

Revista Brasileira de Geomorfologia - v. 13, nº 2 (2012)

PEDOMETRIA APOIADA EM ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS COM OPERAÇÕES DE TABULAÇÃO CRUZADA POR ÁLGEBRA DE MAPAS

PEDOMETRIC TECHNIQUES SUPPORTED IN TOPOGRAPHICAL ATTRIBUTES OF OPERATIONS FOR CROSS-TABULATION OF ALGEBRA MAPS

Claudinei Taborda da Silveira

(DeGeog - UFPR) - Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Centro Politécnico - Bloco Setor de Ciências da Terra - Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, CEP 81531-980 - Caixa Postal 19099 - Curitiba/PR - e-mail: claudineits@ufpr.br

Chisato Oka-Fiori

(DeGeog - UFPR) - Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Centro Politécnico - Bloco Setor de Ciências da Terra - Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, CEP 81531-980 - Caixa Postal 19099 - Curitiba/PR - e-mail: chisato@ufpr.br

Leonardo José Cordeiro Santos

(DeGeog - UFPR) - Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Centro Politécnico - Bloco Setor de Ciências da Terra - Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, CEP 81531-980 - Caixa Postal 19099 - Curitiba/PR - e-mail: santos@ufpr.br

Angelo Evaristo Sirtoli

(DeSolos - UFPR) - Rua dos Funcionários, 1540, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola - Universidade Federal do Paraná - CEP 80035 050 - Curitiba/PR - e-mail: asirtoli@ufpr.br

Claudionor Ribeiro da Silva

(UFU) - Rua Goiás, 2000, Vila Nova, Universidade Federal de Uberlândia - Campus Monte Carmelo - CEP 38500-000 - Monte Carmelo/MG - e-mail: crs.educ@gmail.com

Resumo

Os solos apresentam estreita relação com o relevo, assim é possível inferir a distribuição de unidades de solos a partir da análise da topografia. Técnicas de geoprocessamento possibilitam essa representação paramétrica do relevo a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT), do qual é possível calcular atributos topográficos. O método clássico de cartografia pedológica é exaustivo e oneroso; uma forma alternativa, foco de pesquisas atuais, é o emprego de técnicas de pedometria, favorecendo o reconhecimento de unidades preliminares de mapeamento. 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 atributos topográficos declividade, índices de corrente de máximo fluxo, de umidade e de capacidade de transporte de sedimentos, apresentaram melhor relação com as unidades de mapeamento de solos pré-existente da bacia do arroio do Corvo/PR, por isso, foram selecionadas para serem sobrepostas com aplicações de SIG por método de Tabulação Cruzada por álgebra de mapas, que resultou na identificação de unidades preliminares de solos. Foram identificadas três classes de solo, obedecendo o primeiro nível categórico: Latossolo, Cambissolo e associação Organossolo + Gleissolo. Para validação do mapa preliminar resultante, foram analisadas 53 amostras de campo e conferência *in loco*. As unidades de solos classificadas

foram também comparadas com um mapa de solos pré-existente 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 concorda em 69% de área com o método com valor $K=0,43$ e $EG=0,69$. A qualidade das unidades de solos classificadas foi satisfatória, devido aos valores de K e EG alcançados na comparação com mapas de solos pré-existent.

Palavras-chave: cartografia pedológica, análise digital do relevo, MDT

Abstract

Because soils show a strict relationship with relief, distributions of soil units can be inferred from topography analyses. Geoprocessing techniques can be used to create parametric relief representations from digital terrain models (DTMs), and these models can be used to calculate topographical attributes. The classic method of pedological cartography is onerous and time-consuming; as an alternative, pedometric techniques favor the recognition of preliminary mapping units. 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 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, which resulted in the identification of soil preliminary units. Were delineated three preliminary soil classes in the basin in the first hierarchical level of the SiBCS: Latosols, Cambisols, and Organosols+Gleissols. To validate the preliminary map derived were analyzed fifty-three field samples, and checking *in loco*. The predicted map were also compared to a conventional map of the Corvo stream's basin, State of Paraná, 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 agrees in 69% of the area ($K=0,43$ e $EG=0,69$). The quality of the soil units classified was satisfactory, based on the K and GE values from the comparison.

Keywords: pedological cartography, digital analysis of relief, DTM

Introdução

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

O mapeamento digital de solos tem apresentado um rápido desenvolvimento de novos métodos. Dois principais grupos de técnicas auxiliares têm tido um papel importante: a) imagens de sensoriamento remoto orbital e b) atributos topográficos derivados de Modelo Digital do Terreno (MDT), (DOBOS *et al.*, 2000).

