliação geral entre os mapas foram obtidos valores de EG de 0,63, que revela haver 63% concordâncias entre as unidades e 37% de discordâncias. O coeficiente Kappa foi de 0,46, que segundo a classificação de Landis e Koch (1977), representam boa qualidade entre as imagens comparadas.

Esses parâmetros de avaliação geral entre os mapas não permitem analisar de forma quantitativa quais classes foram melhores ou piores classificadas, ou ainda, quais são as classes responsáveis pela maior parcela dos erros. Por isso, uma melhor avaliação foi obtida através da matriz de confusão ou erro (CENTENO, 2003). Dessa forma a avaliação da acurácia do ponto de vista do usuário (EU) e do produtor (EP), por meio da análise da matriz de erro, foi também aplicada nas análises comparativas entre os mapas, mediante algumas adaptações.

Uma matriz de erro apresenta valores de EU e EP, partindo do princípio de haver um produtor e outro usuário, onde uma das imagens é tomada como verdade (usuário) e a outra é comparada a essa verdade (produtor). No entanto, nas matrizes de erro que comparam os mapas convencionais esse princípio não se aplica, assim os valores de EU e UP são substituídos pelos termos de exatidão do ponto de vista de um mapa em relação ao outro, partindo da ideia de que não há nenhuma classe de um mapa mais certa do que a do outro, mas sim o quanto cada classe de um mapa se assemelha a do outro. A terminologia apresentada nessa comparação extingue a verdade, focando-se apenas na similaridade entre classes e tentando buscar justificativas para as diferenças.

A matriz de erro da comparação 1 (Tabela 5.3) apresenta valores de exatidão das classes do mapeamento 1 em relação às mesmas classes do mapeamento 2 (ExClssMp1-2) e do mapeamento 2 em relação ao 1 (ExClssMp2-1). O menor valor da matriz foi dos Latossolos da ExClssMp1-2, apenas 37%, no entanto, essa classe na ExClssMp2-1 apresentou 79%. Esse

resultado é devido ao mapeamento convencional 1 identificar área superior de Latossolos (48% da bacia) em relação ao mapeamento 2 (22% da bacia), onde no primeiro mapa esse solo abrange, de modo geral, os topos e terços inferiores das vertentes, além de posições intermediárias do relevo com menor declividade (Figura 5.14-A), enquanto que no segundo mapa esses solos estão mais restritos à posições de terços inferiores das vertentes (Figura 5.14-B). Por consequência, a área de Cambissolos e dos Organossolos+Gleissolos são superiores no mapa 2, representando respectivamente 44% e 34% da bacia, enquanto no mapa 1 corresponde a 31% e 21% da área. Assim essas duas últimas classes de solos resultaram na matriz de erros em baixos valores de ExClssMp2-1 com 54% na unidade O+G e 61% na C.

TABELA 5.3 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 1

Mapeamento convencional 01	Classe de solos	Mapeamento convencional 02				
		O+G	L	C	$\Sigma$	ExClssMp1-2
	O+G	<b>32529</b>	3059	1669	37257	87%
	L	25871	<b>31941</b>	28843	86655	37%
	C	1983	5285	<b>47586</b>	54854	87%
	$\Sigma$	60383	40285	78098		
	<b>ExClssMp2-1</b>	54%	79%	61%		<b>EG=0,63</b>

Legenda: ExClssMp1-2 - exatidão das classes do mapeamento 1 em relação a mesma classe do mapeamento 2; ExClssMp2-1 - exatidão das classes do mapeamento 2 em relação a mesma classe do mapeamento 1; EG - exatidão global da comparação 1;  $\Sigma$  - somatório dos pixels de cada classe

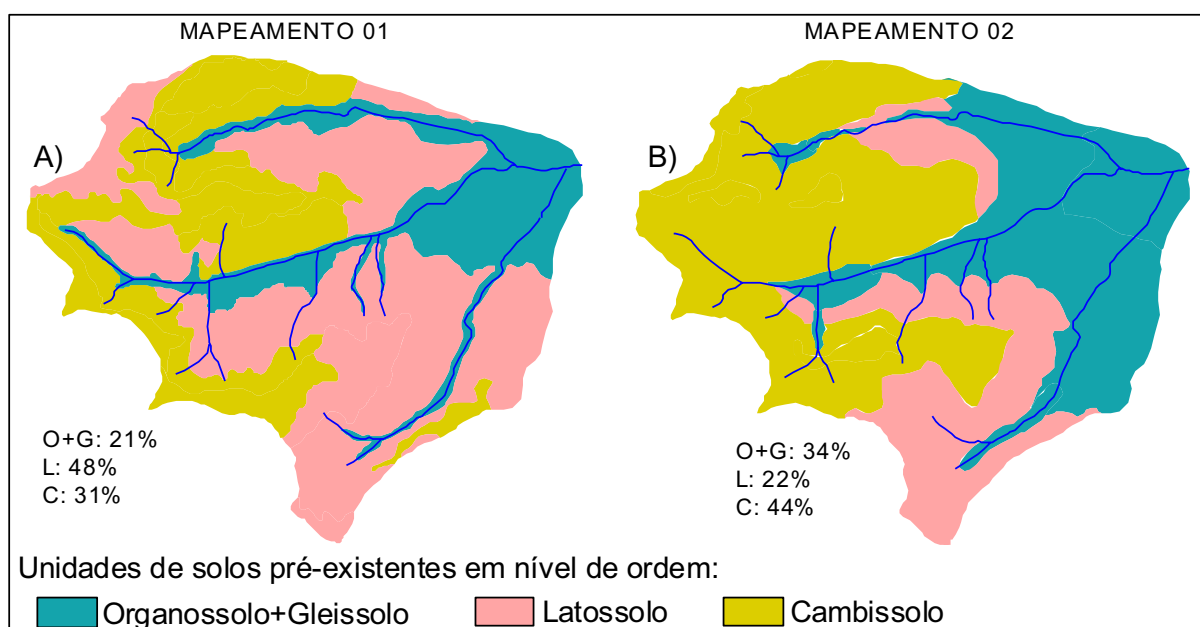


FIGURA 5.14 - MAPEAMENTOS DE SOLOS PRÉ-EXISTENTES EM NÍVEL DE ORDEM

A partir da sobreposição entre os dois mapas, verificou-se que a divergência encontrada na região 14 (Figura 5.15) refere-se à discordância de Latossolos situados em posição de topo no mapeamento 01 em relação ao mapeamento 02, onde foram classificados como Cambissolos. Para o autor do mapa 2 os divisores de água na bacia são relativamente estreitos, por isso não há, em geral, condições para formação de solos mais evoluídos, como os Latossolos, embora apresentem características semelhantes (LIMA, 2005). Assim Latossolos posicionados nos divisores de água do mapa 1 (Figura 5.14-A) não estão presentes no mapa 2 (Figura 5.14-B).

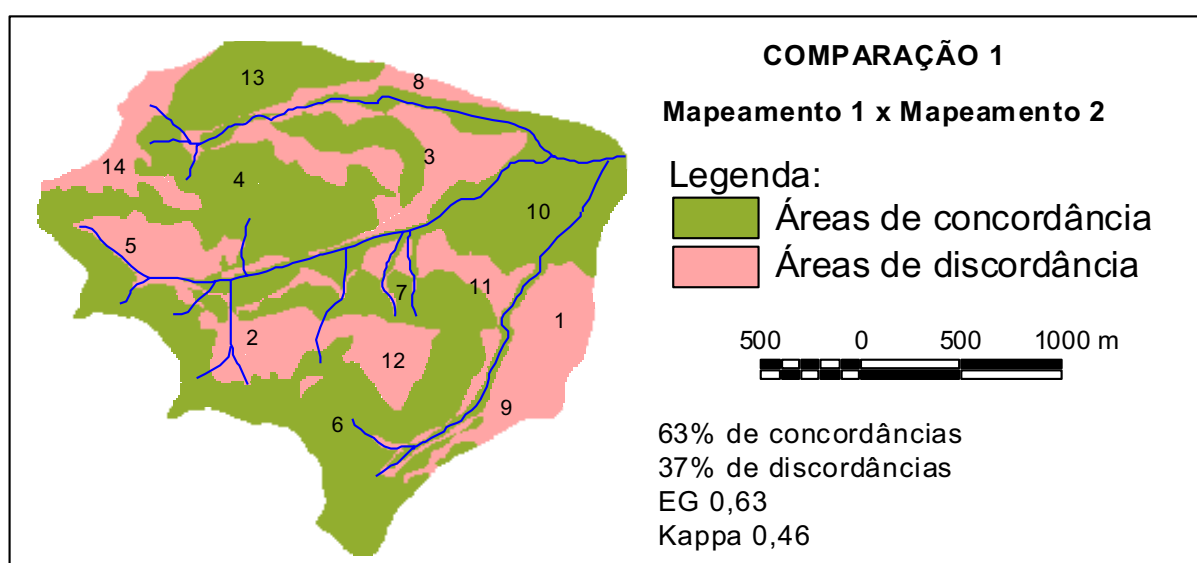


FIGURA 5.15 - ANÁLISE DE CONCORDÂNCIA DOS MAPEAMENTOS PRÉ-EXISTENTES

As discordâncias verificadas nas regiões 1, 3, 8, 9 e 11 são resultantes da interpretação discordante dos Latossolos no mapa 1 por Organossolo+Gleissolo no mapa 2, enquanto nas regiões 2 e 5 também classificadas como Latossolo no mapa 1 referem-se à Cambissolos no mapa 2 (Figura 5.15). Os conflitos evidenciados nessas regiões podem estar associados à diferença na escala entre os dois, pois o mapa 1 está na escala 1:10.000 e o mapa 2 na 1:35:000.

### 5.3.2. Comparação entre o mapa preliminar de solos obtido por tabulação cruzada com os mapas pré-existentes 01 e 02

As unidades do mapeamento preliminar de solos obtidas por tabulação cruzada foram comparadas com às dos mapas pré-existentes na área de estudo, a fim de avaliar a qualidade da classificação. Para tanto, procedeu-se a distinção de dois conjuntos comparativos: a

comparação 2 e a 3. Na primeira o mapa preliminar foi sobreposto e analisado com o mapeamento 01 e na segunda com o mapeamento 02.

