



HELEN THAIS PEREIRA DE GÓES

**GEOMORFOMETRIA APLICADA AO
MAPEAMENTO DE SOLOS**

LAVRAS-MG

2016

HELEN THAIS PEREIRA DE GÓES

GEOMORFOMETRIA APLICADA AO MAPEAMENTO DE SOLOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Naturais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Nilton Curi
Orientador

LAVRAS-MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Góes, Helen Thais Pereira de.

Geomorfometria aplicada ao mapeamento de solos / Helen
Thais Pereira de Góes . – Lavras : UFLA, 2016.

61 p. : il.

Dissertação(mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientador: Nilton Curi.

Bibliografia.

1. Geomorphon. 2. Relevo. 3. Resolução. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.

HELEN THAIS PEREIRA DE GÓES

GEOMORFOMETRIA APLICADA AO MAPEAMENTO DE SOLOS

GEOMORPHOMETRY APPLIED TO SOIL MAPPING

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Naturais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de julho de 2016.

Profa. Dra. Michele Duarte de Menezes	UFLA
Prof. Dr. Fausto Weimar Acerbi Júnior	UFLA
Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello	UFLA
Prof. Dr. Alberto Vasconcellos Inda Junior	UFRGS

Prof. Dr. Nilton Curi
Orientador

LAVRAS-MG

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Ciência do Solo e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos e financiamento.

Ao professor Nilton Curi, pelo apoio, incentivos, pela orientação e aprendizado, os quais foram essenciais para a conclusão do mestrado.

Aos meus pais Lindolfo (*in memoriam*) e Michele, pela criação, pelas alegrias, pela simplicidade, honestidade, por todas as palavras sábias, pela confiança e princípios.

Aos queridos irmãos Matheus e Arthur, pela força que me transmitem e por todo amor envolvido.

Aos meus familiares, pela alegria, disposição, amor.

Aos queridos amigos, pela força, pelos incentivos, Carlos Henrique, Semiramys Moreira, Samuel Silva e Beatriz Gouveia.

Aos queridos Maíra Thoma, Zélio Resende, Matias Siueia, Rúbio Rodrigues, Adnane Beniach, Rodrigo Silva, pela amizade, convivência, incentivos ao longo dessa jornada.

À profa. Michele e ao Sérgio Henrique, pela grande ajuda à conclusão do mestrado e na execução deste trabalho.

À professora Margarete Marín Lordelo Volpato (EPAMIG) pela disponibilidade, apoio e atenção no estudo de geotecnologias e ao Daniel Andrade (GeoSolos), por todo auxílio em sistemas de informação geográfica, disponibilidade, atenção e amizade.

Aos queridos Leandro Campos, Luís Renato, Marcelo, Eliete, Elidiane, Giovanna, Jeane, Josimar, Anderson e Jéssica, pela parceria, convivência diária, apoio, auxílio e amizade.

Ao José Roberto (Pezão), querido por toda alegria, amizade, força e apoio.

A Dirce e Damiany, pelo grande auxílio durante a caminhada do curso.

A todos do Departamento de Ciência do Solo (colegas, professores, servidores), pelo convívio, relações de amizade e parceria.

Muito obrigada!

“..... Um pouco mais de conhecimento ilumina o nosso caminho”

Yoda

RESUMO

A relação solo-paisagem é fundamental na estratificação de pedoambientes, uma vez que o fator relevo pode explicar a ocorrência de solos em uma área, considerando os demais fatores de formação do solo constantes. O levantamento de solos utiliza tal correlação na etapa de campo e no delineamento das unidades de mapeamento. Com o advento dos sistemas de informação geográfica e do mapeamento digital de solos, a classificação digital do terreno pode ser promissora, garantindo maior agilidade nos serviços. Uma dessas técnicas é o Geomorphon, um algoritmo que produz mapa geomorfométrico da área de interesse de forma automática, identificando comumente dez feições do terreno que podem ocorrer na superfície terrestre. O mapeamento de solos é fundamental em estratégias de planos de manejo nas áreas de recursos naturais. Entretanto, ainda consiste em um serviço oneroso, em razão do extensivo trabalho de campo e amostragens. Neste trabalho, objetivou-se verificar a relação entre classes de solos e feições do relevo em duas sub-bacias hidrográficas, Ribeirão Lavrinha e Ribeirão Marcela, localizadas no sul do estado de Minas Gerais, utilizando o algoritmo Geomorphon testando nove raios de abrangência e três resoluções espaciais (pixels de 10, 20 e 30 m) em modelos digitais de elevação. Como referência das áreas de classes de solos foram utilizados mapas detalhados em escalas de 1:20.000 e 1:12.500 das sub-bacias, respectivamente. Também foi utilizado um conjunto de dados independente com informações de quantificação granulométrica em locais conhecidos, a fim de verificar a variação desse atributo entre as feições do terreno classificadas (unidades de geomorphon). O algoritmo testado demonstrou boa representatividade das feições do terreno das áreas estudadas e na relação com as classes de solos predominantes. Os melhores raios de abrangência encontrados foram o de 20 e 50 células para o Ribeirão Lavrinha e Ribeirão Marcela, respectivamente. A resolução mais adequada encontrada foi de 30m para ambas. Entre as unidades de geomorphons, a distribuição granulométrica apresentou pequena variabilidade.

Palavras-chave: Geomorphon. Relevo. Resolução.

ABSTRACT

Soil-landscape relation is fundamental for the stratification of pedoenvironments, given that the terrain factor can explain the occurrence of soils in an area, considering the remaining factors of soil formation. Soil survey uses such correlation during the field stage and in the design of mapping units. With the advent of geographic information and digital soil mapping systems, digital classification of the terrain is promising, guaranteeing more agility in its services. One of these techniques is Geomorphon, an algorithm that automatically produces a geomorphometric map of the area of interest, commonly identifying ten features of the terrain that may occur on the surface. Soil mapping is a fundamental strategy for management plans in natural resource areas. However, it is an onerous service due to extensive fieldwork and samplings. This work aimed at verifying the relation between soil classes and terrain features in two hydrographical sub-bacins, Ribeirão Lavrinha and Ribeirão Marcela, located in southern Minas Gerais, Brazil, by means of the Geomorphon algorithm, testing nine coverage radiuses and three spatial resolutions (10, 20 and 30 m pixels) in digital elevation models. As reference for the soil class areas, we used detailed maps of the sub-bacins in the scales of 1:20,000 and 1:12,500, respectively. We also used a set of independent data with granulometry quantity information in known locations, in order to verify the variation of this attribute among the classified terrain features (geomorphon units). The tested algorithm showed good representativeness of the terrain features in the studied areas and in the relation with the predominant soil classes. The best coverage radiuses were of 20 and 50 cells for Ribeirão Lavrinha and Ribeirão Marcela, respectively. The most adequate resolution was of 30 m for both areas. Among the geomorphon units, granulometry distribution presented little variation.

Keywords: Geomorphon. Terrain. Resolution.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	11
1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Importância do levantamento de solos e mapeamento no Brasil	13
2.2	Ferramentas digitais no auxílio a mapeamento de solos	14
2.3	Variabilidade e predição espacial em classes e atributos do solo	15
2.4	Técnicas geomorfométricas digitais no auxílio a levantamentos de solos	17
2.4.1	Geomorphons	18
2.5	Resolução espacial e representatividade	21
2.6	Sub-bacias Ribeirão Lavrinha e Marcela-MG	22
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
	REFERÊNCIAS	27
	SEGUNDA PARTE - ARTIGO	37
	ARTIGO 1 - GEOMORPHOMETRIC TOOL ASSOCIATED TO SOIL TYPES AND PROPERTIES SPATIAL VARIABILITY AT WATERSHEDS IN TROPICAL CONDITIONS	37

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O mapeamento de solos tem por objetivo delimitar a ocorrência de classes de solos em uma área e discrimina, por meio de levantamento em campo e análises de laboratório, as características peculiares de cada classe. Tais informações são de fundamental importância na elaboração de planos de manejo em diferentes segmentos que envolvam o uso e ocupação do solo como projetos de colonização, obras de engenharia, aptidão agrícola das terras e outros (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2015).

A base de dados de mapas de solos no Brasil está em sua maioria sob escalas a níveis generalizados e exploratórios, não sendo indicados para planejamento de manejo em áreas de recursos naturais como sub-bacias hidrográficas (LIMA et al., 2013; SANTOS et al., 1995). O principal motivo se deve ao alto custo do serviço, uma vez que demanda equipe qualificada, rede de amostragens e análises laboratoriais (IWASHITA et al., 2012).

A etapa de levantamento em campo estabelece uma correlação entre os solos e a paisagem na segmentação das classes de solos, por considerar outras variáveis ambientais como clima, tempo, organismos constantes (KAMPF; CURTI, 2012). Segundo Arnold (2006), as principais fontes de variação dos solos em uma paisagem decorrem do relevo e da litologia em condições locais.