Esse segundo pauta-se na identificação de unidades homogêneas da paisagem, apoiado em modelos morfológicos do relevo calculados a partir de MDT. Apresenta potencial na predição de mapeamento de solos, visto que a posição ocupada pelos solos nas vertentes influencia nos processos pedogenéticos. Desse modo, a aplicação de atributos topográficos pode ser empregada na distinção de classes pedológicas.

A modelagem digital do relevo é uma das técnicas quantitativas mais empregadas para predizer 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, cuja primeira derivada constitui os atributos primários e a segunda derivada os secundários (MOORE *et al.*, 1991; MOORE *et al.*, 1993; WILSON e GALLANT, 2000).

O principal mérito da análise digital do terreno é o apoio na etapa de trabalho de campo. Essa fase de identificação de unidades preliminares em gabinete é apoiada num modelo de ocorrência de solos previamente conhecido (IPPOLITI *et al.*, 2005). Metodologias para predição de unidades de solos, derivadas desses padrões, são eficientes e tornam os levantamentos pedológicos com limites mais precisos, mais rápidos e com menores custos (HERMUCHE *et al.*, 2002).

Os resultados de pesquisas realizadas até o momento têm considerado que a distribuição espacial de atributos topográficos mostra-se eficiente na caracterização da morfologia do relevo, que as características do relevo influenciam na distribuição dos solos e que as aplicações de modelos paramétricos preditivos de solo oferecem suporte à cartografia pedológica (CHAGAS, 2006; CRIVELANTI, 2009; DIKAU, 1989; HERMUCHE *et al.*, 2002; IPPOLITI *et al.*, 2005; GESSLER *et al.*, 1995; KLINGEBIEL *et al.*, 1987; McKENZIE & RYAN, 1999; MOORE *et al.*, 1993; MUÑOZ, 2009; ODEH *et al.*, 1991; SILVEIRA, 2010; SIRTOLI, 2008).

O emprego de métodos de apoio ao mapeamento de solos, como a modelagem digital do relevo e pedometria, representam uma contribuição com a cartografia pedológica no Brasil, uma vez que na atualidade existe uma grande demanda e carência dessas informações, visto que a cobertura completa de solos, existente no território brasileiro, encontra-se disponível em níveis exploratórios e esquemáticos (escalas 1:1000000 à 1:5000000) 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), (SANTOS, 2007).

No entanto, são vários os fatores que limitam a aquisição de mapas de solos no país, dentre os quais podem ser destacados o elevado custo dos levantamentos, a vasta extensão territorial das áreas a serem mapeadas 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).

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo realizar a predição de unidades preliminares de mapeamento de solos em nível de ordem, que equivale ao primeiro nível hierárquico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) de EMBRAPA (2006). A predição foi realizada a partir da análise digital do relevo, considerando quatro atributos topográficos, integrados por meio de álgebra de mapas em geoprocessamento com operações de tabulação cruzada.

Área de Estudo

A área de estudo compreende a 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 mapa convencional de solos na escala 1:35.000, que foi empregado na validação comparativa das unidades preliminares de solos mapeadas. Essa bacia possui área de 447,3 ha, está localizada no município de Pinhais, estado do Paraná, Brasil (Figura 1).