Os resultados obtidos mostram que na avaliação geral entre as imagens (Tabela 5.4), a comparação 3 apresentou melhor Exatidão Global (0,69), cujo coeficiente Kappa é igual a 0,47, o que demonstra que o mapa obtido por tabulação cruzada alcançou uma boa qualidade comparado ao mapeamento 02, conforme as classes Kappa de Landis e Koch (1977). A sobreposição entre esses dois mapas apresentou 69% de concordância (Figura 5.16-B). Na comparação 2 se observou também bons resultados, com de EG 0,64 e coeficiente Kappa de 0,44, que expressa boa qualidade de classificação. Os valores de concordância entre as unidades preliminares e o mapeamento 01 são de 64% (Figura 5.16-A). Dentre os parâmetros avaliados, a comparação 3 mostrou os melhores resultados, superior inclusive aos obtidos na comparação entre os mapas pré-existentes.

TABELA 5.4 - AVALIAÇÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLO OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA COM OS MAPEAMENTOS 01 E 02

	COMPARAÇÃO 2 Preliminar T.C. x Mapeamento 01	COMPARAÇÃO 3 Preliminar T.C. x Mapeamento 02
<b>Concordância</b>	64%	69%
<b>Discordância</b>	33%	31%
<b>Coeficiente Kappa</b>	0,44	0,47
<b>Exatidão Global</b>	0,64	0,69

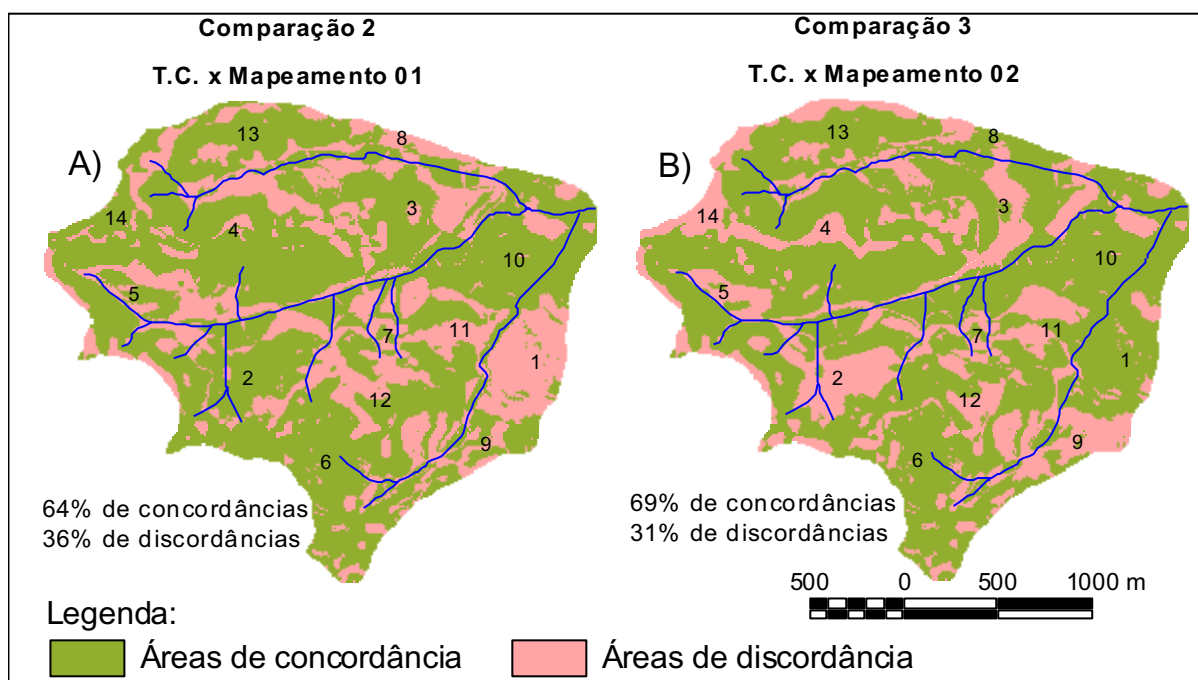


FIGURA 5.16 - COMPARAÇÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA COM OS MAPEAMENTOS 01 E 02

A análise mais detalhada sobre as comparações 2 e 3 possibilitou distinguir quais unidades preliminares foram melhor e pior classificada pelo método de tabulação cruzada, em relação aos mapas pré-existentes. A partir das matrizes de erro foram obtidos os valores em percentuais de acurácia do ponto de vista do usuário (EU) e do produtor (EP) entre as classes, onde o mapa preliminar de solos é o produtor e o mapa pré-existente é o usuário.

A matriz de erro da comparação 2 (Tabela 5.5) demonstra que a menor exatidão da EP foi na unidade Organossolo+Gleissolo (56%) e a EU nos Latossolos (55%). De modo geral, o erro de exatidão entre as classes está bem distribuído, demonstrando não haver concentração de problemas de interpretação, mas sim de determinação de limites precisos entre as classes. Ou seja, as áreas de discordância mostradas na Figura 5.16-A, são constituídas, em sua maioria, por fragmentos, que expressam problemas de imprecisão na delimitação entre as unidades, tanto por inclusão como de omissão, pois em todos os mapas apresentados os limites são arbitrários, o que nem sempre os torna conclusivos. Exceção ocorre sobre as regiões 1 e 8, onde consta a classe dos Latossolos no mapa convencional e no preliminar a unidade O+G. Essa divergência de interpretação explica os baixos valores de EP e EU nessas duas classes.

TABELA 5.5 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 2

Mapeamento preliminar de solos obtido por Tabulação Cruzada	Classe de solos	Mapeamento convencional 1				
		O+G	L	C	$\Sigma$	EP
O+G		<b>26624</b>	20021	934	47579	56%
L		8632	<b>48062</b>	14716	71410	67%
C		2017	18671	<b>39411</b>	60099	66%
$\Sigma$		37273	86754	55061		
EU		71%	55%	72%		<b>EG=0,64</b>

Legenda: EP - exatidão do ponto de vista do produtor; EU - exatidão do ponto de vista do usuário; EG - exatidão global;  $\Sigma$  - somatório dos pixels de cada classe

A comparação 3 apresentou a melhor qualidade de imagem em relação às comparações anteriores. Na matriz de erro (Tabela 5.6) foram evidenciados valores satisfatórios da EP e EU, exceto na classe de Latossolo, que apresentou 40% de exatidão do ponto de vista do produtor. Isso se deve pelos Latossolos posicionados em posições de terço médio e inferior das vertentes, presentes nas regiões 2, 5 e 8 (Figura 5.16-C), apresentarem discordâncias com as unidades do mapeamento 02, onde os Latossolos encontram-se mais restritos aos terços inferiores em vizinhança aos solos de caráter hidromórfico. Corroboram também às discordâncias nas regiões 4 e 14, que se referem à Latossolos em posições de topo, os quais

não são assim interpretados no mapa pré-existente 2, uma vez que o autor do mapa não concorda com a ocorrência desses solos em posições de topo na bacia (LIMA, 2005), fato contrário ao que foi verificado no mapeamento 01. Além dessas inconformidades observadas, notou-se que nas regiões 3, 9 e 11 a unidade Organossolo+Gleissolo foi superestima na predição por tabulação cruzada, resultando em discordância. Contribui com as divergências a acuracidade na determinação das classes do mapa convencional 2, associada a escala 1:35.000, que denotam menor nível de detalhe no mapeamento.

TABELA 5.6 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 3

Mapeamento preliminar de solos obtido por Tabulação Cruzada	Classe de solos	Mapeamento convencional 2				
		O+G	L	C	$\Sigma$	EP
	O+G	<b>41727</b>	5097	743	47567	88%
	L	17494	<b>28600</b>	25116	71210	40%
	C	1162	6589	<b>52240</b>	59991	87%
	$\Sigma$	60383	40286	78099		
	EU	69%	71%	67%		<b>EG=0,69</b>

Legenda: EP - exatidão do ponto de vista do produtor; EU - exatidão do ponto de vista do usuário; EG - exatidão global;  $\Sigma$  - somatório dos pixels de cada classe

Outro aspecto a ser destacado nas comparações 2 e 3 é que pequenas áreas com divergências, que constituem problemas de limites, podem estar associadas tanto às imprecisões que ocorrem ao traçar limites arbitrários para solos, uma vez que essas divisões não existem de forma abrupta na natureza, como também, ao erro acumulado dos mapas convencionais, devido às distorções nos processos de mapeamento em papel e sua conversão para meio digital nas etapas de digitalização, georreferenciamento e correção geométrica.

Ao analisar os erros de inclusão e omissão das classes mapeadas por tabulação cruzada em relação aos mapas 1 e 2 (Tabela 5.7), verificou-se que as unidades preliminares de Cambissolos apresentam erro de inclusão (E.In.) médio de 0,24 e erro de omissão médio (E.Om.) de 0,31. O menor E.In. de Cambissolo obtido foi no mapeamento 02 (0,13) e o menor E. Om. no mapeamento 01 (0,28). Esses valores estão associados à eficiente definição dos limites de Cambissolo obtidos pelas unidades preliminares. A Figura 5.17 revela essa constatação em análise visual, onde os Cambissolos demonstram similaridade com a distribuição das unidades nos mapas convencionais, principalmente com o mapa 1, cujos contornos revelam a mesma tendência de distribuição, as diferenças existentes podem ser atribuídas à imprecisões no traçado dos polígonos. O mapeamento 2 também mostra contornos condizentes à classe predita, exceto nas posições de topos e divisores.

TABELA 5.7 – ERROS DE INCLUSÃO E OMISSÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA E AS CLASSES DOS MAPEAMENTO 1 E 2

Mapeamento preliminar de solos obtido por Tabulação Cruzada	Unidades	Mapeamento 01		Mapeamento 02		Média	
		E. In.	E. Om.	E. In.	E. Om.	E. In.	E. Om.
	C	0,34	0,28	0,13	0,33	0,24	0,31
L	0,33	0,45	0,60	0,29	0,47	0,37	
O+G	0,44	0,29	0,12	0,31	0,28	0,30	

Legenda: E.In. – erro de inclusão; E.Om. – erro de omissão.

