

FOTOPEDOLOGIA E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA INTEGRADOS NA CARACTERIZAÇÃO E MAPEAMENTO DE SOLOS

Photopedology and geographical information systems integrated in the characterization and digital mapping of soils

Edvania Aparecida Corrêa*
Isabel Cristina Moraes*
Luiz Henrique Pereira*
Sérgio dos Anjos Ferreira Pinto**

***Universidade Estadual Paulista - UNESP, Campus de Rio Claro**
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE

Geógrafo

Avenida 24 A, 1515 – Bairro Bela Vista – Rio Claro, São Paulo, Brasil – CEP: 13506-900 – Telefone: (19) 3526-4100
edvaniacorreia@ig.com.br
bel.moraes@gmail.com
e_luizh@yahoo.com.br

****Universidade Estadual Paulista - UNESP, Campus de Rio Claro**
Instituto de Geociências e Ciências Exatas- IGCE

Geógrafo, Professor Titular do Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento.

Avenida 24 A, 1515 – Bairro Bela Vista – Rio Claro, São Paulo, Brasil – CEP: 13506-900 – Telefone: (19) 3526-4100
sanjos@rc.unesp.br

RESUMO

O mapa de solos como produto cartográfico de síntese pode ser utilizado como ferramenta norteadora aplicada a estudos sobre a capacidade produtiva de solos, adequabilidade do uso agrícola e planejamento territorial. Neste contexto, quando da utilização de determinadas ferramentas, como a fotointerpretação pedológica e a utilização de técnicas de geoprocessamento, são obtidos mapeamentos coerentes e com erros padronizados, elevando desta maneira a precisão das ações referentes ao planejamento territorial. Neste viés, o presente artigo apresenta a aplicação de técnicas de fotopedologia e geoprocessamento na elaboração do mapeamento digital de solos, visando a cartografia da variabilidade espacial de unidades pedológicas, bem como à verificação da confiabilidade das unidades mapeadas por meio da validação em campo e obtenção de coeficientes de concordância. Na validação do mapeamento, realizada por meio da correlação geral dos dados presentes no esboço fotopedológico com os dados de campo, foi possível obter a exatidão global do mapeamento de 0,72% e índice Kappa geral de 0,61, sendo este último classificado como um dado de confiabilidade substancial. Tendo em vista tais dados, a aplicação da fotopedologia aliada aos aspectos morfométricos e a relação solo *versus* relevo apresentaram resultados satisfatórios quando da correlação com a verdade terrestre, demonstrando assim um elevado poder preditivo do método. As informações obtidas a partir da fotointerpretação pedológica, bem como as informações geomorfométricas, obtidas a partir de produtos cartográficos e técnicas de geoprocessamento, aliadas aos conceitos pertinentes aos processos geomorfológicos ocorrentes nas vertentes e os seus reflexos na paisagem e na formação dos solos foram eficazes na caracterização e mapeamento digital dos solos. Complementar à fotointerpretação, o uso de material pedológico preexistente e do Modelo Digital de Elevação do Terreno mostrou-se como ferramenta consistente, de maior agilidade em relação ao levantamento de solos tradicionais e menos onerosa quanto aos recursos humanos utilizados.

Palavras-chave: Fotopedologia. Sistemas de informação geográfica. Validação em campo.

ABSTRACT

The soil map as synthetic cartographic product can be used as a guiding tool applied to studies about the productive capacity of soils, agricultural land use suitability and territorial planning. In this context, when using particular tools such as pedological photointerpretation and geoprocessing techniques consistent mappings and standard errors are obtained, thus increasing the accuracy of actions regarding the territorial planning. In this context, this paper presents the application of photopedology and geoprocessing techniques in the digital soil mapping development, aiming mapping at spatial variability of soil units as well as verifying the reliability of soil units identified by field validation and obtaining concordance coefficient. In the mapping validation, which was performed by the general data correlation present in photopedological outline with the field data, it was possible to obtain the mapping overall accuracy of 0,72 % and Kappa index of 0,61, the latter rated as a reliable substantial data. Considering these data, the application of the photopedological outline allied to morphometric aspects and soil x relief relation showed satisfactory results with the field truth correlation, demonstrating a high predictive power predictive of the method. The information obtained from pedological photointerpretation as well geomorphometrics information obtained from cartographic products and geoprocessing techniques, allied to concepts relevant to geomorphological processes occurring in the slope and its impact on landscape and soil formation. Complementary to the photointerpretation, the use of pre – exsistant pedological materials and digital terrain elevation model were considered consistent tools, with greater agility in relation to traditional soil surveys and less costly use of human resources.

Keywords: Photopedology. Geographical information systems. Field validation.

1 INTRODUÇÃO

O paradigma da sustentabilidade ambiental tem direcionado o aprimoramento dos procedimentos metodológicos para aquisição e análise de informações relacionadas aos aspectos físicos e biológicos do sistema terrestre. Observam-se grandes esforços dos trabalhos de cunho conservacionista em garantir elevado rigor na precisão para obtenção de dados, acurácia em técnicas de mapeamentos e riqueza nas informações derivadas de complexas análises. Ao mesmo tempo, tem-se que a “agilidade” e a “redução de tempo” para execução destas atividades assumem *status* de pré-requisito, visto a necessidade existente de que planejamentos e/ou respostas às alterações antrópicas no ambiente sejam tão rápidas quanto a velocidade de suas intervenções.

Estas condições também estão fortemente presentes nos diversos ramos do agronegócio, orientando o desenvolvimento tecnológico e econômico em escala nacional e global. Neste segmento, são realizados significativos investimentos em busca de alternativas tecnológicas capazes de disponibilizar maior eficiência no controle das informações de produtividade no campo, e que resultem em melhorias na utilização de insumos, serviços e, principalmente, dos recursos naturais.

Inúmeros trabalhos demonstram que levantamentos de solos, adequadamente conduzidos, permitem a aquisição de grande número de informações que, apropriadamente manipuladas, possibilitam o emprego de técnicas e planejamentos que possam prolongar e até mesmo aumentar a capacidade produtiva das terras, além de garantir o adequado manejo e conservação dos recursos naturais.

Neste contexto, o aprimoramento de métodos que viabilizem a realização de mapeamentos e caracterizações pedológicas com maior agilidade e menor aplicação de recursos é uma proposta convergente aos anseios metodológicos, econômicos e sociais. A integração das técnicas de sensoriamento remoto, de geoprocessamento e de modelagem ambiental, também pode ser importante procedimento para viabilizar resultados satisfatórios. Tais técnicas otimizam os trabalhos de campo e a coleta de amostras, responsáveis pelo dispêndio de tempo e recurso, mas principalmente, permitem avaliações baseadas em critérios bem orientados e sistematizados, reduzindo a morosidade das interpretações, resultando em mapeamentos coerentes e com erros sistemáticos.

Os produtos de sensoriamento remoto assumem grande importância, pois facilitam a visualização das informações distribuídas no espaço geográfico, e agilizam a cartografiação,

constituindo-se em importante fonte de dados para diferenciação de áreas e caracterização de seus constituintes orgânicos e mineralógicos. Entre outros trabalhos, destacam-se aqueles realizados por Galvão e Formaggio (2007), Galvão et al. (2008), Demattê (2002), Demattê et al. (2004, 2011 e 2012) e Bazaglia Filho et al. (2013), que desenvolveram estudos baseando-se na aplicação de fotopedologia, os quais consistem na análise minuciosa de elementos e padrões fitofisiográficos da superfície terrestre por meio de aerofotolevantamentos (quantitativos e qualitativos) e da convergência de evidências, o que permite diagnosticar os limites e contatos das prováveis unidades de solos existentes na área analisada (DEMATTÊ, 2009).