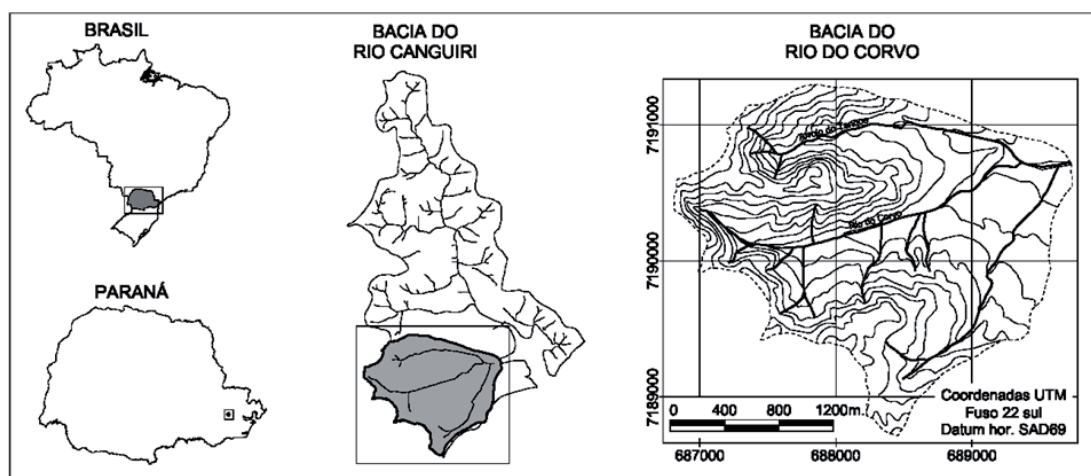


Figura 1 - Localização da Área de Estudo

Situa-se no Primeiro Planalto Paranaense, predominando na subunidade morfoescultural Planalto de Curitiba, cujo compartimento morfoescultural apresenta dissecação moderada composta por topos alongados e aplainados, vertentes convexas e formas de relevo predominantemente onduladas a suave onduladas e no terço inferior da bacia o compartimento denominado de Planícies Fluviais sobre Sedimentos Inconsolidados do período Quaternário (SANTOS *et al.*, 2006).

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 70m. 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.

Sob o aspecto geológico ocorre sobre a bacia sedimentar de Curitiba, em maior parte a Formação Guabi-

rotuba e, secundariamente, em áreas restritas de planícies sobre Sedimentos Holocênicos. A Formação Guabirotuba é resultado de sucessivas fases erosivas, composta predominantemente por depósitos argilosos e silticos esverdeados que gradam para termos mais grossos de forma interdigitada ou abrupta, dependendo das características estatigráficas e estruturais locais, com intercalações de areias arcossianas 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, cujo processo formador é hidráulico-deposicional, condicionado às calhas de drenagem dos rios e planícies de inundação (MINEROPAR, 2001).

Método

A partir de dados vetoriais planialtimétricos extraídos das folhas topográficas, escala 1:10.000, da Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba – COMEC (1976), foi gerado o MDT que derivou os atributos topográficos: declividade, índices de corrente de máximo fluxo, de umidade e de capacidade de transporte de sedimentos.

A seleção desses atributos topográficos no presente trabalho deve a sua relação com processo pedogenéticos e morfogenéticos: a declividade por consistir em importante atributo topográfico que controla os processos pedogenéticos, afetando diretamente a velocidade do fluxo superficial e subsuperficial de água, consequentemente o regime hídrico e o potencial de erosão/deposição (GALLANT e WILSON, 2000); o índice de corrente de máximo fluxo por representar os fluxos de água, superficial e subsuperficial, ao longo da vertente, que estão diretamente relacionados à variabilidade espacial dos solos (DANIELS e HAMMER, 1992); o índice topográfico de umidade por possibilitar a identificação de zonas de concentração de água na paisagem (WILSON e GALLANT, 2000), apresentando potencial na separação de unidades de solos (SIRTOLI, 2008 e SILVEIRA, 2010) e o índice de capacidade de sedimentos por permitir identificar áreas de erosão e de deposição (MOORE *et al.*, 1991), que interferem na distribuição dos solos.

Geração dos atributos topográficos

As operações foram executadas por meio de uma janela com nove nodos no programa *MatLab* (MATHWORKS, 2007), que consiste em calcular os parâmetros de uma célula central e seus vizinhos em uma janela de oito células que se deslocam 3x3, no qual é executada uma varredura sobre o conjunto total de dados do MDT. O espaçamento da grade, representado foi de 5 metros.

A declividade foi determinada por duas diferenças finitas locais, nas direções x e y, do MDT, calculado pela equação 1 (HORN, 1981), com valor em graus.

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

onde, β representa a inclinação local do terreno,

f_x^2 e f_y^2 são definidos por aproximações das diferenças

finitas, por meio das derivadas parciais f_x e f_y , nas direções de x e y.

O índice de corrente de máximo fluxo 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 corrente de máximo fluxo (Ω) foi definido pelo produto da área específica de contribuição (A_c) e a tangente da declividade (β), segundo a equação 2.

$$\Omega = A_c \tan \beta \quad (2)$$

O índice de umidade 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 empregado 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. Foi definido pelo logaritmo natural da razão entre área

de contribuição (A_c) e a tangente da declividade (em graus), de acordo com a equação 3.

$$w = \ln \left(\frac{A_c}{\tan \beta} \right) \quad (3)$$

As variáveis consideradas no índice capacidade de transporte de sedimentos (τ) foram a área de contribuição específica (A_c) e o seno da declividade $\sin \beta$, descrito na equação 4.

$$\tau = \left(\frac{A_c}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^n \quad (4)$$

Os valores das constantes m e n são 0.6 e 1.3, respectivamente.

O índice de capacidade de transporte de sedimentos (τ) está negativamente correlacionado com o índice de umidade (w) e positivamente correlacionado com o índice de corrente de máximo fluxo (Ω). Sua 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).