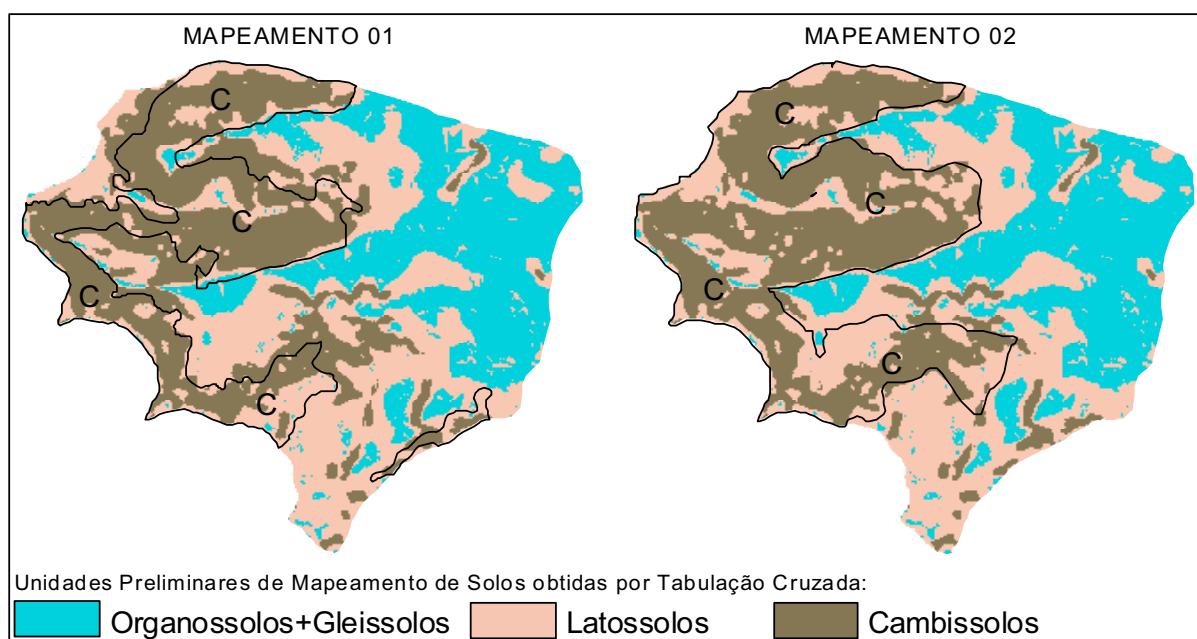


FIGURA 5.17 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES DE CAMBISSOLOS DOS MAPAS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA

Na classe de Latossolo os valores médios de E.In. e E.Om. obtidos na comparação com os mapas de solos pré-existent são de 0,47 e 0,37, respectivamente (Tabela 5.7). Esses valores são superiores aos verificados no Cambissolo, principalmente quanto ao erro de inclusão apresentado em relação aos mapeamentos (Figura 5.18). No mapa 2 os contornos entre Latossolos se assemelham nas posições de terço inferior das vertentes, porém, nas posições de topos e interflúvios são discordantes; além de apresentar diferenças entre os limites da unidade devido à escala ser menor. No mapeamento 1 a divergência principal está na área classificada erroneamente como Organossolo+Gleissolo, que na verdade deve ser caracterizada como Latossolo. As demais áreas mostram-se mais similaridades no traçado dessa classe em relação aos demais mapas, cujas divergências estão associadas à determinação de limites abruptos.

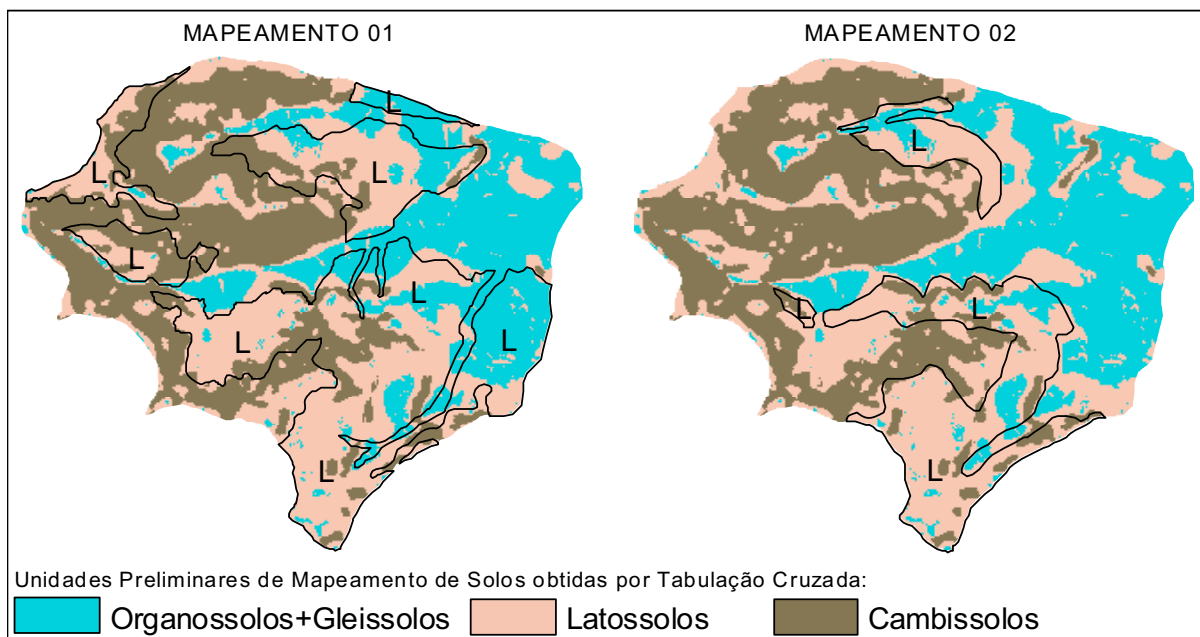


FIGURA 5.18 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES DE LATOSSOLOS DOS MAPAS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA

Em análise visual verifica-se que a sobreposição entre os limites de Organossolo+Gleissolo sobre o mapa determinado por tabulação cruzada mostram limites aproximados (Figura 5.19). No entanto, a classe preliminar O+G mostrou ter sido superestimada em relação ao mapeamento 01 e subestimada em relação ao mapeamento 02. Com o apoio de amostras de campos observou-se que os solos de caráter hidromórfico foram erroneamente mapeados nas áreas em que diverge do mapa 1, que resulta no elevado valor de E.In. de 0,44 (Tabela 5.7).

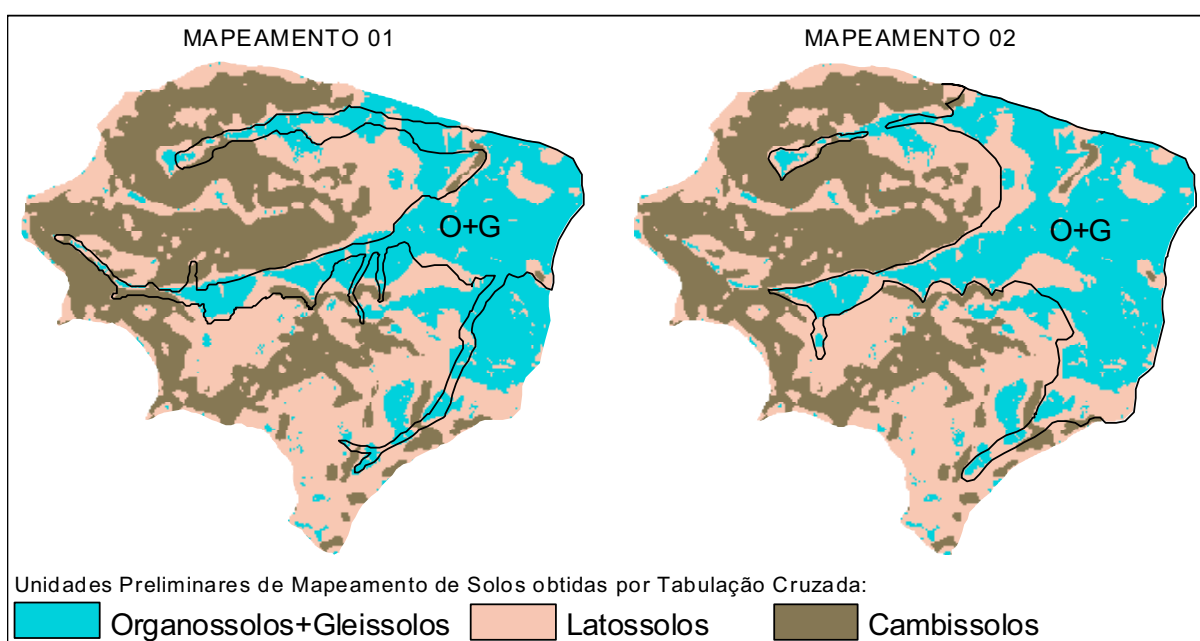


FIGURA 5.19 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES O+G DOS MAPAS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA

### 5.3.3. Comparação entre o mapa preliminar de solos classificado por RNA com os mapas convencionais 01 e 02

A predição de unidades de solos classificadas pelas Redes Neurais Artificiais apresentou três classes distintas que foram comparadas aos dois mapas pré-existentes na bacia. Resultou na comparação 4, pela sobreposição do mapa preliminar de solos por RNA com o mapa convencional 01 e na comparação 5 com o mapeamento 02.

Os resultados da avaliação da qualidade do mapa classificado pela RNA com os mapas pré-existentes demonstraram melhor similaridade na comparação 4, onde houve 72% de concordância, enquanto que a comparação 5 apresentou 65% de concordância (Tabela 5.8). Os valores de coeficiente Kappa obtidos nas comparações resultaram em boa qualidade das unidades mapeadas em relação aos dois mapas convencionais, segundo classes de Landis e Koch (1977), cujos valores são 0,56 com o mapa 1 e 0,48 com o mapa 2.

TABELA 5.8 - AVALIAÇÃO ENTRE O AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLO CLASSIFICADAS POR RNA COM OS MAPEAMENTOS 01 E 02

	<b>COMPARAÇÃO 4</b> Preliminar RNA x Mapeamento 01	<b>COMPARAÇÃO 5</b> Preliminar RNA x Mapeamento 03
<b>Concordância</b>	72%	65%
<b>Discordância</b>	28%	35%
<b>Coeficiente Kappa</b>	0,56	0,48
<b>Exatidão Global</b>	0,72	0,65

Na análise da matriz de erro (Tabela 5.9) as unidades classificadas pela RNA apresentaram valores constantes e elevados, em relação à exatidão do ponto de vista do produtor (EP) e do usuário (EU). Não houve concentração de erros em nenhuma classe específica, o que expressa que as unidades de solos classificadas pela RNA não se mostraram contrárias às do mapeamento 01, exceto a divergência nos limites, que está associado à própria cartografia tradicional pedológica, onde as unidades espaciais são determinadas por um modelo discreto da variabilidade espacial. Nesse modelo é assumido que os tipos de solos mudam abruptamente, o que de fato não ocorre, pois sua variação é gradual. A subjetividade no traçado dos limites dos solos é, portanto, o que diferencia as unidades do mapeamento 01 das classificadas pela RNA. Os resultados de inconformidades verificados foram pequenos polígonos que representam áreas com divergência de interpretação, distribuídos em toda a extensão do mapa (Figura 5.20-A).