Contudo, Novo (2008) alerta que o monitoramento e o levantamento de solos, baseados apenas na interpretação de produtos de sensoriamento remoto, possuem o agravante das interferências exercidas pelos diversos elementos da paisagem, que recobrem o solo e interceptam suas respostas espectrais, condicionando mudanças em sua informação. Considerando estas limitações, autores têm associado, em ambiente SIG, as tradicionais técnicas de fotointerpretação a produtos cartográficos derivados de modelagens do ambiente físico, denominando-os, genericamente, de mapeamento digital de solos (McBRATNEY et al, 2003).

Sarmiento (2010) descreve, sucintamente, a vantagem do emprego das técnicas de geoprocessamento. Indica que a utilização de modelos numéricos do terreno, como mapa de classes de hipsometria, classes de declividade, e outras informações geomorfométricas derivadas, configuram-se em importante subsídio à elaboração do esboço fotopedológico. Tudo isto é determinante para a delimitação das áreas de transição do modelado de relevo e indicação dos possíveis limites entre as unidades de mapeamento pedológico. Estas informações, associadas à carta de solos, normalmente disponíveis em pequenas escalas de contexto regional, complementam as informações necessárias para orientar a determinação da legenda de mapeamento adotada.

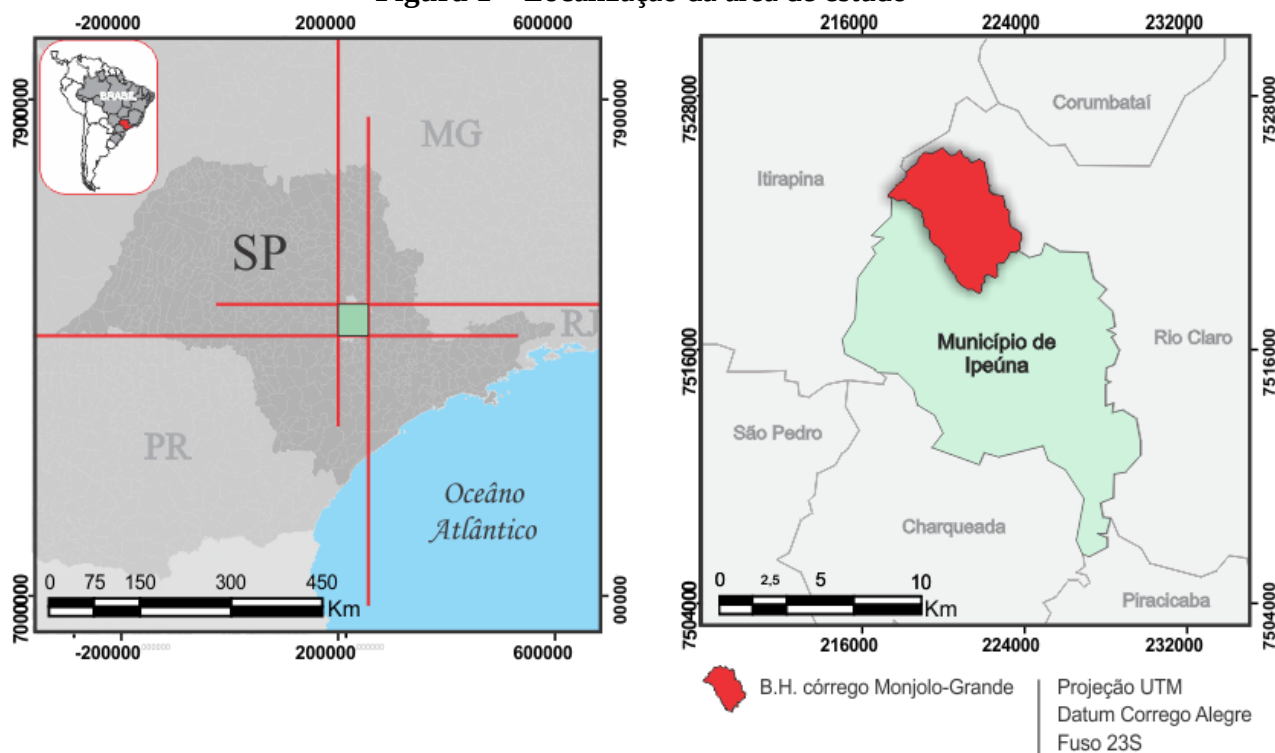
Um aspecto importante destacado por MacMILLAN (2008), no que tange ao mapeamento digital de solos, refere-se à padronização de critérios quantitativos estabelecidos para compor as regras de mapeamento. Por serem atribuídos para toda a área mapeada, segundo uma mesma lógica de cruzamento de dados, os resultados obtidos são mais detalhados em relação aos mapeamentos convencionais, e sua padronização permite que toda a área seja submetida à avaliação de acurácia e de qualidade da classificação resultante.

Assim, o uso de produtos de sensoriamento remoto e técnicas de fotointerpretação no mapeamento de unidades pedológicas, e o levantamento de solos e produtos derivados de modelagens numéricas do terreno contribuem, significativamente, para a análise das características da paisagem em um contexto integrado.

Tendo em vista a elevada importância das técnicas de geoprocessamento, aliadas às tradicionais técnicas de fotointerpretação pedológica, juntamente com a necessidade do desenvolvimento de produtos com elevada acurácia de informações, o objetivo do presente estudo foi o de produzir um mapa de solos a partir da fotointerpretação pedológica e de informações geomorfométricas e testar a confiabilidade do mesmo por meio da validação em campo.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O mapeamento foi realizado para a bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande, a qual é tributária do rio Passa Cinco, sub-bacia do rio Corumbataí, no baixo curso do Rio Piracicaba (SP). A mesma encontra-se situada no município de Ipeúna, centro leste do Estado de São Paulo, compreendendo área aproximada de 2800 ha (28 Km²) e perímetro de 25,5 Km, com localização entre as latitudes de 22° 18' e 22° 23' Sul, e longitudes 47° 48' e 47° 42' a Oeste de Greenwich - fuso 23 (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo

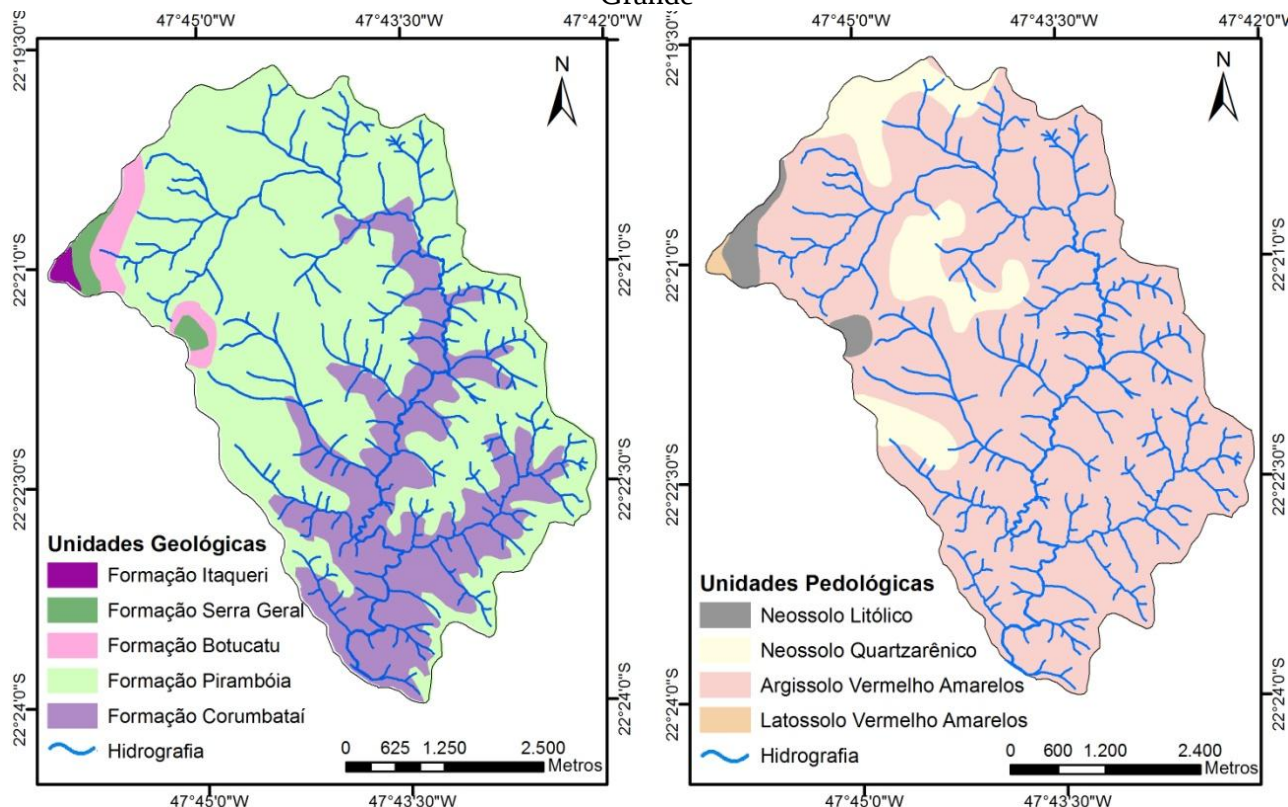
Considerando a distribuição das chuvas e as variações de temperatura ao longo do ano, a área da bacia é enquadrada no tipo climático Cwa, conforme a classificação zonal de Köppen, podendo ser associada ao clima subtropical, com inverno seco e verão chuvoso. No que tange à caracterização geológica, a sub-bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande é composta pelas Formações Itaqueri, Serra Geral, Botucatu, Pirambóia e Corumbataí, as quais correspondem em área a 0,37%, 0,83%, 2,55%, 68,55% e 27,71%, respectivamente. (CEAPLA, 2012). Quanto à classificação de solos, Prado et al. (1981) identificaram quatro unidades pedológicas no mapeamento semi-detalhado do Estado de São Paulo (1:100.000), sendo Argissolo Vermelho Amarelo, presente em 87,3% da área; Neossolo Litólico, com 2%; Latossolo Vermelho Amarelo com 0,2% e Neossolo Quartzarênico com 10, 3% de ocorrência na área de estudo (Figuras 2a e 2b).

No que tange ao quadro geomorfológico, a área de estudo está inserida na transição entre a província geomorfológica denominada Depressão Periférica e as áreas de relevo de Cuestas arenítico-basálticas, zona do Médio Tietê, correspondendo a um relevo muito diversificado, erodido e com estruturas resistentes em claros ressaltos topográficos. Apresenta relevo predominantemente formado por colinas baixas, de formas convexas a retilíneas, com topos aplainados e interflúvios com áreas de 1 a 4Km², separadas por vales jovens (IPT, 1981). Os desníveis da área não ultrapassam os 200 metros, com altitude variando entre 550m e 650m, sem planícies aluviais importantes. Devido à localização em uma zona de transição, apresenta áreas de alta declividade e drenagem densa e entalhada, exibindo algumas formas de relevo residual localizadas à margem ocidental do canal principal, como o Morro do Bizigueli e o Morro da Guarita, cujas feições são características das áreas de transição entre a Depressão Periférica e o relevo de cuestas arenítico-basálticas. Tais relevos residuais, na área, apresentam-se como pequenos maciços de *front* de cuesta, com altitudes alcançando a cota de 900 metros (ALMEIDA, 1964). Segundo o IPT (1981), estes relevos residuais estão associados às camadas sedimentares mais resistentes à erosão, onde afloram litologias vinculadas aos derrames basálticos, atingindo altitudes de quase 1000 m (IGC, 1979).

Quanto à rede de drenagem, a bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande apresenta padrão dendrítico, típico dos afluentes originados nos sedimentos argilosos do Grupo Passa Dois,

representados na área de estudo pela formação Corumbataí (PENTEADO, 1968). No que tange à classificação genética dos rios, proposta por Horton (1945), o córrego Monjolo Grande é tido como um rio subsequente, cujo fluxo de direção N-S apresenta sentido perpendicular à inclinação das camadas rochosas, as quais geralmente acompanham as zonas de fraqueza. Neste sentido, tais características permitem inferir que há pouca ocorrência de áreas de planície aluvial, visto que nos setores entalhados há menor deposição sedimentar (PEREIRA, 2010).

Figuras 2a e 2b – Unidades geológicas e pedológicas da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande



3 METODOLOGIA

3.1 Estruturação da base cartográfica

A obtenção da base cartográfica da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande foi realizada por meio da digitalização das cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), na escala de 1:10.000. Após a digitalização, as mesmas foram armazenadas com resolução de 300dpi em formato TIFF e georreferenciadas em ambiente SIG na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum Córrego Alegre, Fuso 23S, considerando o padrão de exatidão cartográfico A (BRASIL, 1984). Posteriormente, foi realizada a vetorização das feições cartográficas e gerado, em ambiente SIG, o modelo digital de elevação do terreno (MDET), com grade celular de 3 metros, a partir das curvas de nível, pontos cotados e hidrografia. Como método de interpolação, foi utilizada a função Topogrid do ArcGis 10 (Topo To Raster). A partir do MDET, foi gerada a carta de declividade (em %), a qual foi reclassificada em classes de relevo (0 a 3% - relevo plano; 3 a 8% - relevo suave ondulado; 8 a 20% - relevo ondulado; 20 a 45% - relevo forte ondulado e >45% - relevo montanhoso), conforme Santos et al. (2005) e IBGE (2007). Também a partir do MNT gerado e da base cartográfica vetorizada, foram identificadas as características de curvatura vertical e horizontal das vertentes, as quais foram utilizadas na identificação das unidades pedológicas e no refinamento do mapa de solos semidetalhado existente.

3.2 Elaboração do esboço fotopedológico

A partir dos conhecimentos dos processos geomorfológicos ocorrentes nas vertentes (DALRYMPLE et al., 1968; GERRARD, 1981) e de seus reflexos na paisagem e na formação dos solos, foi realizada a análise e identificação das rupturas de declive e delimitadas as unidades de mapeamentos, originando assim o esboço fotopedológico.