Com o advento dos Sistemas de Informação Geográfica e a facilidade do uso de softwares, o surgimento dos modelos digitais de elevação e técnicas quantitativas como algoritmos lógicos, permitindo informações adicionais da área de estudo, tem gerado interesse aos cientistas do solo e no mapeamento de solos na busca de informações precisas e pontuais (VAYSSE; LAGACHERIE, 2015).

Uma dessas ferramentas é o denominado Geomorphon, um algoritmo gerado para classificar as feições da superfície de forma digital e automática. A superfície terrestre, conforme essa ferramenta, é diferenciada comumente em dez feições do relevo (unidades de geomorphon) (JAZIEWICKS; STEPINSKI, 2013).

Considerando a importância da relação solo-paisagem nos levantamentos, um mapa geomorfométrico digital de classificação do relevo e suas formas garantindo representatividade do terreno de interesse, pode proporcionar agilidade nos serviços como estabelecimento de amostragens, refinamento de mapas e redução de custos (SARMENTO et al., 2014).

Neste trabalho, objetivou-se explorar a ferramenta Geomorphon na classificação de feições geomorfométricas de duas sub-bacias hidrográficas, a fim de verificar a relação de tais feições com a ocorrência de classes de solos e a resolução de modelo digital de elevação, mais adequados a cada sub-bacia hidrográfica, para melhor representar o mapa geomorfométrico gerado. As áreas localizam-se nos municípios de Bocaina de Minas e Nazareno (estado de Minas Gerais), sendo denominadas sub-bacias do Ribeirão Lavrinha e do Ribeirão Marcela, respectivamente, afluentes da Bacia do Rio Grande.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância do levantamento de solos e mapeamento no Brasil

O levantamento de solos tem por objetivo efetuar o inventário dos solos existentes em determinada área, a partir de suas características morfogênicas e classificatórias, considerando a relação solo-paisagem e os fatores de formação (Hudson, 1992), de forma a verificar o padrão de ocorrência da distribuição dos solos localmente (REZENDE et al., 2014). O produto final consiste de um relatório que compreende um texto descritivo e um mapa de solos, contendo as unidades de mapeamento, com suas respectivas classes, de acordo com a escala de abrangência e objetivos (IBGE, 2015).

Tais informações são de fundamental importância na elaboração de planos de manejo em diferentes segmentos que envolvam o uso e ocupação do solo como projetos de colonização, obras de engenharia, aptidão agrícola das terras e outros (SANTOS et al., 1995).

O território brasileiro atualmente compreende uma base de dados de mapas em escalas sob níveis generalizados e exploratórios (1:1.000.000 a 1:600.000) e apenas 10 dos 26 estados encontram-se sob escalas de 1:250.000. Os mapas com escalas detalhadas (1:25.000) correspondem a 5% do total de mapas de solos (LIMA et al., 2013; MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2007).

Segundo o manual de procedimentos normativos pedológicos (SANTOS et al., 1995), mapas em escalas pequenas não são adequados para o planejamento no âmbito de propriedades rurais, projetos de assentamentos e áreas de bacias e sub-bacias hidrográficas, sendo recomendadas escalas de 1:50.000 ou maiores.

O levantamento de solos é uma atividade bastante onerosa, em termos de tempo e custos, decorrente da qualificação do pessoal que o realiza e dos frequentes deslocamentos de equipe. Lagacherie e McBratney (2007) relatam

que a principal razão de poucos mapas em escalas detalhadas na maioria dos países se deve ao alto custo dos levantamentos que envolve extensivo trabalho de campo e laboratório. Iwashita et al. (2012) também destacam que, durante os levantamentos de solos, tais restrições financeiras e de tempo disponíveis limitam a amostragem ao longo de toda a área.

2.2 Ferramentas digitais no auxílio a mapeamento de solos

O advento da tecnologia através de avanços nas ciências computacionais, como a capacidade de armazenagem de dados e processamentos, o surgimento de ferramentas como o GPS, as imagens de satélites, por meio dos sensores entre outros, proporcionaram benefícios às etapas de interpretação e delimitação de unidades de mapeamento dos solos (CARVALHO et al., 2015; SILVA et al., 2016).

A espacialização de dados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), a partir da década de 1980, tem possibilitado a vantagem de armazenar informações em um banco de dados, assim como de manipulá-los, não sendo o mapa um produto único e estático possibilitando a obtenção de informações adicionais da área de estudo (MCBRATNEY; SANTOS; MINASNY, 2003), por meio de técnicas quantitativas e algoritmos lógicos, o que tem atraído interesse nos cientistas do solo na busca de obter informações mais precisas no mapeamento de solos (BUI, 2007; MINASNY et al., 2015; VAYSSE; LAGACHERIE, 2015).

A investigação dessas técnicas tem sido realizada em diversos países (ASHTEKAR et al., 2014; BRUNGARD et al., 2015; HENGL et al., 2015; MENEZES et al., 2014; PINTO et al., 2016; SILVA et al., 2015; VAGEN et al., 2016) por meio de modelagens utilizando técnicas de predição no mapeamento digital de solos.

2.3 Variabilidade e predição espacial em classes e atributos do solo

O solo considerado como um sistema dinâmico e aberto em suas extensões, é variável ao longo da paisagem. Sabe-se que há variabilidade a curtas distâncias e no mapeamento de solos pode estar representada dentro das unidades de mapeamento (em forma de associações e complexos) ou em resoluções de mapeamentos digitais no mesmo pixel (LIBOHOVA et al., 2016). Para atributos do solo, como conteúdo de argila e areia, há evidências de que essa variabilidade à curta distância está longe de ser insignificante (LAGACHERIE; MCBRATNEY, 2007).

A variabilidade dos solos está relacionada aos processos pedogenéticos decorrentes da interação dos fatores de formação do solo estabelecidos por estudos de Dokuchaev (1878) e explicitado na equação de Jenny (1941): $S = f(C, O, P, R, T)$, sendo C, aspectos climáticos; O, organismos; P, material de origem; R, relevo; T, tempo. Tais fontes de variação são assumidas na predição espacial de classes e atributos do solo, explicitado por McBratney, Santos e Minasny (2003) que estabeleceram o modelo denominado SCORPAN no mapeamento digital de solos, por meio da equação: $S = f(s, c, o, r, p, a, n)$, sendo S, classe ou atributo do solo a ser predito; s, informações em campo ou laboratório do predito; a, a idade ou tempo e n, localização em coordenadas geográficas de S.

A necessidade de compreensão da distribuição espacial dos solos e da sua dinâmica interna requer a integração dos estudos pedológicos com outros ramos do conhecimento, considerando as várias escalas de abordagem da pedopaisagem. Nesse sentido, destacam-se a geologia, em particular a estratigrafia (principalmente dos depósitos superficiais mais recentes), a geomorfologia (quanto à morfogênese e morfografia) e a hidrologia (referente aos fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais) (VIDAL-TORRADO; LEPSCH; CASTRO, 2005).

Em condições locais e considerando os fatores de formação como clima, organismos e o tempo constante, a litologia e o relevo podem explicar a distribuição dos solos na paisagem (ARNOLD, 2006; GRAY; BISHOP; WILFORD, 2014).

Na predição espacial de classes e atributos de solo, a covariável ambiental ou fator de formação relevo é fundamental aos levantamentos de solos em campo e na segmentação das unidades de mapeamento, considerando os outros fatores constantes (MOORE et al., 1993; RESENDE et al., 2014; ZHU et al., 2001).

O relevo e suas formas foram considerados como apoio ao mapeamento de solos a partir do conceito catena estabelecido por Milne (1935), que destacou a influência dos movimentos de materiais (horizontais e verticais) ao longo da topografia, levando a pedogênese dos solos podendo estar parcialmente repetida na paisagem (KAMPF; CURI, 2012; VIDAL-TORRADO; LEPSCH; CASTRO, 2005).

Outros modelos geomorfológicos da paisagem também contribuíram para estudos da variabilidade de solos e sua distribuição espacial, como o de Ruhe (1956) que estabeleceu a relação entre superfícies e feições geomórficas a partir de estudos de solos com diferentes estratos em determinadas superfícies e propondo um modelo de evolução da paisagem a partir do retrocesso das vertentes levantando a ideia de perdas desiguais de material nos diferentes segmentos das encostas, onde a parte mais elevada das superfícies mais recentes, perderia mais material que a mais próxima do canal de drenagem, admitindo a permanência de remanescentes de superfícies antigas. Assim, determinados solos estariam sempre associados a formas de relevo específicas e os seus padrões de distribuição espacial seriam repetitivos e predizíveis.

Darlymple, Blong e Conacher (1968) compartimentalizaram a vertente em nove segmentos (topo, terço superior, terço inferior, terço médio, ombro,

meia encosta, escarpa, sopé de transporte, sopé de deposição) com base na intensidade dos processos pedogenéticos e de erosão que possam ocorrer em cada um deles.