Discretização dos atributos topográficos

Os intervalos de declividade discretizados do atributo α 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% re-

levo escarpado. Na área de estudo ocorreram as quatro primeiras classes que compõe o mapa de declividade (Figura 2a)

O índice corrente de máximo fluxo foi discretizado em quatro classes: 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 (Figura 2b); 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 (Figura 2c) e o índice topográfico da umidade foi discretizados em seis intervalos, cujas classes são: IU1 com valores entre 1 e 7, IU2 com valor igual a 8, IU3, igual a 9, IU4 igual a 10, IU5 igual a 11 e IU6 entre 12 e 27 (Figura 2d). A separação das classes foi realizada de modo empírico, ajustando-as ao modelo de ocorrência de solos na área de estudo, assim outras tentativas de classificação não apresentaram relações adequadas.

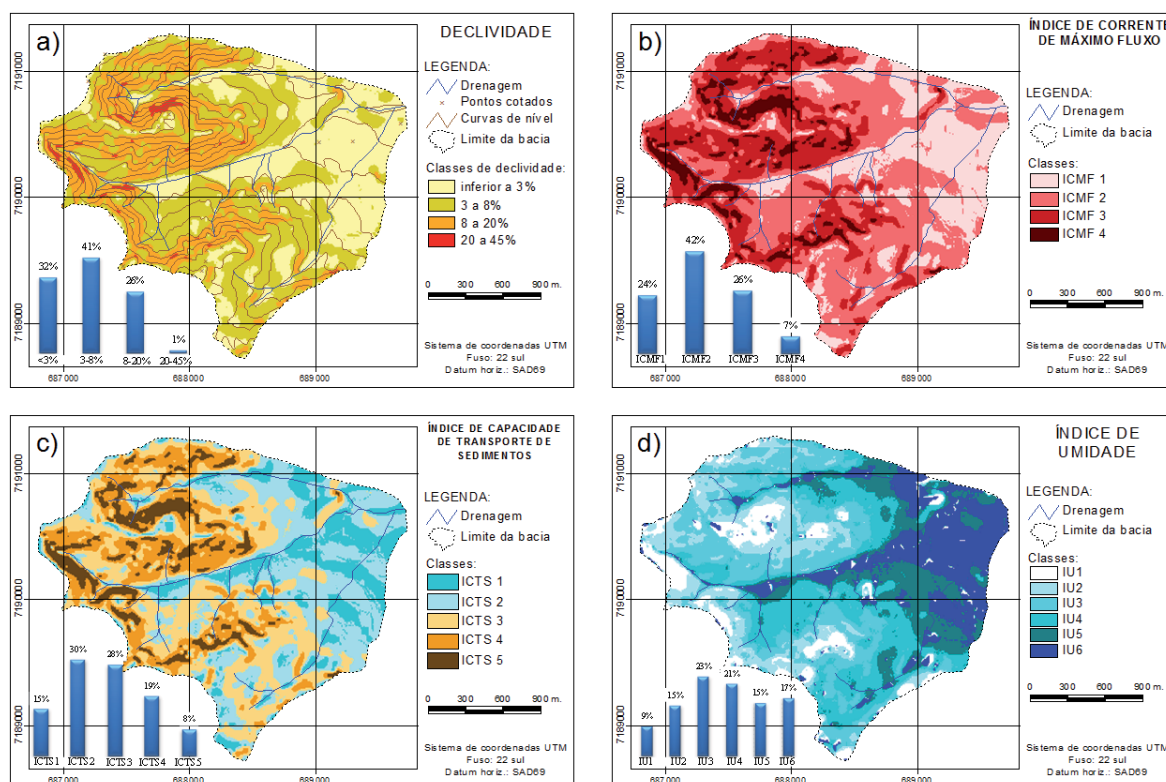


Figura 2 - Mapas dos Atributos Topográficos com Classes Discretizadas

Integração dos atributos por meio de tabulação cruzada por álgebra de mapas

A técnica empregada na integração das variáveis é por superposição de mapas ou álgebra de mapas, que foi conceituada por Tomlin (1983), para indicar o conjunto de procedimentos de análise espacial em geoprocessamento que produz novos dados a partir de funções de manipulação aplicadas a um ou mais mapas.

Sua execução foi realizada em ambiente de SIG, considerando pesos atribuídos. O processamento foi realizado no *software ArcGis 9.3.1* (ESRI, 2009), com o módulo *Spatial Analyst* considerando os atributos topográficos que apresentam maior relação com as unidades de solos, segundo avaliação de Silveira (2010).