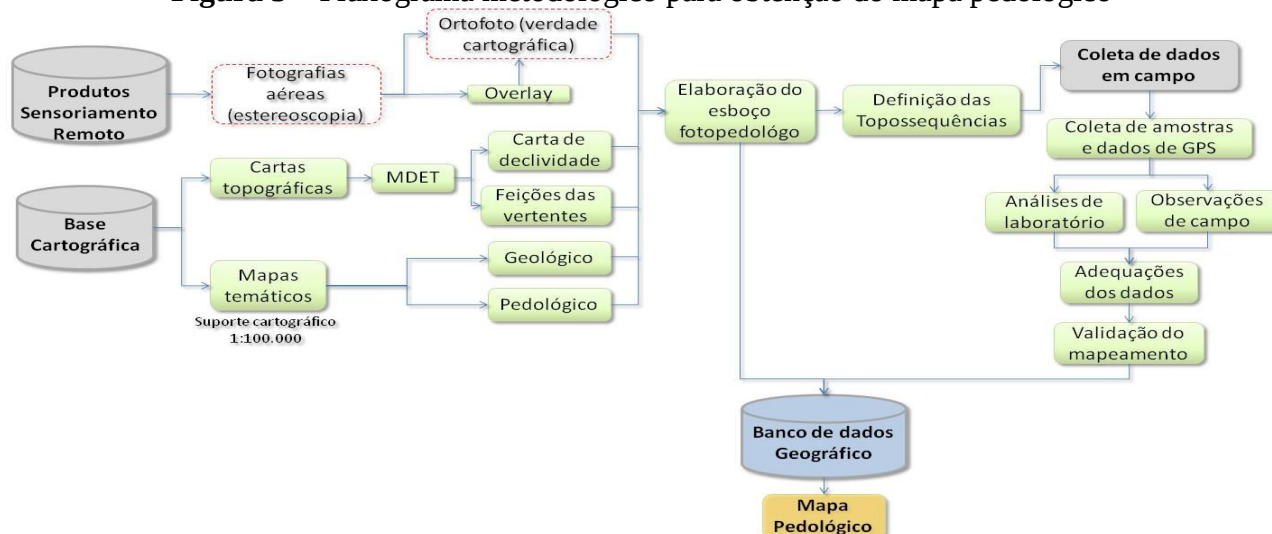
O esboço fotopedológico foi elaborado a partir da análise interpretativa de fotografias aéreas pancromáticas do aerolevantamento de 1972 (em papel fotográfico em escala aproximada de 1: 25.000, no formato 230mm x 230mm, recobrimento longitudinal e lateral de 60 e 30%). Tal fotointerpretação pedológica considerou os elementos de fotointerpretação e a interpretação preliminar das relações solo *versus* relevo, sendo delimitadas as unidades de mapeamento referentes às possíveis unidades pedológicas.

Os principais elementos utilizados na fotointerpretação pedológica foram: relevo, uso da terra, tonalidade, padrões e densidade de drenagem. Também foram utilizadas, como suporte na delimitação das unidades de mapeamento, as informações pedológicas da quadrícula São Carlos, 1:100.000 (PRADO et al., 1981), mapa geológico (CEAPLA, 2012), dados de variações topográficas obtidos pelas cartas topográficas da área na escala de 1:10.000, carta de declividade e de classes de declividade gerada a partir do MDET e características das curvaturas verticais e horizontais das vertentes. Todas estas informações foram analisadas conjuntamente, considerando as bases teóricas e conceituais pertinentes aos processos geomorfológicos ocorrentes nas vertentes e os seus reflexos na paisagem e na formação dos solos.

As rupturas no declive, apresentadas pelas mudanças nas formas das vertentes (características da curvatura vertical e horizontal), bem como nas classes de declividade, quando relacionadas com a pedologia, podem indicar mudanças nas unidades de solos. Também no uso da terra, as mudanças abruptas verificadas ao longo das vertentes são importantes indicativos de mudanças nas características físicas e químicas das unidades pedológicas, as quais podem indicar a ocorrência de diferentes tipos de solos. As diferentes tonalidades das manchas de solo exposto, verificadas ao longo das vertentes e em diferentes regiões da área de estudo, aliadas às características das unidades geológicas ocorrentes, também são consideradas importantes indicativos de mudanças nas características pedológicas. Por último, os padrões e densidade de drenagem constituem importantes indicativos das formas de relevo ocorrentes e de determinadas características físicas dos solos, como classes texturais, capacidade de infiltração e resistência. Tais características são importantes indicativos da ocorrência de determinados tipos de solos (HORTON, 1945).

Após a delimitação das unidades de mapeamento, e com base no mapa de solos disponível na escala de 1:100.000 (PRADO et al., 1981), foram definidas as possíveis unidades taxonômicas que ocorrem na área de estudo, e assim determinada a legenda inicial do esboço fotopedológico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999).

A metodologia para a obtenção do mapa de solos é apresentada no fluxograma da Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma metodológico para obtenção do mapa pedológico

3.3 Validação do mapeamento e confecção do mapa de solos

Após a finalização do esboço fotopedológico, conforme indicado anteriormente, foram traçados perfis do divisor de águas ao fundo de vale (conforme conceito de topossequência), buscando estabelecer transectos representativos da diversidade topográfica verificadas na área de estudo (declive, quebras de declive, formas de vertente e substrato geológico), a fim de determinar pontos de controle para aferição em campo das unidades mapeadas e ajustar os limites estabelecidos no material cartográfico preliminar. Além da verificação em campo dos pontos de controle estabelecidos sobre as topossequências, realizou-se também o levantamento de solos nos locais que apresentaram maior dificuldade para delimitação e determinação das unidades de mapeamento. Desta forma, o levantamento de campo tem possibilitado a classificação das unidades mapeadas, conforme a metodologia proposta pelo IBGE (2007).

Em campo, foram realizadas sondagens com trado e coletadas amostras de solo, seguindo os procedimentos da Embrapa (1999), nas profundidades de 0 a 120 cm. Para todos os pontos amostrados ao longo das topossequências estabelecidas, foram coletadas as coordenadas para posterior inserção junto ao Sistema de Informação Geográfica. Também foram coletadas demais informações da paisagem, como usos da terra, posições dos pontos na vertente e declividade, e realizadas descrições macromorfológicas. As amostras coletadas foram armazenadas e analisadas em laboratório, onde foram realizadas as análises granulométricas das amostras pelo método da Pipeta (EMBRAPA, 1997) e análises químicas – pH em CaCl_2 , matéria orgânica, Al, H+Al, K, Ca e Mg trocáveis, calculando-se soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica a pH 7 (CTC) e saturação por bases (V%) e por alumínio (m%) (EMBRAPA, 1997). Os solos foram classificados de acordo com o Manual Técnico de Pedologia (IBGE, 2007), em nível de Subgrupo (3º nível), mais grupamento textural.