TABELA 5.9 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 4

Mapeamento preliminar de solos obtido por RNA	Classe de solos	Mapeamento convencional 1				
		O+G	L	C	$\Sigma$	EP
	O+G	30243	6412	2958	39613	76%
	L	3858	60649	14194	78701	77%
	C	3172	19693	37909	60774	62%
	$\Sigma$	37273	86754	55061		
	EU	81%	70%	69%		EG=0,72

Legenda: EP - exatidão do ponto de vista do produtor; EU - exatidão do ponto de vista do usuário; EG - exatidão global;  $\Sigma$  - somatório dos pixels de cada classe

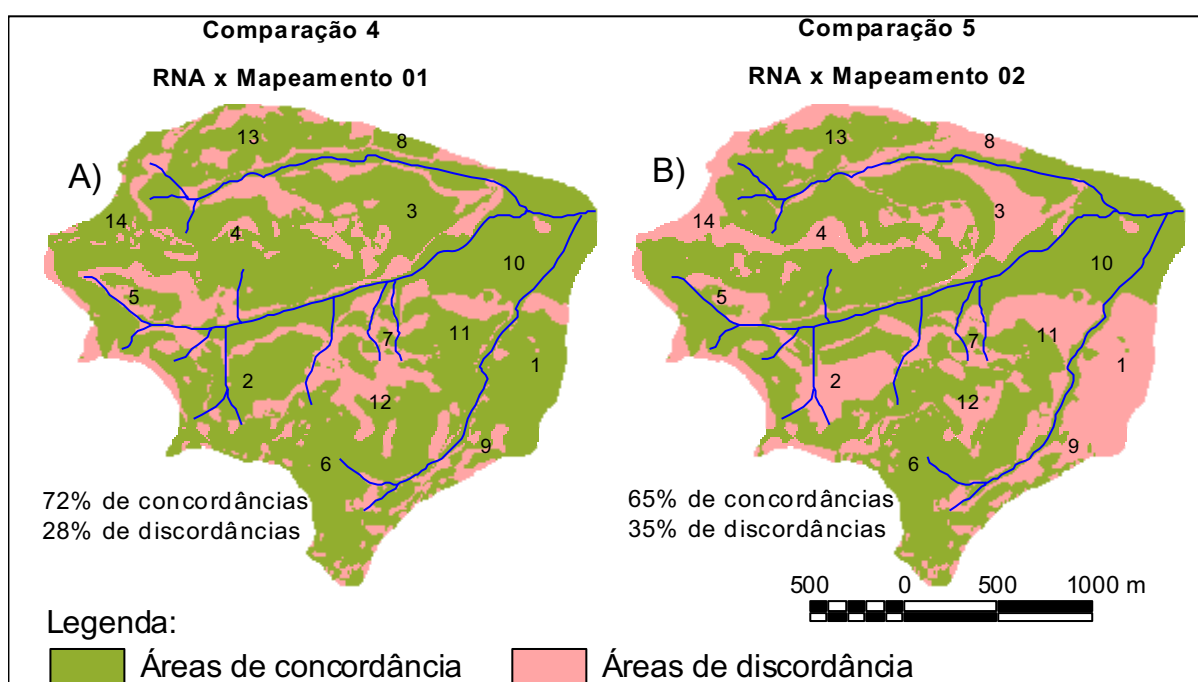


FIGURA 5.20 - COMPARAÇÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA COM OS MAPEAMENTOS 01 E 02

A matriz de erro da comparação 5 (Tabela 5.10) evidenciou que as divergências concentram-se, principalmente, nas classes de Latossolo com baixa EP (39%) e Organossolo+Gleissolo com baixa EU (57%). A baixa exatidão do Latossolo foi associada às discordâncias mostradas nas regiões 1, 3, 8, 9 e 11 (Figura 5.20-B), onde houve interpretação conflitante, pois no mapa 2 essas áreas são Organossolos+Gleissolos e no mapa classificado pela rede são Latossolos. Essas divergências podem estar associadas à generalização de escala apresentada no mapeamento 02, onde os limites de solos hidromórficos foram superestimados, resultando no baixo EU dessa classe.

Outras inconformidades entre os mapas se referem às áreas não mapeadas como Latossolos em posições de topos (regiões 4 e 14), cujas áreas são interpretadas como

Cambissolos por Lima (2005) no mapeamento 02, devido a elevada atividade da argila encontrada em amostras analisadas, embora esse autor concorde que as características se assemelham à Latossolos. As demais discordâncias verificadas estão associadas à acuracidade no traçado dos limites das classes entre os mapas comparados.

TABELA 5.10 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 5

Mapeamento preliminar de solos obtido por RNA	Classe de solos	Mapeamento convencional 2				
		O+G	L	C	$\Sigma$	EP
	O+G	<b>34567</b>	2774	2208	39549	87%
	L	22910	<b>30364</b>	25286	78560	39%
	C	2906	7148	<b>50605</b>	60659	83%
	$\Sigma$	60383	40286	78099		
	EU	57%	75%	65%		<b>EG=0,64</b>

Legenda: EP - exatidão do ponto de vista do produtor; EU - exatidão do ponto de vista do usuário; EG - exatidão global;  $\Sigma$  - somatório dos pixels de cada classe

O mapa de solos classificado pela RNA mostrou-se adequado pela comparação com os mapas convencionais, com as ressalvas justificadas, principalmente de interpretação e determinação de limites entre as unidades.

A classe de Cambissolo resultou no erro de inclusão médio de 0,35 e de omissão de 0,26 (Tabela 5.11). A sobreposição da classe de Cambissolo na comparação 5 evidenciou que o mapa 1 possui maior semelhança e tem limites mais aproximados com os classificados na RNA (Figura 5.21). As principais discordâncias estão associadas à subjetividade na delimitação das classes e na escala de detalhe dos mapas convencionais. As unidades determinadas pela RNA estão de acordo com as amostras de treinamento e verificação da camada de entrada, onde o ajuste dos pesos foi realizado por aprendizagem de um novo conjunto de amostras.

TABELA 5.11 – ERROS DE INCLUSÃO E OMISSÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA E AS CLASSES DOS MAPAS PRÉ-EXISTENTES

Mapeamento preliminar de solos classificado por RNA	Unidades	Mapeamento 01		Mapeamento 02		Média	
		E. In.	E. Om.	E. In.	E. Om.	E. In.	E. Om.
	C	0,38	0,31	0,17	0,35	0,35	0,26
	L	0,23	0,30	0,61	0,25	0,27	0,43
	O+G	0,24	0,19	0,13	0,43	0,22	0,28

Legenda: E.In. – erro de inclusão; E.Om. – erro de omissão.

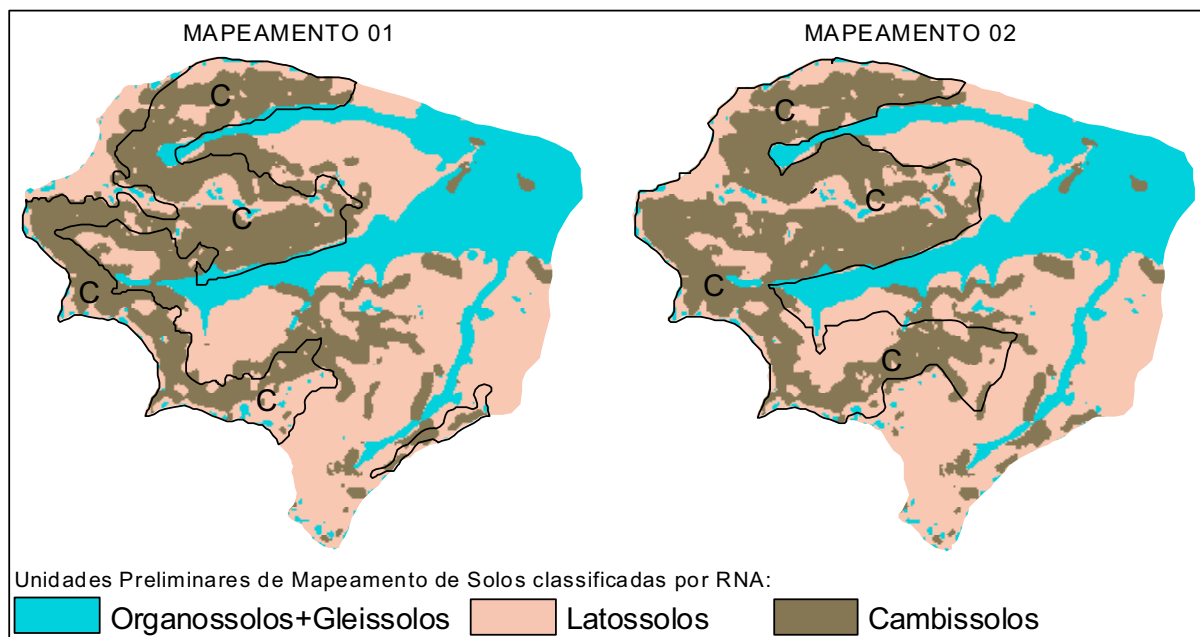


FIGURA 5.21 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES DE CAMBISSOLOS DOS MAPEAMENTOS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA

A unidade preliminar de Latossolo apresentou valor médio de E.Om em relação aos mapas pré-existentes de 0,43 e a média de E.In. de 0,27 (Tabela 5.11). No mapeamento 02 os limites dessa unidade foram subestimados em detrimento dos solos de caráter hidromórficos e não são mapeados nos topos das vertentes. Portanto, a análise visual sobre a Figura 5.22 demonstra maior semelhança da unidade preliminar com o mapeamento 01.