O modelo desenvolvido por Troeh (1965), baseado no perfil (inclinação) de curvatura (curva) do terreno, sugere nove pedoformas que variam em combinações de retilinearidade, concavidade e convexidade, enfatizando a interação entre grau de intemperismo, evolução e dinâmica de fluxos hídricos na variabilidade dos solos. No mesmo sentido, Hugget (1975) estudando solos de Hertfordshire, Inglaterra, enfatizou a importância dos fluxos hídricos e redes de drenagem na gênese e variabilidade dos solos em função das formas e feições do terreno.

Essa correlação solo-paisagem foi documentada por muitos pesquisadores, os quais desenvolveram modelos considerando o relevo e suas formas como fator preditivo (CARMO; CURI; RESENDE, 1984; COELHO; LEPSCH; MENK, 1994; CONACHER; DALRYMPLE, 1977; CURI et al., 1990; VALADARES; LEPSCH; KÜPPER, 1971)

2.4 Técnicas geomorfométricas digitais no auxílio a levantamentos de solos

Considerando o grau de importância da relação solo-paisagem no levantamento de solos, o interesse na classificação de formas da superfície do terreno de forma digital consiste no potencial para sintetizar a predominância de certos processos pedogenéticos, auxiliando o entendimento da pedogênese e distribuição dos solos no terreno, sendo útil tanto para o desenvolvimento de modelos preditivos solo-paisagem quanto para guiar amostragens em campo a fim de aperfeiçoar a representatividade, evitar coletas desnecessárias e garantir maior agilidade nos serviços (SARMENTO et al., 2014).

Nesse sentido, modelagens em mapeamento digital de solos têm utilizado variáveis morfométricas na predição de classes e atributos do solo

derivadas de um modelo digital de elevação, sendo as mais usuais a declividade, o perfil e plano de curvatura (COELHO; GIASSON, 2010; VALERIANO, 2008; VAYSSE; LAGACHERIE, 2015).

Entretanto, alguns autores relatam desvantagens neste método na classificação das formas da superfície quanto ao cálculo dos pesos de tais variáveis, sendo baseados apenas na geometria e não na feição do terreno e quanto aos resultados gerados na classificação de formas podendo ser diferentes a depender dos pesos atribuídos e da técnica classificatória utilizada (CAMIZ; POSCOLIERI, 2015; GEORGIEVSKI, 2011).

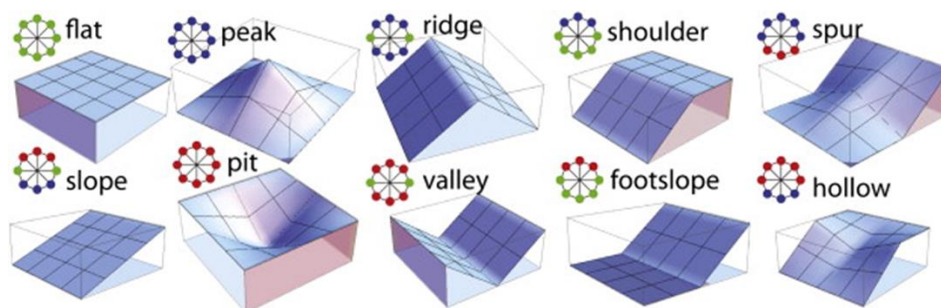
Outro método de classificação digital das formas do terreno denomina-se Geomorphon, criando recentemente por Jaziewickcs e Stepinski (2013). Esse método segmenta o terreno em dez feições de ocorrência da superfície terrestre.

Métodos que organizem a superfície do terreno de acordo com modelos geomorfológicos e relações entre a forma e a paisagem mostram potencial na predição de atributos e classes do solo (MOORE et al., 1993).

2.4.1 Geomorphons

Consiste em método de classificação automática, desenvolvido para reconhecer variações de padrões topográficos na paisagem, a partir de um modelo digital de elevação. O algoritmo fundamenta-se em princípios de padrão local ternário, princípio denominado “*line-of-sight*” e raios de abrangência, classificando o terreno em dez feições gemórficas de ocorrência da superfície terrestre, sendo estas apresentadas na figura abaixo (JAZIEWICKS; STEPINSKI, 2013).

Figura 1 - Dez unidades de geomorphons de ocorrência da superfície terrestre, efetuado pelo algoritmo Gemorphon.



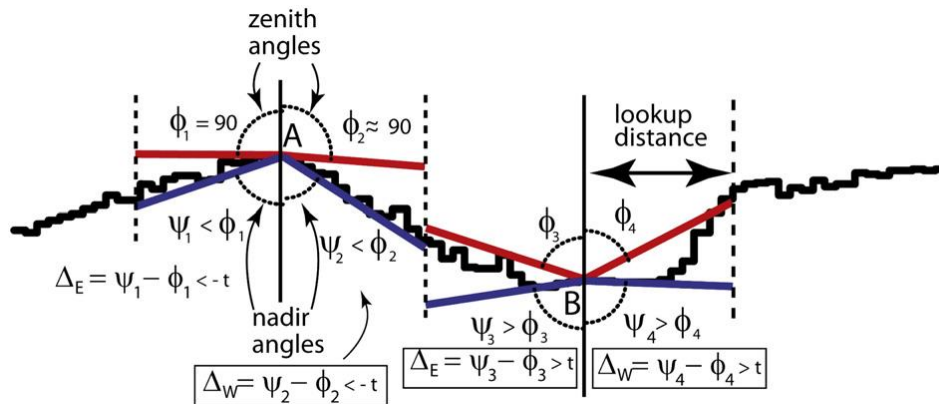
Fonte: Jaziewicks e Stepinski (2013).

A classificação de tais feições é realizada pixel a pixel, por meio de um modelo digital de elevação inserido. O cálculo estabelece oito pontos (pixels), atribuindo pesos aos mesmos ao redor do ponto central, sendo tais pesos 0, 1, -1, que correspondem respectivamente a: igual, mais alto, mais baixo. Na Figura 1, acima, os pontos em verde significam que os pesos desses pixels são semelhantes ao ponto central; os pontos em cor azul indicam que tais pesos são mais baixos que o ponto central e os pontos em vermelho são pixels que estão mais altos que o ponto central. Com essa combinação de oito pontos e atribuição de pesos é realizada a classificação. O alcance desses pontos selecionados para formar uma unidade de geomorphon é estabelecido pelo raio de abrangência que o usuário pode determinar que variam de 0 a 50.

A atribuição de pesos não é feita baseada somente no ponto de elevação, mas para cada ponto são considerados o cálculo dos ângulos Zenith e Nadir, adequando-se a topográfica local, como apresenta a Figura 2. Quando a diferença entre o Nadir e o Zenith (Δ) forem menor que a planicidade (t) do ponto central, os pixels tendem a ser mais baixos que o ponto central, atribuindo peso -1 (para o cálculo do ponto A); quando a diferença entre o Nadir e o Zenith forem maior que a planicidade (t) do ponto central, os pixels tendem a serem

mais altos (para o cálculo do ponto B) e assim a classificação é feita pixel a pixel.

Figura 2 - Ângulos Zenith e Nadir na classificação das unidades de geomorphons.



Fonte: Jaziewik e Stepinski (2013).

Libohova et al. (2016) estudando a relação entre feições topográficas e atributos de subsuperfície dos solos no norte de Indiana (EUA), avaliaram fatores como estrutura laminar autóctone, sedimento glacial denso e espessura do horizonte A, e os relacionou com processos pedogenéticos e fluxos da água, encontrando resultados satisfatórios com pixels de 10 e 20 m e diferentes raios de abrangência na representatividade das feições do terreno. Os mesmos autores afirmam que o uso do Geomorphon pode auxiliar na predição de classes e atributos dos solos e no entendimento de processos pedogenéticos.

Ashtekar et al. (2014) elaboraram um mapa digital de classes e atributos do solo (pH, carbono orgânico e capacidade de troca catiônica) e verificaram que o mapa de Geomorphons com pixels de 90m capturou a variabilidade da área de estudo nos Llanos Orientales, Colômbia, encontrando unidades de geomorphons em uma mesma unidade de mapeamento.

Analisando frações de carbono orgânico em horizontes subsuperficiais escuros em uma área cultivada com eucalipto no Rio Grande do Sul, Toma et al. (2015) encontraram relação entre as unidades de Geomorphons e gradientes de declive com diferentes concentrações de carbono na camada de 0-5 cm, identificando as áreas de maior acúmulo ou perda.

Pinto et al. (2016), utilizando um modelo digital de elevação com pixels de 10m, encontraram diferenças na proporção de áreas de unidades geomórficas em sub-bacias hidrográficas em Minas Gerais, utilizando dois métodos de classificação: Geomorphons e método classificatório automático de Iwahashi e Pike (2007). Também verificaram que ao realizar predição espacial de condutividade hidráulica saturada do solo, o uso do Geomorphon combinado a outros atributos de terreno foi o melhor método dentre os testados, representando melhor a transmissividade de água no solo.