Os pontos amostrados e as respectivas classificações dos solos, foram inseridos no Sistema de Informação Geográfica (ArcGis 10), sendo estes comparados com as unidades de mapeamento constantes no esboço fotopedológico. Para tanto, foram utilizadas matrizes de confusão e obtidos os índices de exatidão global, exatidão do produtor, exatidão do usuário, índice Kappa geral e Kappa condicional. A escolha dos índices acima mencionados deve-se ao fato de que cada um avalia a exatidão do mapeamento de maneira diferente. A exatidão global apresenta a proporção de observações classificadas corretamente em relação ao total de observações. Já a exatidão do produtor apresenta a proporção de uma unidade de mapeamento que foi classificada corretamente. Também a exatidão do usuário é tida como um índice que demonstra a probabilidade de um ponto no mapa representar a verdade terrestre. O índice Kappa geral apresenta a proporção de

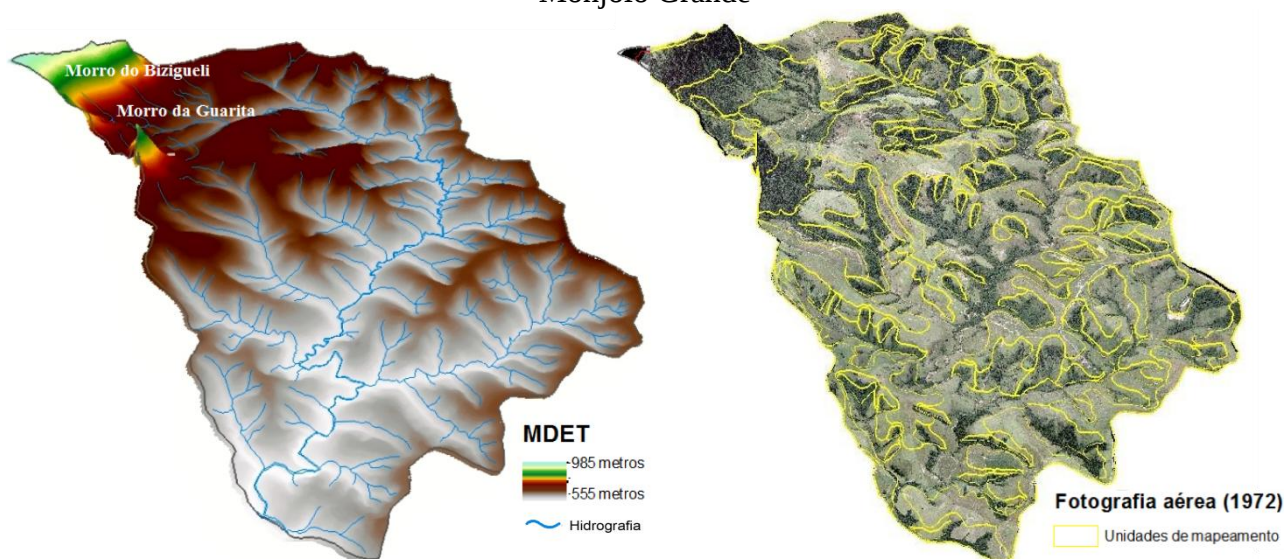
concordância observada que se aproxima da concordância perfeita (verdade terrestre). Por fim, o índice Kappa condicional é tido como a proporção de concordância para cada unidade de mapeamento. Os índices Kappa foram analisados segundo critério de Landis & Koch (1977). Após a validação das classes mapeadas, estas foram inseridas no ambiente de Sistema de Informação Geográfica (ArcGis 10).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Identificação das unidades de mapeamento e levantamento de solos em campo

A partir dos produtos do aerolevanteamento de 1972 das cartas topográficas, do MDET (Figura 4a) e dos mapas geológico e pedológico, acima mencionados (Figuras 2a e 2b), foi obtido o esboço fotopedológico da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande (Figura 4b), sendo delimitadas, preliminarmente, cinco unidades de solos: Latossolo Vermelho Amarelo, Argissolo Vermelho Amarelo, Cambissolo, Neossolo Quartzarênico e Neossolo Litólico (Figura 4b).

Figuras 4a e 4b – MDET e Unidades de mapeamento de solos da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande



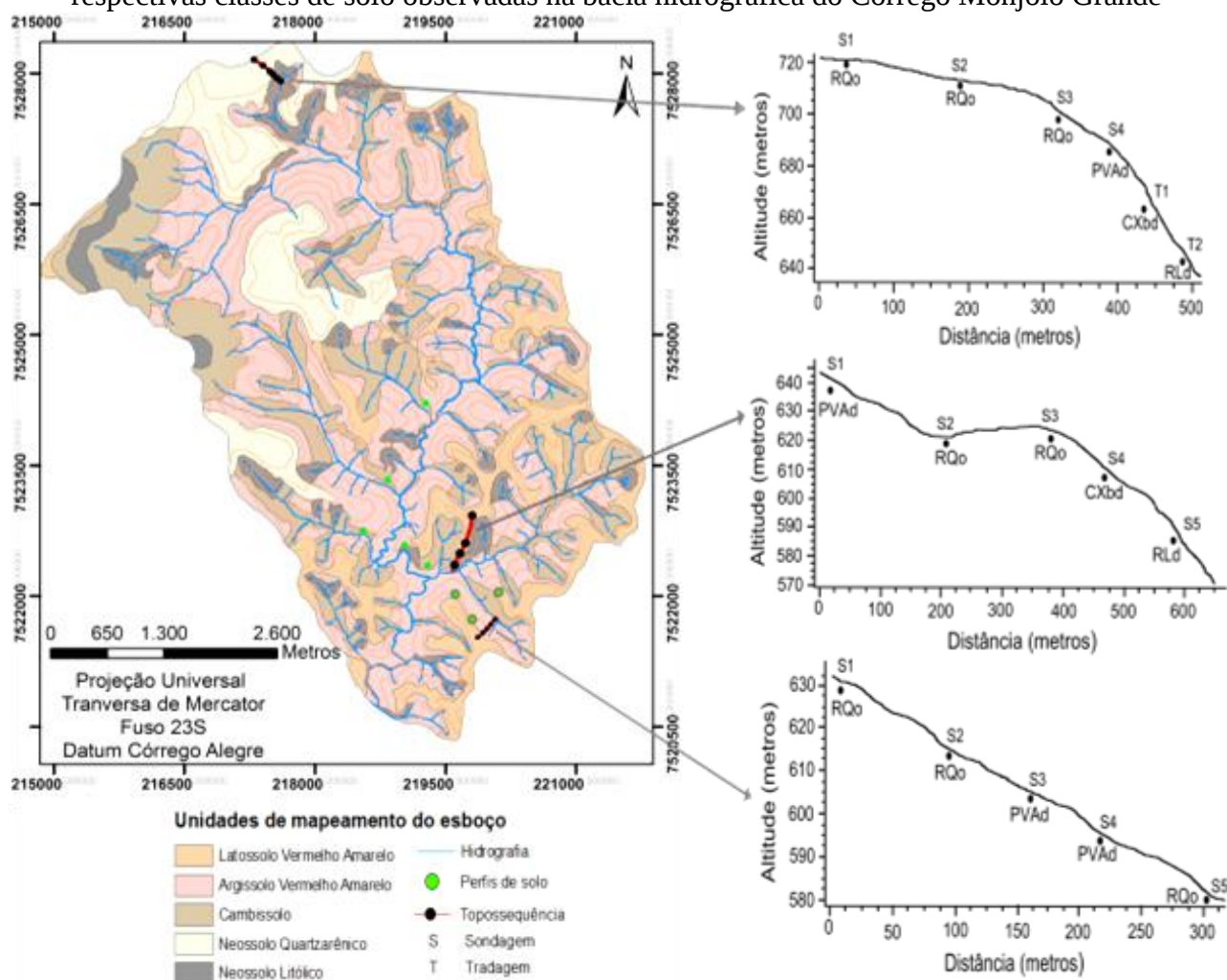
Das observações realizadas em campo, 38,8% pertenciam à classe dos Argissolos Vermelho Amarelos (Figuras 5 e 6). Tais unidades de mapeamento foram verificadas, predominantemente, nas áreas de média e baixa vertente, com formatos convexos e retilíneos, e orientação de fluxo divergente. Tais unidades de solo são ocorrentes em relevo de ondulado a forte ondulado, cujas classes de declividade variam de 15 a 45%. O grau de integração dos canais de drenagem é tido como sendo o caminhamento dos canais entre dois pontos (LUEDER, 1959). Neste sentido, devido ao alto grau de integração entre os canais, juntamente com características de alta declividade e drenagem densa e entalhada, a área de estudo apresenta ausência de solos hidromórficos ou aluviais, visto a inexistência de planícies aluviais e terraços de inundação. Neste sentido, também foi possível verificar a ocorrência das unidades de Argissolos Vermelho Amarelos nas áreas adjacentes ao canal do córrego Monjolo-Grande.