Na primeira matriz foram integradas as variáveis índice de capacidade de transporte de sedimentos e a declividade (Tabela 1), que resultaram em 14 combinações que ocorrem na área de estudo. As que representam muito baixo ICTS em relevo plano 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. As combinações dessa primeira etapa foram incorporadas em: a) Grupo 1: 11 e 12; b) Grupo 2: 13, 14, 21, 22, 23 e 24 e c) Grupo 3: 31, 32, 33, 34, 35 e 45.

Tabela 1 - Matriz de tabulação dos atributos topográficos declividade x ICTS

declividade	Classes (α)	Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos				
		$\tau 1$	$\tau 2$	$\tau 3$	$\tau 4$	$\tau 5$
	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

A segunda matriz de tabulação (Tabela 2) apresentou 21 combinações, organizadas em cinco agrupamentos: a) Grupo 1: 15, 16 e 26; Grupo 2: 12, 13, 14, 23, 24 e 25; Grupo 3: 11, 21 e 22; Grupo 4: 31, 32, 33, 34 e 35 e Grupo 5: 41, 42, 43 e 44.

Tabela 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

Para Irvin *et al.* (1997) a delimitação automática de geoformas 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, 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).

Assim, na terceira matriz de tabulação os agrupamentos das outras matrizes foram integradas (Tabela 3), essas combinações representam unidades geomórficas de paisagem, que expressam a dinâmica do ambiente em função da morfologia do relevo. 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: a) Cambissolos representados pelas unidades geomórficas 4 e 5; b) Latossolos pelas unidades 2 e 3 e c) associação Organossolos+Gleissolos pela unidade 1, essa associação contempla os solos de caráter hidromórfico.

Tabela 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

Validação das unidades preliminares

As unidades de solos classificadas foram validadas 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).

Validação das unidades preliminares por meio de comparação com mapa pré-existente

O mapa preliminar de solos classificados por tabulação cruzada foi validado também por meio da comparação com um mapa de solos pré-existent na área de estudo, elaborado por Lima (2005), na escala 1:35.000, com recobrimento sobre a bacia do rio Canguiri.

A avaliação quantitativa dos resultados foi medida pelos índices: Kappa, Exatidão Global (EG) e Acurácia do ponto de vista do Usuário e do Produtor, por meio da análise da matriz de erros. A interpretação qualitativa do coeficiente Kappa é baseada em intervalos que representam a qualidade da imagem, segundo LANDIS e KOCH (1977), (Tabela 4).

Tabela 4 – Qualidade de Classificação da Imagem Conforme Intervalos do Índice Kappa

Coefficiente Kappa	Qualidade da imagem
Inferior a 0	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)

Resultados e Discussões

Classificação de unidades preliminares de mapeamento de solos

Com o emprego de álgebra de mapa, apoiado em operação de tabulação cruzada, organizada na forma de matrizes contendo as classes dos atributos topográficos, foram obtidas cinco classes de unidades geomórficas (Figura 5).

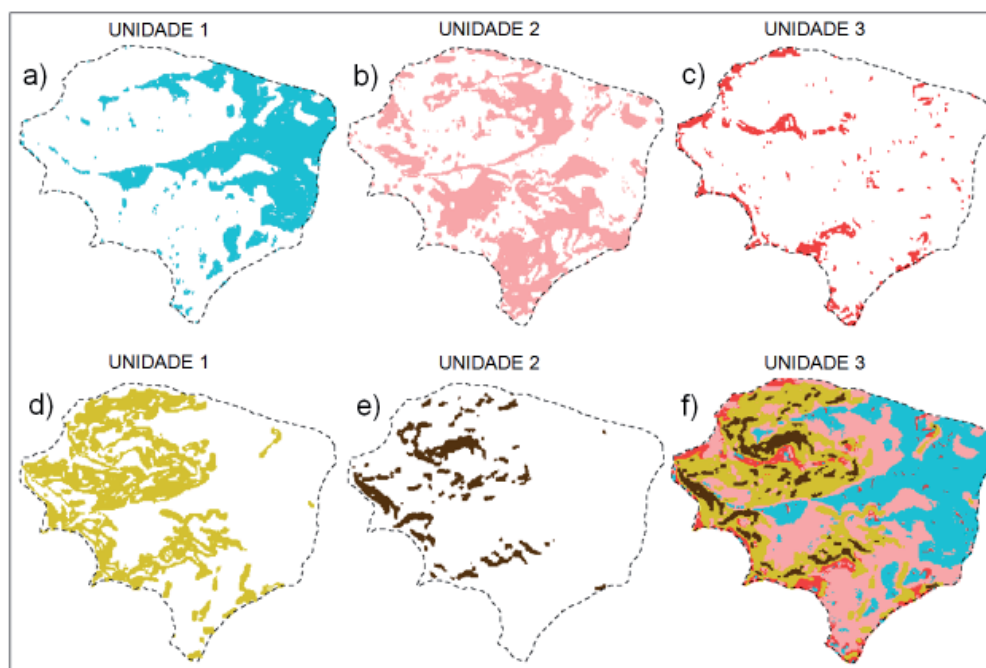


Figura 3 - Unidades Geomórficas Obtidas por Tabulação Cruzada

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 3-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 (Ω_1 e Ω_2), de capacidade de transporte de sedimentos – ICTS (τ_1 e τ_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, marcadas pela presença de constante saturação