Desse modo, mapas geomorfométricos podem ser úteis no auxílio ao levantamento de solos, possibilitando correlação com a ocorrência de solos na paisagem em condições locais, se as feições ou unidades geomórficas forem classificadas de forma adequada. Nesse sentido, a resolução do pixel é fundamental na representatividade das áreas.

2.5 Resolução espacial e representatividade

Uma célula ou pixel, é a entidade espacial fundamental em um modelo raster em sistemas de informação geográfica (DEMERS, 2001; GATRELL, 1991) e representa a resolução de uma imagem ou de um modelo digital de elevação. A resolução espacial é importante na caracterização de detalhes do objeto de estudo, pois deve representar o fenômeno real observado (BURROUGH, 1986).

Hengl (2006) relata que quanto menor o pixel a tendência é que o modelo digital de elevação seja mais acurado, entretanto ressalta que a

topografia da paisagem influencia na acurácia, em decorrência da superfície de elevação, podendo não aparecer pontos muito altos como picos ou muito baixos como vales encaixados ou linhas de drenagem, dependendo da resolução utilizada (EVANS, 1980; FLORINSKI, 1998). Portanto, a resolução adequada é aquela que otimiza o reflexo da variabilidade de elevação da superfície e seja capaz de representar feições geomórficas (BORKOWSKI; MEIER, 1994; KIENZLE, 2004).

Florinski e Kuryakova (2000), estudando a relação da variação topográfica na área de platô do leste Europeu (Rússia) e o tamanho adequado de pixel, concluiu que os pixels mais indicados á derivação de atributos de terreno e cálculos de algoritmos sob uma matriz, estão no alcance de 20 a 40 m². No mesmo sentido, Roecker e Thompson (2010) relatam que finas resoluções classificadas de 5 a 10m não produzem assertivas informações do terreno, havendo excesso de detalhes, conduzindo a alta variabilidade de informações em predição espacial, causando confusão nos mapas.

Cavazzi et al. (2013) ressaltam que não há um padrão adequado do tamanho de pixels, mas que estes devem ser testados para cada área, conforme os objetivos pretendidos na extração de informações de uma imagem ou modelo digital de elevação.

2.6 Sub-bacias Ribeirão Lavrinha e Marcela-MG

As sub-bacias hidrográficas do Ribeirão Lavrinha e do Ribeirão Marcela situam-se no sul do estado de Minas Gerais, nascentes da bacia do Alto Rio Grande que, por sua vez, fornecem energia e água para a população e campos de agricultura. Embora representativas da bacia do Alto Rio Grande, estão localizadas em condições fisiográficas diferentes: Serra da Mantiqueira (sub-bacia do Ribeirão Lavrinha) e Campos das Vertentes (sub-bacia do Ribeirão Marcela).

Na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, os solos são predominantemente Cambissolos correspondendo a 92% da área, rasos nas partes altas e com profundidades atingindo de 0,70 a 1,20 m, incluindo o horizonte C (MENEZES et al., 2009; MENEZES et al., 2014), resultado da alteração do gnaiss do Neoproterozóico. O relevo é íngreme com vertentes côncavo-convexas e estreitas planícies fluviais (CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS, 1983; RADAMBRASIL, 1983). Solos hidromórficos ocupam posições mais baixas da paisagem, onde o lençol freático é próximo à superfície na maior parte do ano. A vegetação nativa é de floresta tropical de altitude, sendo a distribuição da cobertura vegetal distribuída em mata nativa, ocupando 62% da área em declividades íngremes; pastagem degradada, ocupando 33% da área, e plantações de eucalipto em 5% da área (PINTO, 2015). Essa sub-bacia hidrográfica abrange 676 ha, com elevação entre 1137 a 1733m de altitude. De acordo com a classificação de Köppen, o clima é Cwb (temperado húmido com inverno seco e verão temperado) e baixa pluviosidade no verão.

Na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, os solos de ocorrência predominante são Latossolos e Cambissolos (GIAROLA et al., 1997), que ocupam as posições mais dissecadas (MOTTA et al., 2001) e porções mais lineares da pedoforma convexa na paisagem. Latossolos Vermelhos (2,5 YR ou mais vermelhos) geralmente ocupam posições mais planas e posições de topo convexo. Os Latossolos Amarelos (7,5 YR ou mais amarelos) e Vermelho-Amarelos (menos vermelhos que 2,5YR e mais vermelhos que 7,5 YR) ocupam posições que variam do topo ao sopé da encosta. Tais colorações mostram uma condição hidrológica pretérita de influência, onde o tipo de orientação das camadas do material de origem condicionados por um regime diferenciado de umidade em dois sistemas, exerceram influência na pedogênese do Latossolo Vermelho, Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo. A orientação horizontalizada das camadas condiciona a gênese de Latossolos Amarelos e

Latossolos Vermelho-Amarelos, tendo alta proporção de goethita/hematita e, conseqüentemente, cores amareladas, como resultado de condições de umidade diferentes dos solos mais vermelhos (CHAGAS et al., 1997). Os solos hidromórficos ocupam as superfícies jovens em posições mais baixas da paisagem. O material de origem é micaxisto e filito do Proterozóico e o padrão de dissecação é homogêneo (CETEC, 1983; RADAMBRASIL, 1983). Esta sub-bacia compreende uma área de 476 hectares, com altitudes variando entre 957 a 1057 metros e clima conforme classificação de Köppen correspondendo a Cwa (clima temperado húmido com inverno seco e verão quente). A temperatura varia em torno de 19° C e a precipitação média anual é de 1.300 mm. A vegetação nativa corresponde ao Cerrado. O relevo de forma geral é suave com intenso desenvolvimento do solo.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto e considerando a importância da relação solo-paisagem nos levantamentos de solos, uma técnica digital que classifique as feições do terreno como o algoritmo Geomorphon pode assegurar maior agilidade nos serviços em condições tropicais. Busca-se também encontrar resoluções espaciais adequadas que capturem a variabilidade do terreno em condições de relevo diferenciados na predição de classes e atributos de solos.

REFERÊNCIAS

- ARNOLD, R. W. Soil survey and soil classification. In: GRUNWALD, S. **Environmental soil- landscape modeling-geographic information technologies and pedometrics**. New York: Taylor & Francis, 2006. Cap. 2, p. 37-60.
- ARROUAYS, D. et al. **Global soil map: basis of the global spatial soil information system**. New York: CRC Press, 2014. 494 p.
- ASHTEKAR, J. M. et al. Digital mapping of soil properties and associated uncertainties in the Llanos Orientales, South America. In: ARROUAYS, D. et al. (Ed.). **Global soil map: basis of the global spatial soil information system**. London: CRC Press, 2014. p. 367-372.
- BAZAGLIA FILHO, O. et al. Comparison between detailed digital and conventional soil maps of area with complex geology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1136-1148, set./out. 2013.
- BENITES, V. M. et al. Soils associated with rock outcrops in the Brazilian mountain range Mantiqueira and Espinhaço. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 569-577, out./dez. 2007.
- BERTONE, J.; LOMBARDI, F. N. **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355 p.
- BORKOWSKI, A.; MEIER, S. A procedure for estimating the grid cell size of digital terrain models derived from topographic maps. **Geo Informations Systems**, Duluth, v. 7, n. 1, p. 2-5, Jan. 1994.
- BRUNGARD, C. W. et al. Machine learning for predicting soil classes in three semi-arid landscapes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 239/240, p. 68-83, Feb. 2015.
- BUI, E. N. A review of digital soil mapping in Australia. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; VOLTZ, M. (Ed.). **Digital soil mapping developments in soil science: volume 31**. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 25-37.
- BUI, E. N. Soil survey as a knowledge system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 1/2, p. 17-26, May 2004.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for L and resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986. 193 p.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 617-630, maio/jun. 2010.

CAMIZ, S.; POSCOLIERI, M. Geomorpho: a methodology for the classification of terrain units. In: JASIEWICZ, J. et al. **Geomorphometry for geosciences**. Polonia: Instituto de Geoecologia e Geoinformação, Sociedade Internacional de Geomorfometria, 2015. p. 149-152.

CAMPOS, M. C. C. et al. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 519-529, maio/jun. 2007.

CARMO, D. N.; CURI, N.; RESENDE, M. Caracterização e gênese de Latossolos da região do Alto Paranaíba (MG)[Minas Gerais, Brasil]. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, n. 2, p. 235-240, 1984.

CARVALHO, C. C. N. de et al. Soil surveys in Brazil and perspectives in soil digital mapping. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 56, n. 6, p. 1-15, Nov./Dec. 2015.

CAVAZZI, S. et al. Are fine resolution digital elevation models always the best choice in digital soil mapping? **Geoderma**, Amsterdam, v. 195/196, p. 111-121, Mar. 2013.

CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC. **Diagnóstico ambiental do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CETEC, 1983. 158 p.

CHAGAS, C. S. et al. Orientation of layers of poor metapelitic rocks on genesis of Latosols (Oxisols) under cerrado vegetation. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, p. 539-54, 1997.