As unidades da classe dos Argissolos Vermelho Amarelos encontram-se associadas aos arenitos da Formação Pirambóia, (FACINCANE, 1995), a qual encontra-se em contato discordante ao longo de toda a Formação Corumbataí. Em menor expressão, também foram encontradas unidades de Argissolo Vermelho Amarelo, associadas aos siltitos e folhelhos da Formação Corumbataí, apresentando textura franco arenosa. Em todos os pontos amostrados, referentes a esta

unidade, foi identificada a existência de mudança textural abrupta entre os horizontes E e B, indicativos de horizonte B textural e baixa saturação por bases (valores variando de 7% a 44%), indicativos de distrofia. Tais solos também foram classificados com horizonte A moderado, apresentando estrutura granular (pequena agregação e fraco grau de desenvolvimento), indicativos de solos de textura predominantemente média arenosa.

Tendo em vista o alto grau de integração dos canais de drenagem e a elevada declividade dos mesmos, tem-se a ocorrência de solos pouco desenvolvidos, como os Cambissolos (com horizonte B incipiente) e Neossolos Litólicos. Tais unidades de solos estão localizadas nas adjacências dos canais de 1ª, 2ª e 3ª ordens, conforme classificação de Strahler (1952), juntamente com as vertentes côncavas/retilíneas, e de fluxo convergente. Nos afluentes de 3ª ordem, localizados na média e baixa bacia, os quais apresentam controle estrutural representado por ângulos de confluência do tipo “reto”, no sentido W-E e E-W, observou-se a presença de Neossolos Litólicos com substrato sedimentar exposto nas margens dos canais. Também foi verificada a ocorrência destas unidades de solos associadas às formações Botucatu e Serra Geral. Tais unidades estão localizadas nas porções Norte/Nordeste da bacia, juntamente com os maciços residuais de *front* da cuesta arenito-basáltica, cujas declividades são superiores a 45% (Figuras 4a, 5 e 6). Tendo em vista a associação predominante de tais unidades de solo aos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu, as unidades de solo apresentaram textura, franco argilo arenosa. Assim como os Argissolos Vermelhos Amarelos, tais unidades também apresentaram caráter distrófico e presença de horizonte A moderado.

Figura 5 – Localização dos transectos e dos perfis de solos juntamente com os perfis topográficos e respectivas classes de solo observadas na bacia hidrográfica do Córrego Monjolo Grande



Nas áreas dos topos de interflúvios, localizadas em relevo plano a ondulado (declividades variando de 0 a 20%) e com topos marcadamente convexos e de fluxo divergente, foi observada a ocorrência de solos profundos, de textura arenosa, ao longo de todos os horizontes, bem drenados, associados à classe dos Neossolos Quartzarênicos (Figuras, 5 e 6). Tais unidades são derivadas dos arenitos da Formação Pirambóia, e apresentaram, nos 20 cm superficiais, baixa CTC, baixa saturação por bases (com caráter distrófico) e, em alguns pontos de gradagem, também foi verificada toxidez por alumínio. Os teores de areia fina representam o dobro dos teores de areia grossa, indicando elevada suscetibilidade destes solos aos processos erosivos.

Por fim, a unidade de mapeamento referente aos Latossolos Vermelho Amarelos encontra-se associada aos arenitos de cimentação argilosa, crostas ferruginosas, folhelhos e conglomerados da Formação Itaqueri. Tal unidade é ocorrente no topo do morro residual tabular, denominado localmente como Bizigueli, o qual é delimitado pelas rochas básicas e arenitos silicificados das Formações Serra Geral e Botucatu, respectivamente. Devido aos materiais de origem, a mesma possui textura média e horizonte A proeminente (PRADO et al. 1981).

O esboço fotopedológico confeccionado a partir das bases conceituais dos processos geomorfológicos ocorrentes nas vertentes, juntamente com as técnicas de fotointerpretação pedológica, o suporte da base cartográfica (1:10.000) e mapas temáticos (geológico e pedológico) disponíveis em escala de 1:100.000, permitiram maior refinamento no delineamento das unidades de mapeamento e maior precisão das informações vinculadas. Da mesma maneira, obteve-se otimização do tempo de execução dos trabalhos de campo, visto que a validação foi realizada em pontos bem definidos geograficamente.

4.2 Validação do mapeamento e finalização do mapa de solos

Por meio da validação de campo, realizada com base em pontos de controle ao longo dos transectos, perfis de solos pré-definidos, e realização de análises físicas e químicas, foi possível verificar a ocorrência de cinco classes de solos (Tabela 1), sendo Argissolos Vermelho Amarelos distróficos, A moderado, textura franco arenosa, relevo ondulado/forte ondulado (PVAd); Latossolos Vermelho Amarelos, distróficos, A moderado, textura franco, relevo suave ondulado (LVAd); Neossolos Litólicos, distróficos, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo forte ondulado a montanhoso (RLd); Neossolos Quartzarênicos órticos, distróficos, A moderado, relevo suave ondulado/ondulado (RQo), e Cambissolos Háplicos, distróficos, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo forte ondulado (CXbd).

Após a caracterização das unidades amostradas e definição das classes de solos, foi realizada a correção de algumas unidades mapeadas no esboço fotopedológico. Os equívocos de mapeamento se restringiram às áreas com ocorrência de Neossolos Quartzarênicos, os quais foram classificados, inicialmente, como Latossolos Vermelho Amarelos (Figura 5). Tal erro se deve às similaridades de padrões de ocorrência verificados em ambas as classes, em decorrência da delimitação das unidades. Neste sentido, Demattê et al. (2011) demonstraram que tais unidades também apresentaram padrões similares quando do mapeamento por meio da fotopedologia, sendo a diferenciação realizada por meio da caracterização espectral da superfície do solo em imagens provenientes do sensor TM/Landsat7.

Como unidade de solo, os PVAd representam 43,9% da área de estudo (Figura 6 e tabela 1). A confiabilidade do mapeamento, quando da comparação com os dados de campo, apresentou índice Kappa condicional no valor de 0,658, exatidão do usuário e do produtor nos valores de 85,7% e 75%, respectivamente, demonstrando assim que o poder preditivo do método da fotopedologia em relação aos dados de campo é alto (Tabela 2).