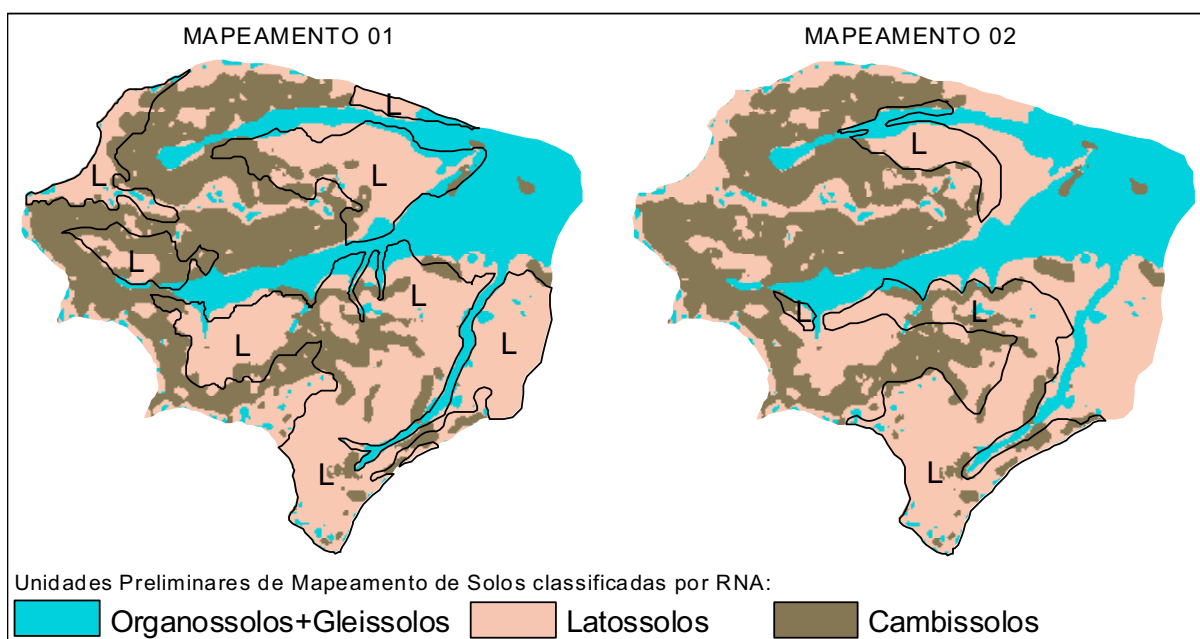


FIGURA 5.22 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES DE LATOSSOLOS DOS MAPEAMENTOS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA

Os menores erros médios de omissão e inclusão foram 0,28 e 0,22, respectivamente (Tabela 5.11). O mapa 2 apresentou o pior resultado de E.Om. (0,43), fato decorrente da generalização na delimitação da classe O+G em relação ao mapa 1, devido a diferença de escala. O mapeamento 01 demonstrou contornos muito semelhantes aos da classificação realizada pela RNA (Figura 5.23).

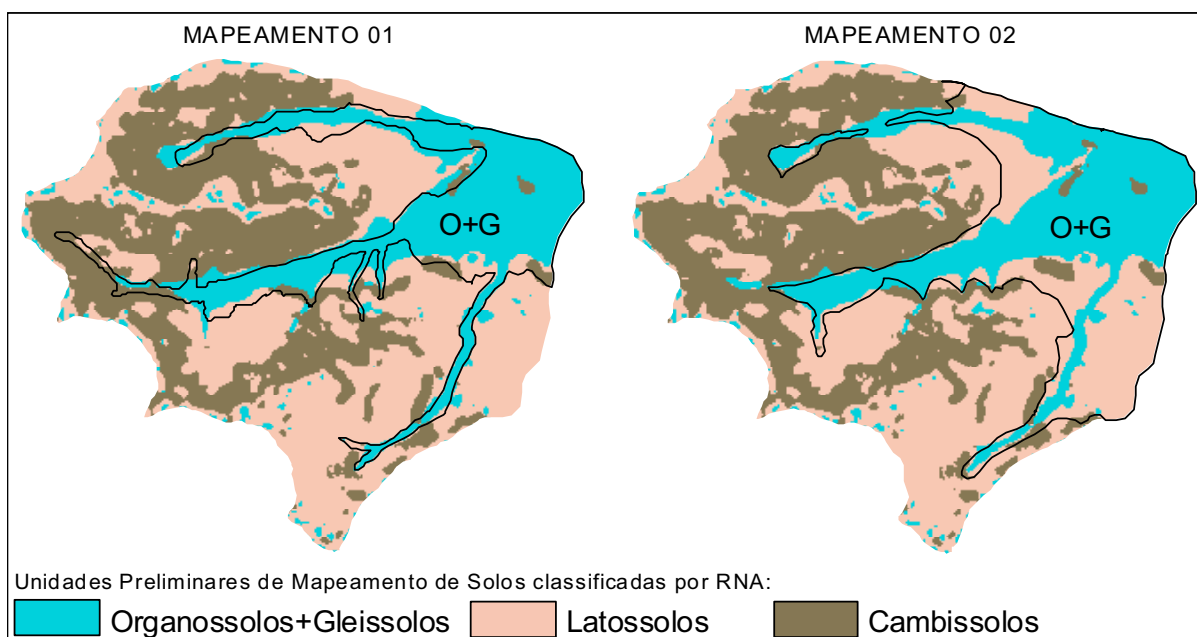


FIGURA 5.23 – SOBREPOSIÇÃO DAS CLASSES DE O+G DOS MAPEAMENTOS 01 E 02 COM AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA

Assim, as classes obtidas pela rede se mostraram satisfatórias em relação ao controle e conferência de campo, avaliação de coerência com amostras levantadas e em comparação com as classes dos mapas convencionais pré-existentis.

Os Latossolos classificados em posições de topos e interflúvios foram identificados porque as amostras de treinamento continham essas informações, que levou a RNA ao aprendizado de associar essas características de relevo e interpretá-los como Latossolos. Desse modo, embora tenha apresentado discordância com o mapeamento 02 essa classificação concorda com 01. As demais áreas de Latossolo mapeadas pela rede concordam de forma aproximada com o mapa 1 e em contornos mais gerais com o mapa 2.

O limite da unidade de Organossolo+Gleissolo obtido pela RNA mostrou-se mais coerente com os apresentados no mapeamento 01, uma vez que no mapa 2 eles foram superestimados, possivelmente, devido à escala desse último apresentar menor detalhamento.

Portanto, constata-se que o mapa preliminar de solo classificado pela RNA aplicada apresentou maior semelhança com o mapeamento convencional 01.

### 5.3.4. Comparação entre as unidades de solos classificadas por RNA e tabulação cruzada

Os mapas de solo definidos com base na análise digital do relevo apresentaram boa similaridade entre si, com concordância em 77% das áreas e coeficiente Kappa de 0,65, que de acordo com a classificação qualitativa de Landis e Koch (1977), resultaram em qualidade muito boa, na comparação entre eles.

Na matriz de erros da análise entre as classes determinadas por tabulação cruzada e Redes Neurais Artificiais (Tabela 5.12), designada de comparação 6, apresenta o menor valor de exatidão na unidade Organossolo+Gleissolo, cuja ExTC-RNA é de 62%.

TABELA 5.12 – MATRIZ DE ERRO DA COMPARAÇÃO 6

Mapeamento preliminar de solos classificados por RNA	Classe de solos	Mapeamento preliminar de solos obtido por Tabulação Cruzada				
		O+G	L	C	Σ	ExRNA-TC
	O+G	<b>29545</b>	9286	783	39614	75%
	L	17888	<b>55288</b>	5525	78701	70%
	C	146	6837	<b>53792</b>	60775	89%
	Σ	47579	71411	60100		
	ExTC-RNA	62%	77%	90%		<b>EG=0,77</b>

Legenda: ExRNA-TC - exatidão das unidades de solos classificadas por RNA em relação às obtidas por Tabulação Cruzada; ExTC-RNA - exatidão das unidades de solos obtidas por Tabulação Cruzada em relação às classificadas por RNA; EG - exatidão global; Σ - somatório dos pixels de cada classe.

Esse resultado é decorrente das imprecisões na delimitação das unidades dos solos de caráter hidromórfico no mapa obtido por tabulação cruzada, os quais são apontados pelas setas na Figura 5.24-A. O mapa classificado por RNA obteve melhor acuracidade na determinação desses limites.

A classificação da RNA demonstrou erros nas posições de topos, onde foram mapeados pequenos polígonos da classe O+G; essa limitação está relacionada à semelhança com os parâmetros das variáveis associadas aos Latossolos que ocupam posições elevadas na bacia e pela dificuldade de representação do MDT nas áreas de topo, fato devido à escala de referência (setas indicativas na Figura 5.24-B). Outro problema verificado foi a criação de pequenos polígonos da classe de Cambissolo nas áreas de solos de caráter hidromórfico, que se deve também a limitação em representar as áreas de planícies no MDT gerado das cartas topográficas na escala 1:10.000, onde a equidistância vertical entre as curvas de nível é de cinco metros, o que não possibilita a representação de pequenos nuances do relevo. A qualidade e a resolução dos MDT's são destacadas por Wood (1996) como uma das principais limitações nas representações paramétricas do relevo (geomorfometria). Para Hengl (2003) a

qualidade dos MDT's e os produtos derivados afetam diretamente na qualidade das aplicações de análise do terreno.