COELHO, F. F.; GIASSON, E. Métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 10, p. 2099-2106, out. 2010.

COELHO, R. M.; LEPSCH, I. F.; MENK, J. R. F. Relação solo relevo em um encosta com transição arenito-basalto em Jaú (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 125-133, 1994.

COLLARD, F. et al. Refining a reconnaissance soil map by calibrating regression models with data from the same map (Normandy, France). **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 1, p. 21–30, Sept. 2014.

CONACHER, A. J.; DALRYMPLE, J. B. Preface. **Geoderma**, Amsterdam, v. 7, n. 18, p. 1-2, 1977.

CURI, N. et al. Geomorfologia, física, química e mineralogia dos principais solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Prática**, Lavras, v. 14, n. 2, p. 297-307, 1990.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science American Journal**, Oxford, v. 48, n. 2, p. 341–346, Nov. 1984.

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

DEMATTÊ, J. A. M. et al. Comparação entre mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1219-1229, dez. 2004.

DEMATTÊ, J. A. M. O pedólogo e agricultura de precisão. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 17-19, jan./mar. 2001.

DEMERS, M. N. **GIS modeling in raster. GIS & remote sensing**. West Sussex: Wiley, 2001. 208 p.

DENT, D.; YOUNG, A. **Soil survey and land evaluation**. London: E & FN Spon, 1993. 292 p.

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

EVANS, I. S. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. **Zeitschrift für Geomorphologie**, Stuttgart, suppl. 36, p. 274–295, Jan. 1980.

FLORINSKI, I.; KURYAKOVA, G. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations—exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v. 14, n. 8, p. 815–832, Aug. 2000.

FLORINSKY, I. V. Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. **Progress in Physical Geography**, London, v. 22, n. 1, p. 33-60, Mar. 1998.

GATRELL, A. Concepts of space and geographical data. In: LONGLEY, P. et al. (Ed.). **Geographic information systems: volume 1**. West Sussex: Wiley, 1991. p. 19–134.

GEORGIEVSKIY, B. V. Methods of semiautomatic GIS-based mapping of neotectonic active zones and geomorphological features. In: AGILE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE, 14., 2011, Castellon. **Proceedings...** Castellon: Agile, 2011. p. 18-22.

GIAROLA, M. F. B. et al. **Solos da região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Camargos (MG): perspectiva ambiental**. Lavras: Cemig, 1997. 101 p.

GRAY, J. M.; BISHOP, T. F. A.; WILFORD, J. F. Lithology as a powerful covariate in digital soil mapping. In: ARROUAYS, D. et al. (Ed.). **'Global soil map: basis of the global soil information system'**. The Netherlands: CRC Press, 2014. p. 433-439.

HENGL, T. et al. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: random forests significantly improve current predictions. **PlosOne**, San Francisco, v. 10, n. 6, p. e0125814, June 2015.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences**, New York, v. 32, n. 9, p. 1283–1298, Nov. 2006.

HUDSON, B. D. The soil survey as paradigm-based science. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 56, n. 3, p. 836-841, May/June 1992.

HUGGETT, R. J. Soil landscape systems: a model of soil genesis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 13, n. 1, p. 1-22, Aug. 1975.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE.
Manual técnico de pedologia. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 430 p.

IWAHASHI, J.; PIKE, R. J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 86, n. 3/4, p. 409–440, May 2007.

IWASHITA, F. et al. Intelligent estimation of spatially distributed soil physical properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170, p. 1-10, Jan. 2012.

JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. Geomorphons: a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 182, p. 147–156, Jan. 2013.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. New York: McGraw-Hill, 1941. 281 p.

KAMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução dos solos (Pedogênese). In: KER, J. et al. **Pedologia fundamentos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 81-145.

KER, J. C. et al. **Pedologia**: fundamentos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. 343 p.

KIENZLE, S. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. **Transactions in GIS**, Cambridge, v. 8, n. 1, p. 83–112, Jan. 2004.

LAGACHERIE, P.; LEGROS, J. P.; BURROUGH, P. A. A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped referenced area. **Geoderma**, Amsterdam, v. 65, n. 3/4, p. 238-301, Mar. 1995.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P. et al. **Digital soil mapping**: an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier, 2007. Cap. 1, p. 3-22.

LIAO, W. H. Region description using extended local ternary patterns. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, 20., 2010, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul: IEEE, 2010. p. 23-26.

LIBOHOVA, Z. et al. Some challenges on quantifying soil property predictions uncertainty for the global soil map using legacy data. In: ZHANG, G. L. et al. **Digital soil mapping across paradigms, scales and boundaries**. Singapura: Springer Singapore, 2016. p. 131-140.

LIMA, L. A. S. et al. **Mapeamento de solos tradicional ao digital**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2013. 52 p. (Documentos, 316).

MARQUES JÚNIOR, J. **Distribuição e atributos dos solos em relação à forma e evolução de uma vertente em Monte Alto - SP**. 1995. 228 p. Tese (Doutorado em Solo e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luís de Queiroz", Piracicaba, 1995.

MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 17, n. 1/2, p. 3-52, June 2003.

MENDONÇA-SANTOS, M. L.; SANTOS, H. G. dos. The state of the art of Brazilian soil mapping and prospects for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; VOLTZ, M. (Ed.). **Developments in soil science**: volume 31. New York: Elsevier, 2007. p. 39-54.

MENEZES, M. D. et al. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha – Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 82, p. 175-184, jun. 2009.

MENEZES, M. D. et al. Solum depth spatial prediction comparing conventional with knowledge-based digital soil mapping approaches. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, n. 4, p. 316-323, jul./ago. 2014.

MENEZES, M. D. et al. Spatial prediction of soil properties in two contrasting physiographic regions in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 73, n. 3, p. 274-285, maio/jun. 2016.

MILNE, G. Some suggested units of classification and mapping particularly for East African soils. **Soil Research**, Vitoria, v. 4, n. 3, p. 183-198, 1935.

MINASNY, B. et al. Resolving the integral connection between pedogenesis and landscape evolution. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 150, p. 102-120, Nov. 2015.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Methodologies for global soil mapping. In: BOETTINGER, J. et al. (Ed.). **Digital soil mapping: bridging research, environmental application and operation, progress in soil science**. New York: Springer, 2010. p. 429-436.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; SALVADOR-BLANES, S. Quantitative models for pedogenesis: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 144, n. 1/2, p. 140–157, Mar. 2014.

MOORE, I. D. et al. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 57, n. 2, p. 443-452, May 1993.

MOTTA, P. E. F. et al. **Levantamento pedológico detalhado, erosão dos solos, uso atual e aptidão agrícola das terras de microbacia piloto na região sob influência do reservatório de Itutinga/Camargos, MG**. Belo Horizonte: Cemig, 2001. 51 p.

PINTO, L. C. et al. Spatial prediction of soil–water transmissivity based on fuzzy logic in a Brazilian headwater watershed. **Catena**, Amsterdam, v. 143, p. 26-34, Aug. 2016.

PINTO, L. C. **Hydropedology at the Mantiqueira Range, Southeastern Brazil**. 2015. 165 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

PINTO, L. V. A. et al. Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 197-206, jun. 2004.

RADAMBRASIL. **Projeto RADAMBRASIL: levantamento de recursos naturais**. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1983. 775 p.

RAMOS, M. V. V. et al. Veredas do Triângulo Mineiro: solos, água e uso. **Ciência & Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 283-293, mar./abr. 2006.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Lavras: Editora da UFLA, 2014. 378 p.

ROECKER, S. M.; THOMPSON, J. A. Scale effects on terrain attribute calculation and their use as environmental covariates for digital soil mapping. In: BOETTINGER, J. L. et al. (Ed.). **Digital soil mapping: bridging research, environmental application and operation**. Dordrecht: Springer, 2010. p. 55-66.

RUHE, R. V. Geomorphic surfaces and the nature of soils. **Soil Science**, Madison, v. 82, n. 6, p. 441-455, Dec. 1956.

_____. Quaternary paleopedology. In: WRIGHT, H. E.; FREY, D. G. (Ed.). **The quaternary of the United States**. Princeton: Princeton University Press, 1965. p. 755-764.

SANTOS, H. G. et al. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1995. 122 p.

_____. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.

_____. **Funções de pedotransferência para retenção de água em diferentes classes de solos no centro-sul do estado do Rio Grande do Sul. Ciência & Agrotecnologia, Lavras, v. 37, n. 1, p. 41-60, jan./fev. 2013.**

SARMENTO, E. C. et al. Caracterização de mapas legados de solos: uso de indicadores em mapas com diferentes escalas no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1672-1680, nov./dez. 2014.

SCHMIDT, J.; HEWITT, A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. **Geoderma**, Amsterdam, v. 121, n. 3/4, p. 243-256, Aug. 2004.

SCULL, P. et al. Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**, London, v. 27, n. 2, p. 171-197, June 2003.

SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O. A. The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 181, n. 1, p. 1-15, Jan. 2005.

SEN, Z. **Spatial modeling principles in Earth Sciences**. London: Springer Dordrecht Heidelberg, 2009. 351 p.

SILVA, S. H. G. et al. Evaluation of conditioned latin hypercube sampling as a support for soil mapping and spatial variability of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 603-611, Feb. 2015.

- SILVA, S. H. G. et al. Retrieving pedologist's mental model from existing soil map and comparing data mining tools for refining a larger area map under similar environmental conditions in Southeastern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 267, p. 65-77, Apr. 2016.
- SIRTOLI, A. E. et al. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 317-329, 2008.
- TOMA, M. A. et al. Carbon pool ratios as scientific support to field morphology in the differentiation of dark subsurface soil horizons. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 72, n. 4, p. 334-342, jul./ago. 2015.
- TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Sciences**, New Haven, v. 263, p. 616-627, Sept. 1965.
- VAGEN, T. G. et al. Mapping of soil properties and land degradation risk in Africa using MODIS reflectance. **Geoderma**, Amsterdam, v. 263, p. 216-225, Feb. 2016.
- VALADARES, J. M. A. S.; LEPSCH, I. F.; KÜPPER, A. Levantamento pedológico detalhado da Estação Experimental de Jundiaí, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 30, n. 2, p. 337-385, dez. 1971.
- VALERIANO, M. de M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 3, p. 72-104.
- VAYSSE, K.; LAGACHERIE, P. Evaluating digital soil mapping approaches for mapping global soil map soil properties from legacy data in Languedoc-Roussillon (France). **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 4, p. 20-30, Nov. 2015.
- VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2005. p. 145-192.
- WOODS, J. **The geomorphological characterization of digital elevation models**. 1996. 96 p. Thesis (Doctoral of Geography) - University of Lancaster, Lancaster, 1996.

ZHU, A.-X. et al. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 65, n. 5, p. 1463-1472, 2001.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

**ARTIGO 1 - GEOMORPHOMETRIC TOOL ASSOCIATED TO SOIL
TYPES AND PROPERTIES SPATIAL VARIABILITY AT
WATERSHEDS IN TROPICAL CONDITIONS**

Normas da revista Scientia Agrícola

ABSTRACT

Recently there has been a trend to use quantitative methods for digital soil and geomorphological mapping. Among them, Geomorphons was developed to identify the 10 most common landforms based on digital elevation models. The objective of this work was to quantitatively assess the relationships between Geomorphons units, calculated at three spatial resolutions and nine radius, and soil types and properties of two watersheds with different soil-landscape relationships in Brazil to help soil surveys and mapping under tropical conditions. The study was conducted at Lavrinha Creek (LCW) and Marcela Creek (MCW) watersheds, located in Minas Gerais State, Brazil. Spatial resolutions of 10, 20 and 30 m were the basis for generating Geomorphons at 9 radii of calculation for the watersheds. They were overlapped to detailed soil maps of the watersheds and chi-square test was performed to assess their relationship with soil types. Observation points were compared with the best correlated Geomorphons to also assess relationships with soil properties. Geomorphons of 30 m resolution and radii of 20 and 50 cells, respectively for LCW and MCW, were better correlated with soil types variability, in accordance to these watersheds terrain features. Most observation points for each soil type were located in the same Geomorphon unit that was dominant when analyzing soil maps. Soil properties were less variable among Geomorphons units, probably due to the high weathered-leached stage of soils. Geomorphons can help to improve soil maps in tropical conditions assessing soils variability due to its high correlation with tropical soil types variability.

Keywords: Geomorphons, Soil-landscape relationships, Pedology, Landforms, Digital soil mapping.

INTRODUCTION

In soil surveys, the understanding of existing relationships between soil types and/or properties and landscape features are fundamental for the definition of the most representative places for soil morphological description and sampling. This knowledge is also needed during the digital soil and geomorphological mapping (Bishop et al., 2012). However, due to those relationships being regionally variable, adjustments of general geomorphology models are required for fitting the soils variability in an area of interest (Birkeland, 1999).

In this new period with the advent of digital soil mapping tools, there have been a global interest in more detailed soil maps (Vaysse and Lagacherie, 2015) and the transition from qualitative to more quantitative soil mapping methods (McBratney et al., 2003). This has been proposed in order to expose the soil scientist's mental (qualitative) model (Bui, 2004) of soils distribution on the landscape at the mapping process. Turning it into more quantitative methods, this knowledge can be explicit on maps, recovered from them to allow for improvement of the existing maps, and these relationships can be understood by other soil scientists.

Most of those recently created mapping tools were developed in countries whose soils are quite different from tropical soils (Schaetzl and Anderson, 2005). Thus, in this latter condition, those tools have to be evaluated and adjusted for better modeling soils variability. One of those tools is the Geomorphons, created by Jasiewicz and Stepinski (2013). It consists of a quantitative method for stratifying the landscape in the 10 most common landforms. Thus, as relief influences soil properties (Jenny, 1941), its analysis through Geomorphons, after a regional evaluation, could lead to improvements in soil surveys and mapping, mainly for countries with lack of both soil data and financial support for performing detailed soil surveys, such as Brazil (Mendonça-Santos and Santos, 2007).

Keeping in mind the need for more detailed soil maps in Brazil and other developing countries, this study was carried out. It aimed to quantitatively assess the relationships between Geomorphons units, calculated at three spatial resolutions and nine radii, and soil types and properties of two watersheds with different soil-landscape relationships in Brazil to help soil surveys and mapping under tropical conditions.

MATERIAL AND METHODS

This study was conducted in Lavrinha Creek (LCW) and Marcela Creek (MCW) Watersheds. Table 1 and Figure 1 contain their characterization and location, respectively. Both watersheds drain toward to Grande River Basin, which, in turn, contains diverse hydroelectric power plants and, thus, generates electric energy for great part of southeastern Brazil (Beskow et al., 2009). This country has faced water scarcity in many States in the last two years, which has called more attention for watersheds and their environmental importance in water recharge, which is highly influenced by land use and management practices.

LCW is representative of Mantiqueira Range region, being a headwater watershed, with Dystrudepts (DT) (soils classified according to Soil Taxonomy (Staff, 2014) developed from gneiss on the sloping area and Udifluvents (Ut) and Endoaquents (Et) on the lowest places of the landscape (Menezes et al., 2014). MCW is included in Vertentes Fields physiographical region, with gentler slopes when compared with LCW. MCW soils were developed from mica schists, in which occur Hapludox (Hx) and Acrudox (Ax) on higher places, DT on steep portions of the landscape, and Et on lower parts of the watershed (Motta et al., 2001). The soil maps of those watersheds at detailed scale (LCW: 1:20,000; MCW: 1:12,500) were used as reference for comparisons with Geomorphons.

For the Geomorphons creation (Jasiewicz and Stepinski, 2013), Digital Elevation Models (DEMs) of 10, 20 and 30 m of resolution were created from contour lines at 1:50,000 scale (IBGE) through *Topo to Raster* tool in ArcMAP 10.1 (ESRI). From these DEMs, the Geomorphons were generated on the website <http://sil.uc.edu/geom/app> at nine radii (5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, and 50 cells), which correspond to the number of cells (pixels) as radius of a circumference around a cell of interest that is taken into account for determining the Geomorphon unit (GU) of that cell of interest. Geomorphons identifies 10 most common landform units within the landscape, being them Flat, Peak, Ridge, Shoulder, Spur, Slope, Foothlope, Hollow, Valley and Pit. The three pixel sizes, the nine radii, and the two watersheds made up a total of 54 Geomorphons maps created for analysis.

The soil maps of the two watersheds and the 54 Geomorphons maps were overlapped and the combination of each GU, out of the 10 most common ones, with the soil polygon on the soil maps had its area calculated. Then, chi-square statistic at 5 % of probability was performed (formula presented below) to assess whether there was a relationship between the GUs and the soil types of those different conditions.

$$X^2 = \frac{\sum(o - e)^2}{e}$$

in which o is the observed area of each combination between soil types and GUs, and e is the expected area of each combination. The higher the calculated value (X^2) than the critic value (X^2 critic) determined on a chi-square table, the greater the relationship between soil types and GUs. LCW and MCW, respectively, have three and four soil types that were combined with the 10 possible GUs. Thus, the degree of freedom (DF) for them were, respectively, 29 and 39 (DF = [number of soil types x number of GUs] - 1). Then, analyses of the relationships between the best Geomorphons and the soil types were performed

for each watershed in order to clarify the quantitative soil-landscape relationships.

Furthermore, observation points, where it were performed morphological soil description and classification, were inserted on the Geomorphons maps that presented the strongest relationship with the soil types in order to evaluate whether those soils occurrence in punctual locales agreed with the results found from the analyzes between soil maps and GUs, since soil polygon maps allow for some uncertainty of soil classes within each polygon (Soil Survey Manual, 1993). 37 points were analyzed in LCW and 29 in MCW.