hídrica, caracterizando um ambiente de hidromorfia situado nas planícies aluviais da bacia.

A unidade 2 (Figura 3-B) é composta por classes de valores intermediários do IU (w_2 , w_3 e w_4) e do ICTS (τ_3 e τ_4), associados às classes com baixos valores do ICMF (Ω_1 e Ω_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 3-C) detém classes com valores baixos de umidade (w_1 e w_2), combinado a classes com baixos valores do ICMF (Ω_1 e Ω_2), do ICTS (τ_1 , τ_2 , τ_3 e τ_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 Ω , τ e α . São ambientes bem drenados, situados em interflúvios preservados e em posições de terço superior de vertentes convexas. 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 3-D) combina valores elevados de ICMF (Ω_3), com IU inferior a w_6 e declividades superiores a 8% com qualquer classe do ICTS. As geoformas decorrentes dessa configuração expressam alto potencial de transporte de material, situados predominantemente nos terços intermediários das vertentes, onde a associa-

ção 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 3-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 Ω_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 3-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 4).

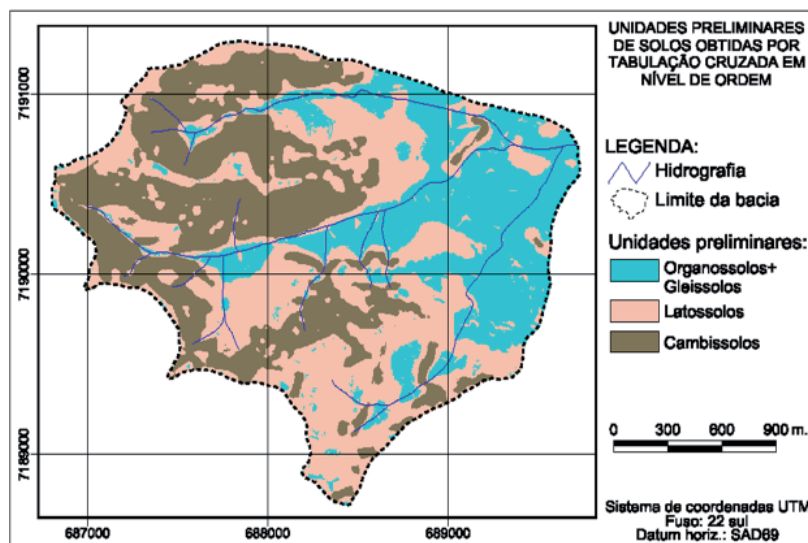


Figura 4 - Mapa das Unidades Preliminares de Mapeamento de Solos

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). 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 4).

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).

Nas porções de terços inferiores das vertentes, representados na unidade 2, ou nos interflúvios aplanados, delineados na unidade 3 (Figura 3), predominam Latossolos (Figura 4). 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 aplanados da bacia. Constituem superfícies preservadas, sem retrabalhamento atual de material. Essas áreas são aplainadas, com relevo suave ondulado, constituídos por solos profundos e bem drenados.

Os Cambissolos (Figura 4) são representados pelas unidades geomórficas 04 e 05 (Figura 3). 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.

Validação das unidades classificadas por meio de amostras de campo

Para averiguar a adequabilidade da delimitação das unidades preliminares de solos mapeadas, foram avaliadas cinquenta e três amostras de campo, representadas na forma de pontos sobre as unidades mapeadas (Figura 5). 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.

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 (Figura 5), destas amostras duas não corresponderam com a classe de solo dessa unidade, que corresponde a 20% do conjunto, sendo a primeira um Cambissolo Háptico Aluminico 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.

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 (Figura 5), sendo que nove delas, 41% do conjunto, não conferem com a unidade mapeada, em nível de ordem. 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, 27% do conjunto.

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, segundo o SiBCS da EMBRAPA (2006). Devido à classe de Cambissolo de caráter latossólico ocorrer em paisagens semelhantes à do Latossolo na Formação Guabirotuba, as classes discretizadas dos atributos topográficos se assemelham nessas áreas, assim, houve dificuldade em separá-las na tabulação cruzada.