Tabela 1 – Classes de solos e respectiva ocorrência na bacia hidrográfica do Córrego Monjolo Grande

Classes de solo	Área (Km ²)	Área (%)
Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, A moderado, textura franco arenosa, relevo ondulado /forte ondulado.	12,75	43,98
Latossolo Vermelho Amarelo, distrófico, A moderado, textura franco, relevo suave ondulado	0,09	0,32
Neossolo Litólico, distrófico, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo forte ondulado a montanhoso	2,44	8,42
Neossolo Quartzarênico órtico, distrófico, A moderado, relevo suave ondulado/ondulado	7,30	25,17
Cambissolo Háplico, distrófico, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo forte ondulado.	6,41	22,11
Total	29,00	100,00

Tabela 2 – Valores dos coeficientes de correlação por unidade de solo mapeada

Unidades de mapeamento	Exatidão do usuário (%)	Exatidão do produtor (%)	Kappa condicional
LVAd	100	25	0,341
PVAe	85,7	75	0,658
RQo	50	100	0,526
RLd	100	100	1,0
CXbd	100	100	1,0
Exatidão global (%)	0,72		
Kappa Geral	0,61		

LVAd: Latossolo Vermelho Amarelo, distrófico, A moderado, textura franco, relevo suave ondulado; PVAe: Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, A moderado, textura franco arenosa, relevo ondulado /forte ondulado; RQo: Neossolo Quartzarênico órtico, distrófico, A moderado, relevo suave ondulado/ondulado; RLd: Neossolo Litólico, distrófico, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo forte ondulado a montanhoso; CXbd: Cambissolo Háplico, distrófico, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo forte ondulado

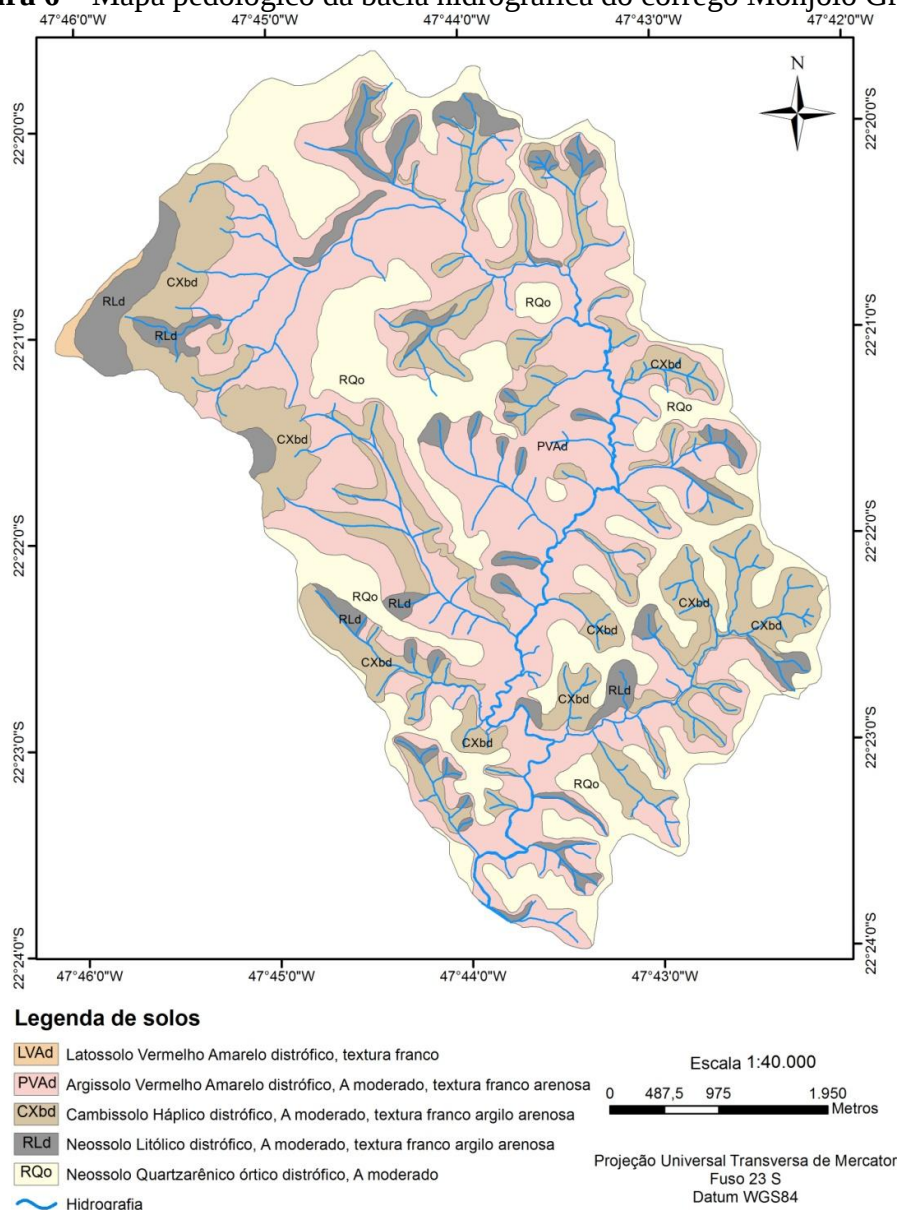
Já os RQo, ocorrentes em 25,1%, e os LVAd, ocorrentes em 0,32% (Figura 6 e tabela 1), apresentaram padrões similares de ocorrência nos pares estereoscópicos. Os LVAd apresentaram Kappa condicional de 0,341, exatidões do usuário e do produtor de 100% e 25% respectivamente, indicando concordância insatisfatória (LANDIS e KOCH, 1977). Por outro lado, os valores de Kappa condicional (0,52) e de exatidões do usuário e do produtor (50% e 100%, respectivamente), indicaram concordância satisfatória para as classes mapeadas como RQo. Neste sentido, devido às similaridades de ambas as unidades, quando do mapeamento fotopedológico (tonalidade, textura, classes de relevo e declividades, posições de ocorrência na vertente etc), os valores de concordância do mapeamento não foram satisfatórios para a unidade LVAd. Sendo assim, em casos de ocorrência de unidades de solos com características similares observadas em produtos de sensoriamento remoto e dados cartográficos, torna-se necessária a verificação em campo.

Demais unidades, como os Neossolos Litólicos e os Cambissolos, verificados em 8,4% e 22,1% da área de estudo, respectivamente, apresentaram valores de Kappa condicional (1.0) e exatidões do produtor e do usuário (100%) elevados. As informações de todos os pontos avaliados em campo foram condizentes com o esboço fotopedológico (Tabelas 1 e 2, e Figura 6).

Quando da correlação geral dos dados presentes no esboço fotopedológico com os dados de campo (Tabela 2), foi possível obter a exatidão global do mapeamento de 0,72% e índice Kappa geral de 0,61, sendo este último classificado como um dado de confiabilidade substancial, conforme Landis & Koch (1977). Tendo em vista tais dados, a aplicação da fotopedologia, aliada aos

conhecimentos morfopedológicos, demonstrou resultados satisfatórios quando da correlação com a verdade de campo.