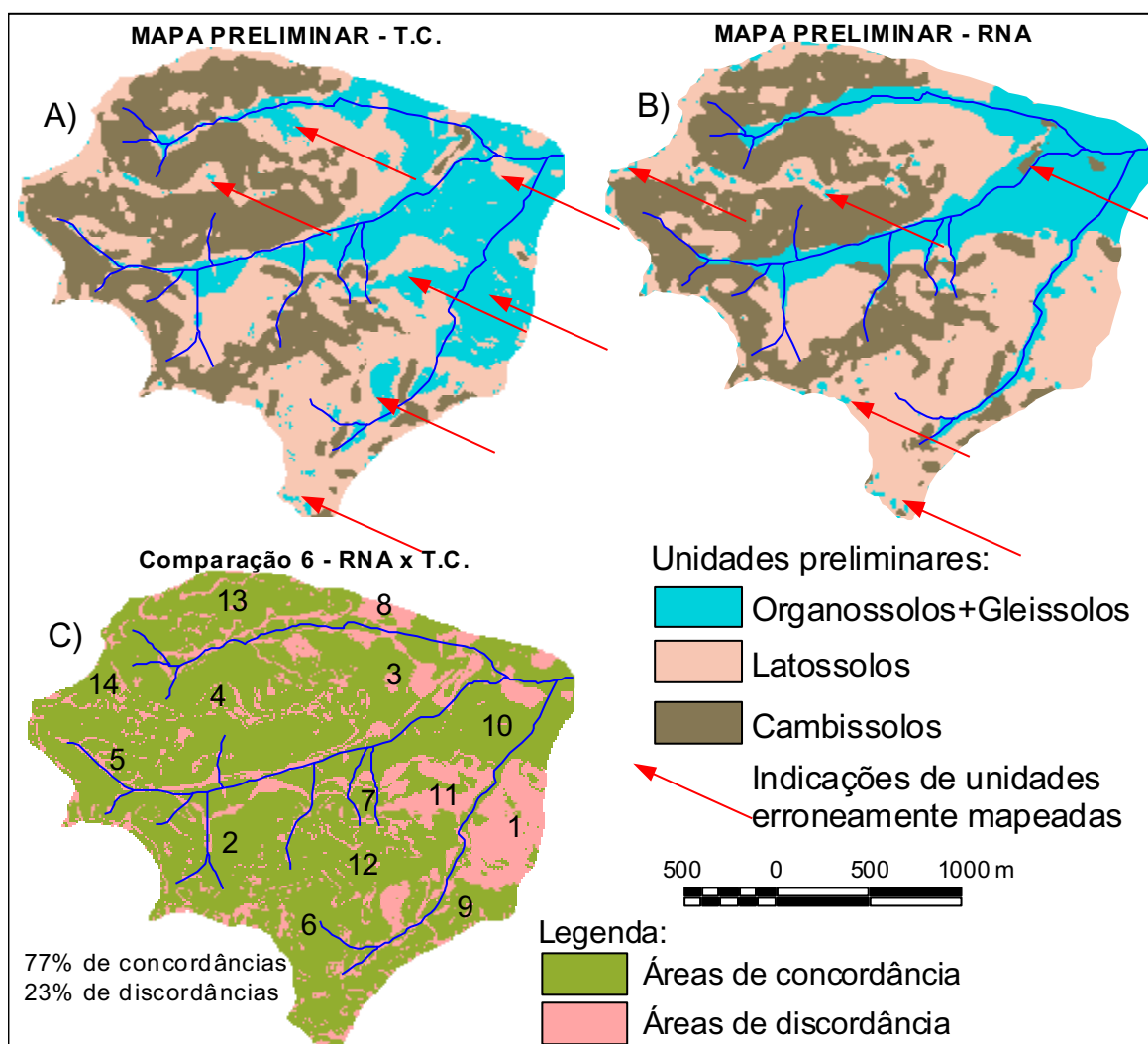


FIGURA 5.24 - COMPARAÇÃO ENTRE AS UNIDADES PRELIMINARES DE SOLOS CLASSIFICADAS POR RNA COM AS OBTIDAS POR TABULAÇÃO CRUZADA

As principais discordâncias verificadas entre os dois mapas ocorrem sobre as áreas enumeradas como regiões 1, 8 e 11 (Figura 5.24-C), nelas as unidades de Organossolo+Gleissolo foram erroneamente delimitadas no método de tabulação cruzada. As demais áreas discordantes constituem pequenos polígonos dispersos na área de estudo, que representam diferenças nos limites determinados entre as unidades de mapeamento ao empregar os dois diferentes métodos para integrar as variáveis.

A qualidade na comparação entre os mapas e a exatidão obtida nas seis comparações é apresentada de forma comparativa em gráfico na Figura 5.25. Observa-se que os dois mapas preliminares, na comparação 6, foram os que mais se assemelharam, fato plausível, uma vez

que ambos foram classificados com base em mapeamento digital do relevo, considerando alguns dos mesmos atributos topográficos derivados do mesmo MDT.

Na avaliação entre os mapas preliminares, obtidos por tabulação cruzada e RNA, com os convencionais, a comparação que resultou em melhores valores dos parâmetros de qualidade de imagem foi a classificação por RNA com o mapa 1 (comparação 4). Em seguida foi a comparação 3 que avaliou a classificação por tabulação cruzada com o mapa 2. O valor de similaridade nesses dois conjuntos se mostrou superior aos apresentados na comparação 1, que se refere à sobreposição entre si dos dois mapas convencionais, cujas classes estão representadas em nível de ordem.

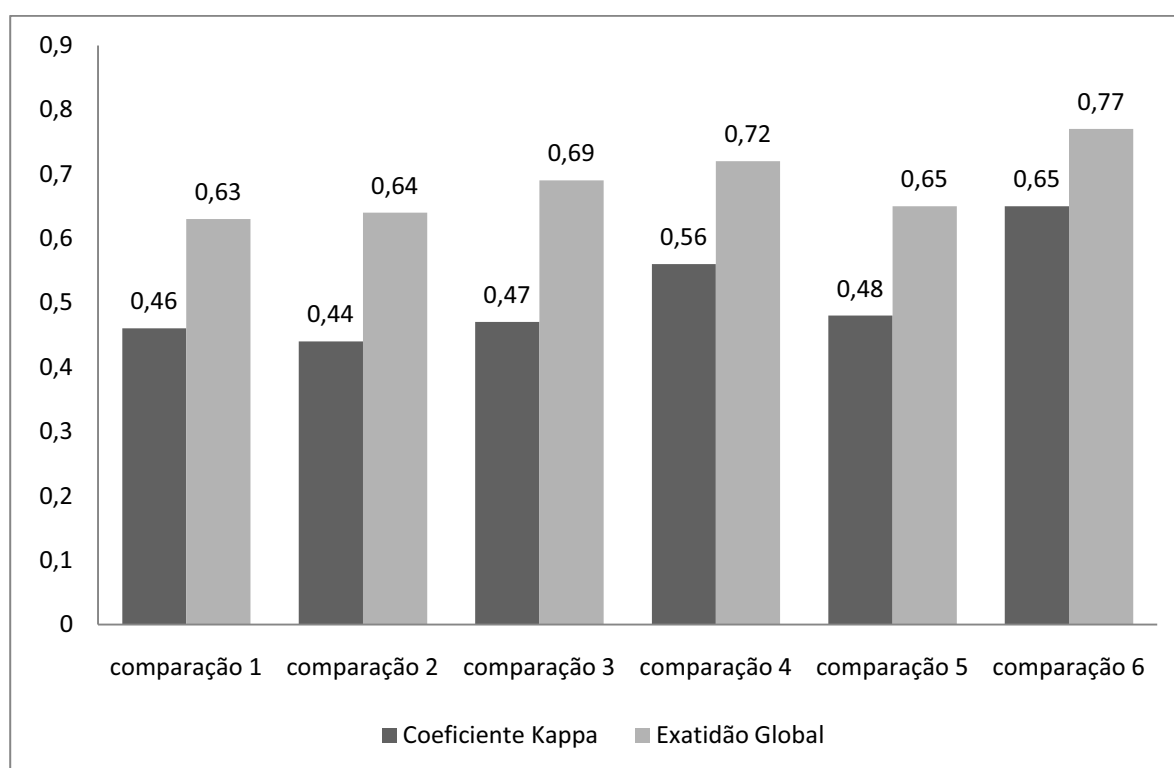


FIGURA 5.25 – QUALIDADE E EXATIDÃO ENTRE OS MAPAS PRELIMINARES E PRÉ-EXISTENTES

Portanto, os métodos aplicados mostram-se satisfatórios para auxiliar no mapeamento de solo. Crivelenti (2009) corrobora com a constatação afirmada. Para esse autor os mapas digitais de solos elaborados a partir de variáveis do relevo e geologia, quando tratados em SIG [tabulação cruzada] e por técnicas de aprendizado de máquina [RNA] apresentam elevada acurácia comparados aos trabalhos elaborados por métodos tradicionais, que representam boas aproximações.

Além disso, oferece ainda como benefício as informações resultantes dispostas em ambiente digital, georreferenciadas, compatíveis para integração em ambiente SIG.

## 6. CONCLUSÕES

A parametrização da geomorfologia, por meio da análise digital do relevo, demonstrou potencial para compreender as relações relevo-solo, previsão da distribuição dos solos na paisagem e mapeamento preliminar de unidades pedológicas em escala local. O uso de ferramentas de SIG e RNA possibilitam integrar variáveis paramétricas da topografia na classificação de unidades de solos.

Os atributos topográficos IU, ICMF, ICTS e declividade demonstraram melhor relação com as classes de solos dos mapeamentos pré-existentes, enquanto que o plano e perfil de curvatura não apresentaram bons resultados, fato associado à escala dos mapeamentos convencionais de solos não contemplar o detalhamento apresentado nos dois índices.

As unidades preliminares de mapeamento de solos obtidas em ambiente SIG, por meio de operações de tabulação cruzada dos atributos IU, ICMF, ICTS e declividade, apresentaram qualidade satisfatória. Os erros de classificação das unidades situaram-se nas posições de topos e divisores de água e em terços inferiores das vertentes, onde foram classificadas unidades como Organossolo+Gleissolo ao invés de Latossolo; nas áreas de planície, onde foram criados polígonos de Latossolo e/ou Cambissolo nas áreas de ocorrência de Organossolo+Gleissolo. A classe Organossolo+Gleissolo foi superestima sobre a classe de Latossolo. As inconsistências na previsão de solos em topos e fundos de vale estão associadas ao nível de generalização cartográfica na escala 1:10.000, a qual não permite a representação altimétrica de valores intermediários a 5 metros da equidistância vertical entre curvas de nível.

As unidades classificadas pela RNA que consideraram oito variáveis, sete atributos topográficos e a geologia, foram as de melhor qualidade. Os erros na determinação das unidades mapeadas estão nas posições de topos e divisores de água, onde foram classificadas na forma de pequenos polígonos da classe de Organossolo+Gleissolo dentro da área de ocorrência de Latossolo; e pequenos polígonos de Cambissolo na área de domínio de Organossolo+Gleissolo. Novamente foram verificados problemas relacionados à generalização cartográfica inerente à escala 1:10.000 principalmente nas posições de topos, no entanto, em fundos de vale o emprego da variável geologia contribuiu para melhor delimitação das unidades.