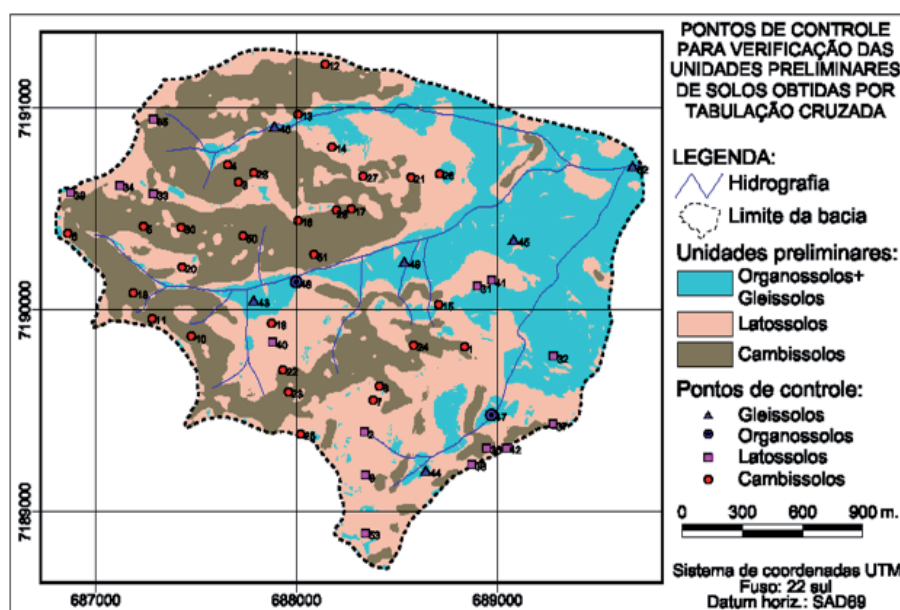


Figura 5 – Distribuição dos Pontos de Controles para Verificação das Unidades Preliminares de Solos Classificadas

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 (Figura 5). Dessas, apenas a amostra de verificação de campo 36 é discordante da unidade, que corresponde a Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico câmbico, que corresponde a 5% do conjunto. 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 morfológica-

mente 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.

Validação das unidades classificadas por meio de comparação com mapa convencional

Os resultados obtidos mostram que na avaliação geral entre as imagens (Figura 6) a Exatidão Global foi de 0,69 e coeficiente Kappa de 0,47, o que demonstra que o mapa obtido por tabulação cruzada alcançou uma boa qualidade, conforme as classes Kappa de Landis e Koch (1977).

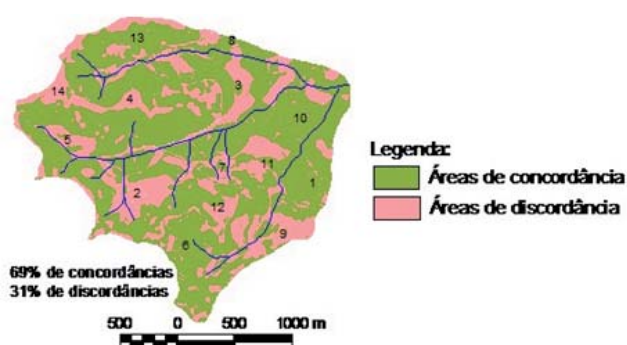


Figura 6 - Comparação das Unidades Mapeadas com o Mapa Pré-Existente

Na matriz de erro (Tabela 5) foram evidenciados valores satisfatórios da EP e EU, exceto na classe de Latossolo, que apresentou 40% de exatidão do ponto de vista do produtor. A explicação é porque os Latossolos posicionados em posições de terço médio e inferior das vertentes, presentes nas regiões 2, 5 e 8 (Figura 6), apresentarem discordâncias com as unidades do mapa pré-existente, onde os Latossolos encontram-se mais restritos aos terços inferiores em vizinhança aos solos de caráter hidromórfico. Outras inconformidades dessa classe se referem às áreas não mapeadas como Latossolos em posições de topos, nas regiões 4 e 14, interpretadas como Cambissolos por encontrar valores de elevada atividade da argila em amostras analisadas. Embora LIMA (2005) aponte que as características morfológicas desse solo se assemelham aos Latossolos. 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. As demais discordâncias verificadas estão associadas à acuracidade no traçado dos limites das classes entre os mapas comparados.