Figura 6 – Mapa pedológico da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As informações obtidas a partir da fotointerpretação pedológica, bem como as informações geomorfométricas, obtidas a partir de produtos cartográficos e técnicas de geoprocessamento, aliadas aos conceitos pertinentes aos processos geomorfológicos ocorrentes nas vertentes e seus reflexos na paisagem e na formação dos solos, foram eficazes na caracterização e mapeamento digital dos solos. Complementar à fotointerpretação, o uso de material pedológico preexistente e o uso do Modelo Digital de Elevação do Terreno mostraram-se como ferramentas consistentes, de maior agilidade em relação ao levantamento tradicional de solos, e menos onerosas quanto aos recursos humanos utilizados.

A validação do mapeamento foi realizada através dos valores de exatidão global e Kappa geral, os quais, conjuntamente, demonstraram que o poder preditivo do método da fotopedologia em relação aos dados de campo é alto.

Quanto à aplicação da fotointerpretação pedológica, foi observada elevada similaridade entre as unidades de solos pertencentes às classes dos Neossolos Quartzarênicos e Latossolos Vermelho Amarelos. Tal similaridade, presente nas características de tonalidades, textura, classes de relevo e de declividades, ocasionou valores de concordância insatisfatórios entre o mapeamento e a verdade de campo. Neste sentido, como já recomendado em trabalhos anteriores, torna-se necessário o emprego de demais métodos de classificação, como a utilização das respostas espectrais da superfície do solo, uso de técnicas de geoprocessamento e verificação em campo.

O mapa de solos, como produto cartográfico síntese, pode ser utilizado como ferramenta norteadora aplicada a estudos sobre a capacidade produtiva de solos, adequabilidade do uso agrícola e planejamento territorial. Neste contexto, quando da utilização de determinadas ferramentas, como a fotointerpretação pedológica e a utilização de técnicas de geoprocessamento, tem-se a obtenção de mapeamentos coerentes e com erros padronizados, elevando a precisão das ações referentes ao planejamento territorial.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelas bolsas de doutorado concedidas e pelo apoio financeiro por meio do projeto "Avaliação da erosão hídrica, química e mecânica entre arenitos e argilitos: uma contribuição à evolução geomorfológica da bacia do Rio Corumbataí (SP)" - processo Fapesp nº 2012/19935-7; à Prefeitura Municipal de Ipeúna, pelo apoio, e à Coordenadoria de Assistência Técnica Integral - CATI, pelo suporte às atividades de campo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. de. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim Instituto Geográfico e Geológico**, 41, p.169-263, 1964.

BAZAGLIA FILHO, O.; RIZZO, R.; LEPSCH, I. F.; PRADO, H. do; GOMES, F. H.; MAZZA, J. A.; DEMATTÊ, J. A. M. Comparison between detailed and conventional soil maps of an area with complex geology. **Revista Brasileira de ciência do solo**, 37, p. 1136-1148, 2013.

BRASIL. **Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 8 jan. 2013.

CENTRO DE ANÁLISE E PLANEJAMENTO AMBIENTAL. CEAPLA. **Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/ceapla/atlas/>>. Acesso em: 25/06/2012.

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

DEMATTÊ, J. A. M. . Characterization and discrimination of soils by their reflected eletromagnetic energy. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (1977. Impressa), Brasília, v. 37, p. 1445-1458, 2002.

_____. Capítulo III - **O sensoriamento remoto – fotointerpretação e fotopedologia**. Material de aula: Sensoriamento remoto aplicado a Levantamento de solos. Pós Graduação em Ciências do Solo e Nutrição de Plantas. ESALQ/USP, 2009.

DEMATTE, J. A. M.; GENÚ, A. M.; FIORIO, P. R.; ORTIZ, J. L.; MAZZA, J. A.; LEONARDO, H. C. L. Comparação entre mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (1977. Impressa), Brasília, DF, v. 39, n.12, p. 1219-1229, 2004.

DEMATTE, J. A. M.; RIZZO, R.; BORTOLETTO, M. A. Método geotecnológico integrativo na caracterização de solos desenvolvidos de diferentes materiais de origem. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 638-648, 2011.

DEMATTE, J. A. M., VASQUES, G. M., CORREA, E. A., ARRUDA, G. P. Fotopedologia, espectroscopia e sistema de informação geográfica na caracterização de solos desenvolvidos do Grupo Barreiras no Amapá. **Bragantia**, v.71, p.438 - 446, 2012.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 212 p. 1997.

_____. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999.412 p.

FACINCANI, E. M. **Influência da estrutura tectônica no desenvolvimento das boçorocas da região de São Pedro, SP**. 1995. 124 f. Proposta de reabilitação e aspectos jurídicos-institucionais correlatos. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1995.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento remoto hiperespectral e geração de informações pedológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Online)**, v. 32, p. 27-31, 2007.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; COUTO, E. G.; ROBERTS, D. A. Relationships between the Mineralogical and Chemical Composition of Tropical Soils and Topography from Hyperspectral Remote Sensing Data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 63, p. 259-271, 2008.

GERRARD, A. J. **Soils and landforms**. 1.ed. London: George Allen & Unwin, 1981. 219p.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America** v. 56, p. 275-370, 1945.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2. Ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 323p. 2007.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO (São Paulo). Folha: **SF-23-Y-A-I-3-NE-D**. Escala 1:10.000, 1979.

_____. Folha: **SF-23-Y-A-I-3-SE-B**. Escala 1:10.000, 1979.

_____. Folha: **SF-23-Y-A-I-3-NE-F**. Escala 1:10.000, 1979.

_____. Folha: **SF-23-Y-A-I-3-NO-E**. Escala 1:10.000, 1979.

_____. Folha: **SF-23-Y-A-I-3-SE-S**. Escala 1:10.000, 1979.

_____. Folha: **SF-23-Y-A-I-3-SO-A**. Escala 1:10.000, 1979.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1981.

LANDIS, J. R. e KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977.

LUEDER, N. R. **Aerial Photographic Interpretation**. McGraw-Hill, New York, N.Y., 462 pp. 1959.

MCBRATNEY, A.; MENDONÇA SANTOS, M.L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma, Amsterdam**, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.

MacMILLAN, R. A. Experiences with Applied DSM: Protocol, Availability, Quality and Capacity Building. In.: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L. (Ed.), **Digital Soil Mapping with Limited Data**. New York: Springer, 2008, p.113-135.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**, São Paulo: Blucher, 2008. 363 p.

PENTEADO, M. M. Implicações tectônicas na Gênese das Cuestas da Bacia de Rio Claro. **Notícias Geomorfológicas**. Campinas, v.8, n15, p.19-41, 1968.

PEREIRA, L. H. **Caracterização da erosão hídrica laminar do solo em bacia hidrográfica com base na malha fundiária, por meio de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelagem**. 2010. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.

PRADO, H.; OLIVEIRA, J.B e ALMEIDA, C. L. A. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de São Carlos**. Escala 1:100.000. Campinas: Instituto Agrônomo, 1981.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C; ANJOS, L. H. C. **Manual de Descrição Coleta de Solo no Campo**. 5. ed., Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2005. 92 p.

SARMENTO, E. C. **Comparação entre quatro algoritmos de aprendizagem de máquina no mapeamento digital de solos no Vale dos Vinhedos, RS, Brasil**. 2010. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.

Data de submissão: 21.07.2014

Data de aceite: 10.12.2015

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.