Na etapa de validação dos mapas classificados, do total de cinquenta e três pontos de controle amostrados em campo, verificou-se que quarenta e uma coincidiram com os limites

determinados no método de tabulação cruzada em SIG, já na RNA quarenta e duas foram correspondentes com as unidades classificadas. A maior parte das incongruências foi observada em amostras de Cambissolos sobre áreas de ocorrência de Latossolos, as quais foram interpretadas como sendo inclusões por generalização cartográfica. Duas amostras discordaram das unidades obtidas no método por tabulação cruzada em áreas de Organossolo+Gleissolo, fato que não ocorreu nas unidades classificadas pela RNA, devido à melhor representação dos limites de solos de caráter hidromórfico.

Nos testes de validação cruzada da RNA verificou-se que as variáveis mais importantes para integridade do conjunto em ordem decrescente foram: geologia, IU, ICMF, plano de curvatura, perfil de curvatura, ICMF, declividade e hipsometria.

Na comparação entre as unidades preliminares classificadas por tabulação cruzada e RNA com as dos mapeamentos pré-existentes, constatou-se que o mapa classificado por tabulação cruzada apresentou maior similaridade com o mapeamento preliminar 02 (comparação 3),  $EG=0,64$ ,  $Kappa=0,44$  e 64% de concordância, e o classificado pela RNA com o mapeamento 01 (comparação 4),  $EG=0,72$ ,  $Kappa=0,56$  e 72% de concordância. A comparação entre os dois mapas convencionais apresentou menor concordância que as comparações 3 e 4. Os mapas preliminares de solos comparados entre si apresentaram a melhor similaridade, com  $EG=0,77$ ,  $Kappa=0,65$  e 77% de concordância.

Os dois métodos apresentaram resultados satisfatórios na escala empregada, demonstrando grande potencialidade para apoiar a cartografia pedológica, pois oferecem unidades preliminares de mapeamento para auxiliar nas atividades de campo e de levantamentos. Esse fato corroborou com a tese de que a análise digital do relevo oferece suporte ao mapeamento de solos. Além das escalas supra mencionadas outras podem ser testadas.

Apesar dos bons resultados oferecidos pelos dois métodos, a classificação por meio das Redes Neurais Artificiais se mostrou mais eficiente na delimitação de unidades preliminares de mapeamento de solos, principalmente em relação à classe de Organossolo+Gleissolo. Suas principais vantagens em relação à tabulação cruzada foram: a) menor subjetividade na determinação dos limites entre as unidades de mapeamento; b) possibilidade de considerar maior número de variáveis na classificação; c) não haver necessidade de mapeamentos pré-existentes de solos na área de estudo, ou em áreas contíguas com mesmas características ambientais, para orientar a compreensão das relações entre solos e relevo; d) não ser necessária discretização dos atributos topográficos em classes para avaliar previamente as

relações com unidades de solos já mapeadas, ou seja, não há necessidade de formulação de nenhuma hipótese prévia; e) a atribuição de pesos é aleatória, realizada com base em amostras de treinamento, reduzindo o erro no processo direto de operação; f) aplicação da arquitetura da rede para determinação de solos em regiões homólogas.

Contudo, as Redes Neurais Artificiais mostraram também algumas desvantagens em relação à tabulação cruzada, que foram: a) maior complexidade de proceder na aplicação do método devido à construção e escolha da melhor arquitetura da RNA; b) processamento mais lento e maior exigência de *hardware*; c) necessidade de um conjunto expressivo de amostras para treinamento e verificação para o aprendizado da rede.

O método de tabulação cruzada empregado em SIG já é amplamente difundido para integração de variáveis nas Ciências da Terra, exemplos são trabalhos de fragilidade e vulnerabilidade ambiental, geotecnia, entre outros; porém a aplicação de RNA nas geociências ainda é incipiente no Brasil, embora, apresentem grande potencialidade, tanto nos exemplos já mencionados, como em mapeamentos geomorfológicos, estudos hidrológicos, entre outros.

A utilização de MDT's derivados de base cartográfica com escala de maior detalhe, ou, o emprego de novas técnicas como o *LaserScan*, podem ser testados, visando melhor representação dos nuances na topografia, com melhor qualidade na análise digital do relevo, que sanariam os problemas encontrados devido a generalização altimétrica, que influenciaram de forma negativa na classificação preditiva de unidades de solos do presente trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

- ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistema de Informações Geográficas**. Embrapa : Brasília, 2 ed. 1998, 434p.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M.J. A Physically-based variable contributing area model of basin hydrology. **Hidrology Science Bulletin**, v. 24, p. 43-69, 1979.
- BIRKELAND, P. W. **Soils and geomorphology**. New York: Oxford University Press, 1984. 430p.
- BISPO, P. C.; VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M. Variáveis geomorfométricas locais e sua relação com a vegetação da região do interflúvio Madeira-Purus (AM-RO). **Acta Amazonica**, v. 39, n. 01, p-81-90, 2009.
- BITTENCOURT, G. **Inteligência Artificial**. Editora da UFSC: Florianópolis, 1998. 400p.
- BOCKHEIM, J. G.; GENNADIEV, A. N.; HAMMER, R. D.; TNADARICH, J. P. Historical development of key concepts in pedology. **Geoderma**. Amsterdam. v. 124, p.23-36, 2005.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems of land resources assesment**. Francis e Taylor, 1986. 185p.
- CÂMARA, G. E.; MEDEIROS, J. S. Mapas e suas representações computacionais. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de Informações Geográficas: aplicações na agricultura**, 2 ed. Brasília : Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, p. 13-29, 1998.
- CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JÚNIOR, J. Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos pedológicos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.06, n.01, p.104-114, 2006.
- CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.519-529, 2007.
- CARVALHO JÚNIOR, W.; FERNANDES FILHO, E.I.; VIEIRA, C.A.O.; CHAGAS, C.S. Geomorphometric attributes used to soil-landscapes supervised classification of mountainous areas. In: 2nd Global Workshop on Digital Soil Mapping. 4-7 July, 2006, Rio de Janeiro: Embrapa Solos. **Anais**. CD-Rom.

CASTRO, S. S.; SALOMÃO, F. X. T. Compartimentação Morfopedológica e sua Aplicação: Considerações Metodológicas. Campinas, SP. **Revista GEOUSP**, São Paulo, n. 7, p. 27-37, 2000.

CÁTEN 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.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná : Curitiba, 2003. 210p.

CHAGAS, C. S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. Viçosa, 2006. 223p. (Doutorado -Universidade Federal de Viçosa – UFV.

COELHO, R. M. LEPSCH, I. F.; MENK, J.R. F. Relações solo-relevo em uma encosta com transição arenito-basalto em Jaú (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p. 125-137, 1994.

COMEC - Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba. Cartas Topográficas, folhas: **SG-22-X-D-I-4-SO-B** e **SG-22-X-D-I-4-SE-A**, escala 1:10.000, 1976.

CRIVELENTI, R. C. **Mineração de dados para inferência da relação solo-paisagem em mapeamento digitais de solo**. Instituto Agronômico. Campinas, 2009. 107f. Dissertação (Mestrado em Concentração em Gestão de Recursos Agroambientais) Instituto Agronômico - Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical)

CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; PEREIRA, T.P.; LEPSCH, I.F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.81-91, 2005.

CURCIO, G. R. **Relações entre geologia, geomorfologia, pedologia e fitossociologia nas planícies fluviais do rio Iguaçu, Paraná, Brasil**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006. 488f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná.

DALRYMPLE, J.B., BLONG, R.J., CONACHER, A.J. A hypothetical nine unit landsurface model. **Geomorphology**, Berlin, v. 12, p. 60-76, 1968.

DANIELS, R. B.; HAMMER, R. D. **Soil geomorphology**. New York: John Wiley, 236 p, 1992.

DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. F.; CADY, J. G. The relations between geomorphology and soil morphology and genesis. **Advances in Agronomy**. Madison, n. 23, p. 51-87, 1971.

DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: RAPER, J. (Ed.). **Three dimensional applications in geographic information systems**. New York: Taylor and Francis, p.51-77, 1989.

DINIZ, A. L.; OLIVEIRA, C.V.; AUGUSTIN, C.H.R.R. Relações solos-superfícies geomórficas na porção norte da bacia do ribeirão Chiqueiro – Gouveia, MG. **Geonomos**, v.13, p. 19-27, 2005.

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.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 412p, 1999.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2 ed. 306p, 2006.

ESRI. *ArcGis, Spatial Analyst, 3D Analyst*. versão 9.3.1. Environmental Systems Research Institute, 2009.

FIDÊNCIO, P. H. **Análise de solos por espectroscopia no infravermelho próximo e aplicação de métodos quimiométricos**. – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001. 138p. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Departamento de Química Analítica – Instituto de Química – Universidade Estadual de Campinas.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem Numérica de Terreno. In. CÂMARA, G; MEDEIROS, J. S. (Org). **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, ed. 2, p. 4-39, 1998. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/4mnt.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/4mnt.pdf).

- GALLANT, J. C. ;WILSON, J. P. Primary topographic attributes. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). **Terrain Analysis: Principles and applications**. New York: John Wiley, p.51-85, 2000.
- GERRARD, J. **Soil geomorphology**. An integrated of pedology and geomorphology. London, Ed. Chapman e Hall, 1992.
- GESSLER, P. E. I. D.; MOORE, N.J.;MCKENZIE, P.J.RYAN. Soil landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. **International Journal of Geographic Information System**, v.9, n.4, p.421- 432, 1995.
- GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S.S. Aplicações dos Modelos de Elevação SRTM em Geomorfologia. **Revista Geografia Acadêmica**, v.2, n.2, p. 73-83, 2008.
- HALL, G. F. Pedology and geomorphology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E; HALL, G. F. (Eds.). Pedogenesis and soil taxonomy. II. The soil orders. **Developments in soil science**. v.11b, p.118-140, New York: Elsevier, 1983.
- HAYKIN, S. **Redes Neurais: princípios e prática**. 2<sup>a</sup> Ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.
- HENGL, T. **Pedometric mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches**. Wageningen University, Enschede, 2003. 233p. PhD thesis - Wageningen University. Disponível em: [http://spatial-analyst.net/wiki/index.php?title=Pedometric mapping: PhD thesis](http://spatial-analyst.net/wiki/index.php?title=Pedometric_mapping:_PhD_thesis).
- HERMUCHE, P. M.; ANDRADE, A. C.; GUIMARÃES, R. F.; LEAL, CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. Compartimentação Geomorfológica em escala regional da bacia do rio Paraná. *In*: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, X, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro : SBGFA, 2003.
- HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO, A. P. F.; MARTINS, E. S.; DRUCK, S.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; SANTOS, N. B. F.; REATTO, A. **Morfometria como suporte para elaboração de mapas pedológicos: I. Bacias hidrográficas assimétricas**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Planaltina, Documentos 68, 25p. 2002.
- HILTON, G. E. Connections learning procedures. **Artificial Intelligence**, v. 40, n. 1-3, p. 185-234, 1989.
- HIROSE, Y.; YAMASHITA, K.; HIJIYA, S. Back-propagation algorithm which varies the number of hidden units. **Neural Networks**, v. 4, p. 61-66, 1991.

- HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, n. 69, v. 01, p. 14-47, 1981.
- HUDSON, B. D. The soil survey as a paradigm-based science. **Journal Soil Science Society of America**, v.56, p.836-841, 1992.
- HUGGET, R. J. Soil Landscape Systems: A model of soil genesis. **Geoderma**, v.13, p.01-22, 1975.
- IPPOLITI, G. A.; COSTA, L.M.; SCHAEFER, C. E .G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; GAGGERO, M. R.; SOUZA, E. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “Mar de Morros” (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.269-276, 2005.
- IRVIN, B. J.; VENTURA, S. J.; SLATER, B.K. Fuzzy and Isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant alley. **Geoderma**, v.77, p. 137-154, 1997.
- ITO, Y. et.al. Extraction of damaged regions using SAR data and neural networks. **International archives photogrammetric remote sensing**, Amsterdam, v. 33, p. 156-163, 2000.
- JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. New York: MacGraw Hill, 1941. 281p.
- KLINGEBIEL, A. A.; HORVARTH, E. H.; MOORE, D. G.; REYBOLD, W.U. Use of slope, aspect, and elevation maps derived from digital elevation model data in making soil surveys. **Soil Science Society of America**. SSSA Special Publication. n.20, p.77-90, 1987.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 01, p.159-174, 1977.
- LEMOES, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 4. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002.
- LIMA, M. R. **Atributos de solos e macrófitas aquáticas flutuantes: uma contribuição a sustentabilidade agrícola e ambiental na bacia do rio Iraí (PR)**. – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005. 111p. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção vegetal) – Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná.
- MAACK, R. **Geografia física do Paraná**. 2ª edição, José Olympio. Rio de Janeiro, 1981. 450p.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neocenozóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociências**, v. 19, n. 02, p. 265-281, 2000.

MATHWORKS. **User's Guide – Neural Network Tollbox**, MatLab. Math Works, 2007.

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.

McKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v. 89, p. 67-94, 1999.

McKENZIE, N.J.; GESSLER, P.E.; RYAN, P.J.; O'CONNEL, D. The role of terrain analysis in soil mapping. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), **Terrain Analysis - Principles and Applications**. Wiley, New York, p. 245-265, 2000.

MENDIONDO, E. M.; COLLISCHONN, W.; BULHÕES MENDES, C. A. Modelos numéricos do terreno e suas aplicações a bacias hidrográficas 2: Obtenção de atributos. In: XVII Congreso Nacional del Agua / II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. 1998.

MENDONÇA-SANTOS, M. L.; SANTOS, H. G. **Mapeamento digital de classes e atributos de solos – métodos, paradigmas e novas técnicas**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Rio de Janeiro, Documentos 55, 19p. 2003.

MILNE, G. Some suggested units of classification and mapping, particularly for East African soils. **Supplements to the Proceedings of the International Society of Soils Science**, v.4, n.3, p.183-198, 1935.

MINEROPAR – MINERAIS DO PARANÁ SA. **Atlas Geológico do Estado do Paraná**. Curitiba: MINEROPAR, 2001.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.01, p.69-77, 2005.

MONTGOMERY, D. R. Predicting landscape-scale erosion using digital elevation models. **Comptes Rendus Geoscience**. Paris, v. 335, p. 1121-1130, 2003.

- MOORE, I. D.; GESSLER, G.A.; PETERSON, G.A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.443-452, 1993.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B., LADSON, A. R. Digital terrain modeling: A review of Hydrological, geomorphological an biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30, 1991.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE : São José dos Campos, 1 ed, 2001.
- MOTTA, P. E. F.; CARVALHO FILHO, A. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO JUNIOR, W.; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.06, p.869-878, 2002.
- MUÑOZ, V. A. **Análise geomorfométrica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. 112p. (INPE-15796-TDI/1531). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- 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 – USP**, Série científica, v. 28, p. 129-143, 1997.
- NIZEYIMANA, E.; BICK, T. J. Soil and soil-landscape relationship in the North Central Region of Rwanda, East-Central Africa. **Soil Science**, v.152, n.03, p.225-236, 1992.
- ODEH, I. O. A.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; McBRATNEY, A. B. Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis. **Geoderma**, v.49, p.1-32, 1991.
- PASSOS, E. **Relações entre vertentes e solos em Umbará – Curitiba –PR**. Curitiba, 1987. 194 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná.
- PENNOCK, D. J.; ZEBARTH, B. J.; DE JONG, E. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. **Geoderma**, v.40, p.297-315, 1987.
- QUEIROZ NETO, J. P. Geomorfologia e Pedologia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 01, p. 59-67, 2000.

REIDMILLER, M.; BRAUN, H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning. The RPROP algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORK (ICNN). San Francisco, p. 586-591, 1993.

RIBEIRO, S. R. A. **Integração de imagens landsat TM e dados auxiliares para a delimitação automática de unidades fisionômicas (paisagem) e geológicas usando redes neurais artificiais**. Curitiba, 2003. 169 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

RIBEIRO, S. R. A.; BÄHR, H. P.; CENTENO, J. S. Integração de imagens de satélite e dados complementares para a delimitação de unidades de paisagem usando uma abordagem baseada em regiões. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 8, no 1, p.47-57, 2002.

RIBEIRO, S. R. A.; CENTENO, J. A. S. (a) Clasificación del uso del suelo utilizando redes neurales y el algoritmo MAXVER. **Innovación**, año 14, n.1. p. 55-60. Antofagasta – Chile. 2002.

ROCHA, H. O. **Mapa preliminar de solos da Fazenda Canguiri**. Curitiba, Escala 1:10.000. Impreso, 1990.

RUHE, R.V. Geomorphic surfaces and the nature of soils. **Soil science**, v. 82, p. 441-455, 1956.

SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R.; EBERT, H. D. Contribuição à geologia da bacia sedimentar de Curitiba (PR). **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n.47, p.123-142, 1999.

SANTOS, L. J. C. Contribuição da Análise Estrutural da Cobertura Pedológica ao desenvolvimento da Ciência do Solo. **Ra'ega**, Curitiba, n. 4, p. 131-138, 2000.

SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA, J. M. F.; ROSS, J. L. S. Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.7, n.2, p. 3-11, 2006.

SANTOS, H. G. Importância e evolução dos levantamentos de solos no Brasil. **Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciências do Solo**. v. 32. n. 1, p. 18-20, 2007.

SARAIVA, C. C. S. Avaliação das grades regulares geradas pelos métodos Kriging e inverso da distância de uma potência para fins de monorestituição. In: **II Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2001.

- SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O.A.; MCARTHUR, D. Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**, v. 27, p. 171-197, 2003.
- SEMA – SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Atlas da Vegetação do Estado do Paraná**. Curitiba : SEMA, 2002.
- SILVA, A. B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas – conceitos e aplicações**. Editora da Unicamp : Campinas, 1998, 236p.
- SILVA, A. C. VIDAL-TORRADO, P.; VÁZQUEZ, F. M.; SAADI, A. Relações entre solos e paisagens no sul de Minas Gerais. **Geociências**, v.21, n.01/02, p.97-111, 2002.
- SIRTOLI, A. E.; **Mapeamento de solos com auxílio de atributos do terreno, índices espectrais e geologia integrados por redes neurais artificiais**. Curitiba, 2008. 102p. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra.
- 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.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Irriga**, v.09, n.01, p.01-11, 2004.
- SOUZA, E. C. B. de; RIBEIRO, S. R. A.; BOTELHO, M. F.; KRUGER, C. P.; CENTENO, J.A.S. Geração de isolinhas, com dados obtidos por levantamento PS/L<sub>1</sub>L<sub>2</sub>, mediante técnicas de Redes Neurais Artificiais. **Acta scientiarum technology**. v.28, n.2, 2006.
- SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. **Fotografias Aéreas**. Escala 1:10.000, color, 2000.
- SUGAMOSTO, M. L. **Uso de técnicas de geoprocessamento para elaboração do mapa de aptidão agrícola e avaliação da adequação de uso do Centro de Estações Experimentais do Canguiri, município de Pinhais - Paraná**. Curitiba, 2002. 133p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias.

TERAMOTO, E. R.; LEPSCH, I. F.; VIDAL-TORRADO, P. Relações solo, superfície geomórfica e substrato geológico na microbacia do ribeirão Marins (Piracicaba – SP). **Scientia Agrícola**, v.58, n.02, p.361-371, 2001.

TRAUTH, M. H. **MatLab Recipes for Earth Sciences**. 2. ed. Springer : New York. 2007.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Science**, v.263, p.616-627, 1965.

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.

VENTURIERI, A.; SANTOS, J. R. Técnicas de Classificação de Imagens para Análise de Cobertura Vegetal. In: Assad, E. D.; Sano, E. E., eds. Sistema de Informação Geográfica: Aplicações na Agricultura. 2ª edição. Brasília, DF. Embrapa –SPI/Embrapa-CPAC. 1998. p.351-371.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F. Relações material de origem / solos e pedogênese em uma sequência de solos predominantemente argilosos e latossólicos sobre Psamitos na Depressão Periférica Paulista. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.357-369, 1999.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S.S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.04, p.85-144, 2005.

YOUNG, F. J.; HAMMER, R. D. Defining geographic soil bodies by landscape position, soil taxonomy, and cluster analysis. **Soil Science Society American Journal**, v. 64, p. 989-998, 2000.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Advances in Soil Science**, New York, v. 3, p. 1-70, 1984.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital terrain analysis, chapter 1. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, p.1-27, 2000.

WOOD, J. **The geomorphological characterisation of digital elevation models**. Leicester, UK, 1996. 185p. PhD Thesis - University of Leicester. Disponível em: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>.

WOOD, J. Visualizing Geomorphometry: Lessons from Information Visualization. **Proceedings of Geomorphometry**, Zurich, Switzerland, p. 9-12, 2009.