In sequence, in order to test whether soil properties also vary according to GUs, an independent data set containing the particle size distribution from the 0-20 cm depth for the two watersheds, containing 197 points in LCW and 165 in MCW, were inserted on those best correlated Geomorphons maps. Then, a Scott-Knott test at 5 % probability was performed in SISVAR 5.3 software to assess the statistical differences of sand, silt, and clay contents among the GUs.

RESULTS AND DISCUSSION

Table 2 and Figure 2 show the chi-square calculated for each pixel size and Geomorphons radius in each watershed.

It is noticed that the pixel size solely had great influence on chi-square values and, consequently, the correspondence between the GUs and the soil types. As an example, in Table 2, chi-square in MCW with radius of five and pixel size of 10 m did not present relationship with the soil types for being smaller than the critic X^2 , but the ones of 20 and 30 m did (Figure 3). It has also been reported by Hengl (2006), who noticed that the optimal pixel size may differ according to different target variables, thus, the one that provides the highest correlation with the predicted variable should be chosen (Florinsky and Kuryakova, 2000).

For both watersheds, spatial resolution of 30 m had a higher relation to the soil types than the other pixel sizes. As noticed by Roecker and Thompson (2010), the more detailed resolutions presented lesser correspondence to soil types than the coarse resolution, in this case, 30 m.

The Geomorphons radii, in turn, were also responsible for changes in degrees of relationship between soil types and GUs (Table 2). As presented in Figure 4, as the radius increases, the polygons of some GUs become larger. For LCW, for example, at radii of five, 20 and 50 cells at pixel size of 20 m, all of them presented correspondence with soil types for having a X^2 greater than critic X^2 , although they look different from one another (Figure 4). At the greatest radius, in general, the GUs correspondent to both low and concave places (Footslope, Valley, Pit, and Hollow), ridges (Shoulder, Ridge and Peak) and convex backslopes (Spur) had larger areas than in the other GUs. On the other hand, GUs correspondent to flat places (Flat) and linear backslope (Slope) decreased as the radius increases. Furthermore, it is important to highlight the high similarity of the watershed limits, which were very well defined by the GUs Peak and Ridge.

In both LCW and MCW, for all the combinations of pixel sizes with Geomorphons radii, except for radius of five and pixel of 10 m in MCW (one combination out of 54 possible combinations), there was significant relationship between these parameters and soil types, according to the chi-square test at 5 % probability (Table 2). The higher the X^2 value when it is greater than the X^2 critic, the stronger the relationship with soil types is. It indicates that the GUs identified by this tool is correlated with the distribution of soil patterns within different landscapes, even though the Geomorphons at varying radius for calculation and pixel sizes present visual changes (Figures 3 and 4).

In order to define the most appropriate Geomorphons for each watershed, the highest X^2 value was taken as the most representative of the GUs

and soil types. As previously mentioned, all the best of them had an spatial resolution of 30 m in the two watersheds, however the radius varied. For LCW, radius of 20 cells was the most representative, while for MCW the best one was calculated with 50 cells. Geomorphons with radius of 50 cells increase the lowland landforms area (Figure 4), which is common of gentler relief landscapes. In LCW, as the topography is steeper and relief is more variable, lowland places are reduced in area, being better represented by radius of 20 cells. Figure 5 shows the best Geomorphons correlated with soil types for the two watersheds.

Knowing the best Geomorphons for each watershed, the area of the soil types within the GUs was calculated in order to relate soils occurrence with the GUs (Figure 6). It was observed a pattern of soils distribution in the watersheds with the GUs. In LCW, where DT domains with 92 % of the area, this soil class mostly occupies Slope, Hollow and Spur GUs. This watershed presents very steep slope gradient in the area, which tend to promote higher erosion rates and contributes to the weak development of its soils (Aquino et al., 2013). The ET and UT are predominantly located in Pit and Valley GUs, which are typic of lower elevation areas. Pit is a low and concave place within the landscape, being in accordance with the expected location where ET is commonly encountered, while UT predominates in Valley GU, which, in turn, is not as low in elevation as Pit, although being also close to the water course, which agrees with its better drainage when compared with ET (Buol et al., 2011).

In MCW, the DT is close to the water bodies, occurring right above them, the reason why the dominant GU for this soil type was Valley, followed by Slope, which is a more linear GU, probably causing more erosion and, thus, reducing the rates of soil development.

Both AX and HX of this watershed are found in higher and gentler slope areas (Motta et al., 2002). This is in agreement with their predominance in Ridge

GU, typical of the highest areas of the landscape, but not as sharp as Peak, where they also occur. The other GUs in which these soil types occur are the same for both soils. This is explained by the fact that in this watershed, both AX and HX tend to be found in similar landforms. The main factor that drives their differentiation is the orientation of the parent material layers (Chagas et al., 1997): when horizontal-oriented, water is kept in the system for a longer time than when vertical-oriented, which leads to distinct rates of hematite/goethite in those soils, explaining their contrasting colors.

ET in MCW, differently as found in LCW, occupies larger area in Valley GU than in Pit, followed by Hollow, although all of them being typical of low and concave or flat places on the landscape, where water accumulates and contributes to the development of soils hydromorphic features.

As observed in Figures 5 and 6, more than one GU was found within the same soil type, which means that factors other than the ones taken into account by Geomorphons driver soil differentiation. Similar results were found by Cavazzi et al. (2013), who studied some specific places where parent material was more important than terrain to explain soil variability, causing misclassification on the maps. However, it could be found a relationship between the soil types of the two watersheds with the GUs where they predominantly occur. This is an adequate indicative that Geomorphons is able to stratify the landscape in geomorphological units that have correlation with soil types. Perhaps, for the tropical conditions evaluated, merging some of the GUs could be done in order to facilitate the understanding of soils distribution along the area of interest, such as done by Ashtekar et al. (2014) in Colombia as a first attempt to model soil properties from Llanos Orientales. For example, ET was predominantly observed in Valley in MCW and in Pit in LCW. Thus, although Valley and Pit are different GUs, they were successful in separating

hydromorphic soils, as expected. This could suggest that some soil types may occur in different geomorphologies defined by Geomorphons.

Another possible explanation of more than one soil type occurring within a GU is related with polygon soil maps. It is known that those soil maps, even at a detailed scale, are allowed to contain small areas of other soil types within a mapping unit (inclusions) (Staff, 1993). This could have led to the occurrence of some soil types in unexpected GUs, although they were always representing small areas, such as ET and UT in Spur and Slope in both MCW and LCW (Figure 6).

In order to clarify this hypothesis, observation points where soil morphological description and classification were performed were inserted in the Geomorphons maps of highest correspondence with the soil types for the two watersheds and compared with the GUs where they were inserted (Table 3).

Analyzing Table 3, for LCW, it can be seen that most of the DT is found in Slope GU, in agreement with the previous results. Furthermore, the unique point in a ET area was also in the same GU that the dominant one found by the calculations of areas on the polygon map (Pit). UT, in turn, has points occurring in Pit and Valley, being them characteristic of the landforms where this soil type is commonly found.

For MCW, most of the DT is found in Slope GU, in agreement with its incipient development, for being associated with more erosive places, while found with predominance in Valley in terms of area. However, ET, AX, and HX were found in the same previously observed GUs, respectively, Pit, Ridge, and Slope.

From this analysis, it was noticed that most soil types in the two watersheds (8 out of 11) were found in the same GU that predominated when analyzing the area of occurrence per soil type on the maps. It confirms that the

Geomorphons is capable of stratifying the landscape in terms of soil type variability in these tropical conditions.

On the other hand, the only condition that disagreed (DT in MCW) indicates that this soil type may occur in different GUs. DT is a soil type that can be encountered in different landscapes (Schaetzl and Anderson, 2005), due to its classification by absence of defined characteristics, which means this soil class is highly variable in terms of properties, such as solum thickness, particle size distribution, color, drainage, slope gradient, and so forth.

In order to test soil properties variability among the GUs, sand, silt, and clay contents at 0-20 cm depth were statistically evaluated (Table 4). Particle size distribution was selected for this test because it is considered a less variable soil property along the time, being little affected by land use and management practices, contrasting with soil organic carbon, for example.

It can be noticed that in LCW there is statistical difference for sand and clay contents in Valley and Pit GUs, related to low and concave places, in relation to the other GUs relative to higher places on the landscape. Silt content did not differ among the GUs, for being generally low in these weathered soils.

These results may be an indicative of the more weathered-leached soils in MCW than in LCW, which tends to diminish the soil property differences even on different landforms for tropical conditions, along with the different parent materials. The more developed the soils, the lower tend to be their properties variability (steady-state condition) (Birkeland, 1999). It seems soil particle size distribution within the two watersheds in tropical conditions has relatively low variability, not following the GUs difference and being contrary to the expected for temperate regions.