Tabela 5 - Matriz de Erro

Unidades preliminares de solos	Classe de solos	Mapa pré-existente de solos			
		Organossolo + Gleissolo	Latossolo	Cambissolo	EP
Organossolo + Gleissolo		41727	5097	743	88%
Latossolo		17494	28600	25116	40%
Cambissolo		1162	6589	52240	87%
EU		69%	71%	67%	EG=0,69

Legenda: EP - exatidão do ponto de vista do produtor; EU - exatidão do ponto de vista do usuário; EG - exatidão global.

Outro aspecto a ser destacado 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 verificou-se que as unidades preliminares de Cambissolos apresentam erro de inclusão (E.In.) de 0,13 e E.Om. de 0,33, esses baixos valores de erro estão associados à eficiente definição dos limites de Cambissolo obtidos pelas unidades preliminares. A Figura 7-a revela essa constatação em análise visual, onde os Cambissolos demonstram similaridade com a distribuição das unidades do mapa pré-existente, cujos contornos revelam a mesma tendência de distribuição, exceto nas posições de topos e divisores.

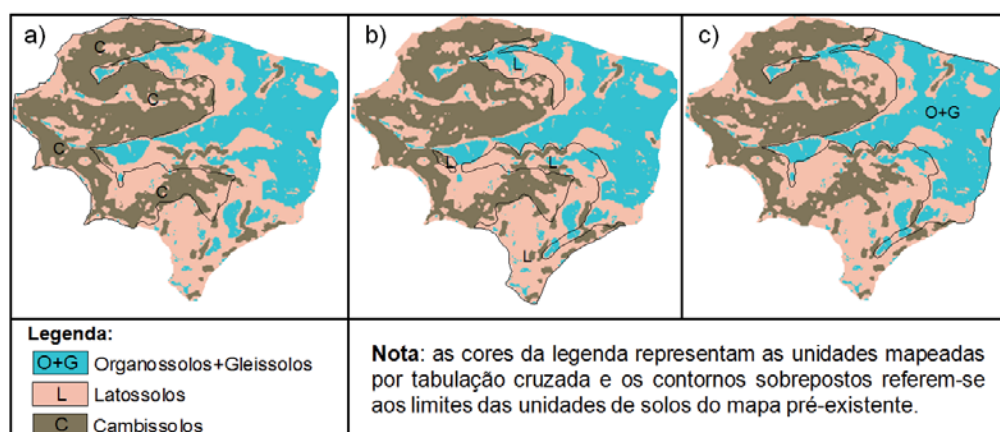


Figura 7 – Sobreposição das Unidades Preliminares com as do Mapa Pré-Existente

Na classe de Latossolo os valores de E.In. e E.Om., obtidos na comparação com os mapas de solos pré-existentes são de 0,60 e 0,29, respectivamente. O valor de inclusão é bastante superior ao verificado no Cambissolo. Na Figura 7-b verifica-se que os contornos entre Latossolos do mapa classificado com o pré-existente se assemelham nas posições de terço inferior das vertentes, porém, nas posições de topos e interflúvios são discordantes.

Na classe de Organossolo+Gleissolo os valores de E.In. e E.Om. são, respectivamente, 0,12 e 0,31. 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 7-c).

Conclusões

A análise digital do relevo demonstrou potencial na predição da distribuição dos solos em escala local, por meio da classificação de unidades de mapeamento preliminar com uso de técnica de tabulação cruzada por álgebra de mapas para integrar variáveis paramétricas da topografia.

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.

O método apresentou resultados satisfatórios na escala empregada, demonstrando grande potencialidade para apoiar a cartografia pedológica, pois faz a classificação de unidades preliminares de mapeamento para auxiliar nas atividades de campo e de levantamentos. Esse fato corroborou com a hipótese de que a análise digital do relevo fornece suporte ao mapeamento de solos. Além das escalas supra mencionadas outras podem ser testadas.

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 maior detalhamento da 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.

Referências Bibliográficas

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).
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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 01, p.159-174, 1977.
- LEMOS, 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.
- MATHWORKS. **User's Guide – Neural Network Tollbox**, MatLab. Math Works, 2007.
- 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.
- 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.
- MINEROPAR – MINERAIS DO PARANÁ SA. **Atlas Geológico do Estado do Paraná**. Curitiba: MINEROPAR, 2001.
- 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 and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30, 1991.
- 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.; 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.
- SILVEIRA, C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: integração de atributos topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e Redes Neurais Artificiais**. Curitiba, 2010. 152p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra.
- 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.
- 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.
- TOMLIN, C. D. **A Map Algebra**. In Proceedings of Harvard Computer Graphics Conference, at Cambridge, Mass, 1983.
- 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>.