Bishop et al. (2015) raised the importance of scientific validity of results and the formal use of geomorphological information generated nowadays, especially in integrative sciences, as Soil Science. Reliance has been placed on

pattern recognition for segmentation and mapping, but whether or not such patterns represent phenomena as soil classes or properties, should be tested. In this sense, Qin et al. (2009) used a field work to relate slope position with A horizon sand percentages through fuzzy logics. Likewise, in the current study, a field work (soil survey and soil property sampling) with a GIS-based spatial statistic helped to understand the Geomorphon and its role on generating new capabilities in soil mapping under tropical conditions.

It is known that regional adaptations must be made in developed models to make them represent well soils variability in an area of interest. In this sense, Geomorphons can help to stratify the landscape in units that may have more homogeneity of soil properties within themselves in an easy way, especially in a first approach to allow not only for a better understanding of soils occurrence on the landscape, but also for further refinement of soil maps. Further work should focus on adapting this tool for other Brazilian soil conditions in order to increase the details of this country's soil maps with reduced costs, since financial support for detailed soil mapping in Brazil is currently very scarce.

CONCLUSIONS

Geomorphon units have great relationship with soil types regardless the pixel size and radius for Geomorphons calculation in both watersheds.

Comparing soil classification at observation points with Geomorphons units, great correspondence was found with the results that took into account the soil type on soil maps with dominant area per Geomorphons unit.

Particle size distribution do not vary according to Geomorphons units in the studied tropical conditions, due to the more homogeneity found in those weathered-leached soils.

ACNOWLEDGEMENTS

The authors thank CNPq, CAPES and FAPEMIG for the financial support for the development of this research.

REFERENCES

Aquino, R. F.; Silva, M.L.N.; Freitas, D.A.F.; Curi, N.; Avanzi, J.C. 2013. Soil Losses from TypicCambisols and Red Latosol as related to three erosive rainfall patterns. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37:213-220.

Ashtekar, J.M.; Owens, P.R.; Brown, R.A.; Winzeler, H.E.; Dorantes, M.; Libohova, Z.; Silva, M.; Castro, A. 2014. Digital mapping of soil properties and associated uncertainties in the Llanos Orientales, South America. p.367–372. In: Arrouays, D.; McKenzie, N.; Hempel, J.; Forges, A.C.R.; McBratney, A. eds. *GlobalSoilMap: Basis of global spatial soil informatio system*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Beskow, S.; Mello, C.R.; Norton, L.D.; Curi, N.; Viola, M.R.; Avanzi, J.C. 2009. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*, 79:49–59.

Birkeland, P. 1999. *Soils and geomorphology*. Oxford University Press, Oxford, England.

Bishop, M.P.; James, L.A.; Shroder Junior, J.F.; Walsh, S.J. 2012. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. *Geomorphology*, 137:5-26.

Bui, E.N. 2004. Soil survey as a knowledge system. *Geoderma* 120:17–26.

Buol, S.W.; Southard, R.J.; Graham, R.C.; McDaniel, P.A. 2011. Soil genesis and classification. 6ed. Wiley-Blackwell, Ames, Iowa, USA.

Cavazzi, S.; Corstanje, R.; Mayr, T.; Hannam, J.; Fealy, R. 2013. Are fine resolution digital elevation models always the best choice in digital soil mapping? *Geoderma* 195-196:111–121.

Chagas, C.S.; Curi, N.; Duarte, M.N.; Motta, P.E.F.; Lima, J.M. 1997. Orientation of layers of poor metapelitic rocks on genesis of Latosols (Oxisols) under cerrado vegetation. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 32:539-548 (in Portuguese, with abstract in English).

Florinsky, I.V.; Kuryakova, G.A. 2000. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations – Exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science*, 14:15-832.

Hengl, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32:1283–1298.

Jasiewicz, J.; Stepinski, T.F. 2013. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology* 182:147–156.

Jenny, H. 1941. *Factors of soil formation: A System of Quantitative Pedology*. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY, USA.

McBratney, A.B.; Mendonça-Santos, M.L.; Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117:3-52.

Mello, C.R.; Ávila, L.F.; Viola, M.R.; Nilton, C.; Norton, L.D. 2015. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 73:8683-8698.

Mendonça-Santos, M.L.; Santos, H.G. 2007. The State of the Art of Brazilian Soil Mapping and Prospects for Digital Soil Mapping. p.39-54. In: Lagacherie, P.; McBratney, A.B.; Voltz, M. eds. *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Menezes, M.D.; Silva, S.H.G.; Mello, C.R.; Owens, P.R.; Curi, N. 2014. Solum depth spatial prediction comparing conventional with knowledge-based digital soil mapping approaches. *Scientia Agricola* 71:316–323.

Milne, G. 1935. Some suggested units of classification and mapping particularly for East African Soils. *Soil Research* 4:183–198.

Motta, P.E.F.; Curi, N.; Silva, M.L.N.; Marques, J.J.G.S.M.; Prado, N.J.S.; Fonseca, E.M.B. 2001. Detailed soil survey, soil erosion, land use and agricultural land suitability of a pilot watershed in the region under influence of Camargos/Itutinga hydroelectric power plant-MG. = Levantamento pedológico detalhado, erosão dos solos, uso atual e aptidão agrícola das terras de microbacia piloto na região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Camargos-MG. CEMIG, Belo Horizonte, MG, Brazil (in Portuguese).

Motta, P.E.M.; Curi, N.; Franzmeier, D.P. 2002 Relation of soils and geomorphic surfaces in the Brazilian Cerrado. p.13-32. In: Oliveira, P.S.; Marquis, R.J. eds. *The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna*. Columbia University Press, New York, NY, USA.

Qin, C.; Zhu, A.; Shi, X.; Li, B.; Zhou, C. 2009. Quantification of spatial gradation of slope positions. *Geomorphology*, 110:152-161.

Roecker, S.M.; Thompson, J.A. 2010. Scale effects on terrain attribute calculation and their use as environmental covariates for digital soil mapping. p.55-66. In: Boettinger, J.L.; Howell, D.W.; Moore, A.C.; Hartemink, A.E.; Kienast-Brown, S. eds. *Digital soil mapping: Bridging research, environmental application and operation*. Springer, Dordrecht, Netherlands.

Schaetzl, R.J.; Anderson, S. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Schoeneberger, P. J.; Wysocki, D.A.; Benham, E.C.; Broderson, W.D. eds. 2002. *Field book for describing and sampling soils*. USDA-NRCS-NSSC, Lincoln, NE, USA.

Staff, S.S. 1993. *Soil survey manual*. US Government Printing Office, Washington, DC, USA.

Staff, S.S., 2014. *Keys to Soil taxonomy*. 12th ed, USDA-SCS, Washington, DC, USA.

Vaysse, K.; Lagacherie, P. 2015. Evaluating Digital Soil Mapping approaches for mapping GlobalSoilMap soil properties from legacy data in Languedoc-Roussillon (France). *Geoderma Regional* 4:20–30.

APPENDIX

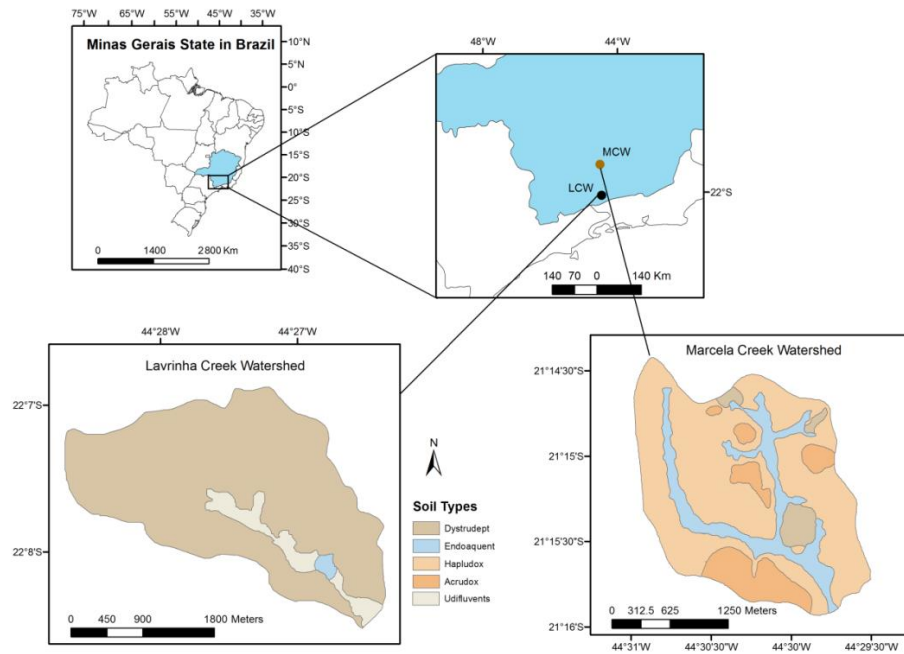


Figure 1 - Location and soil maps of the two watersheds in study. Adapted from Menezes et al. (2014) and Motta et al. (2001).

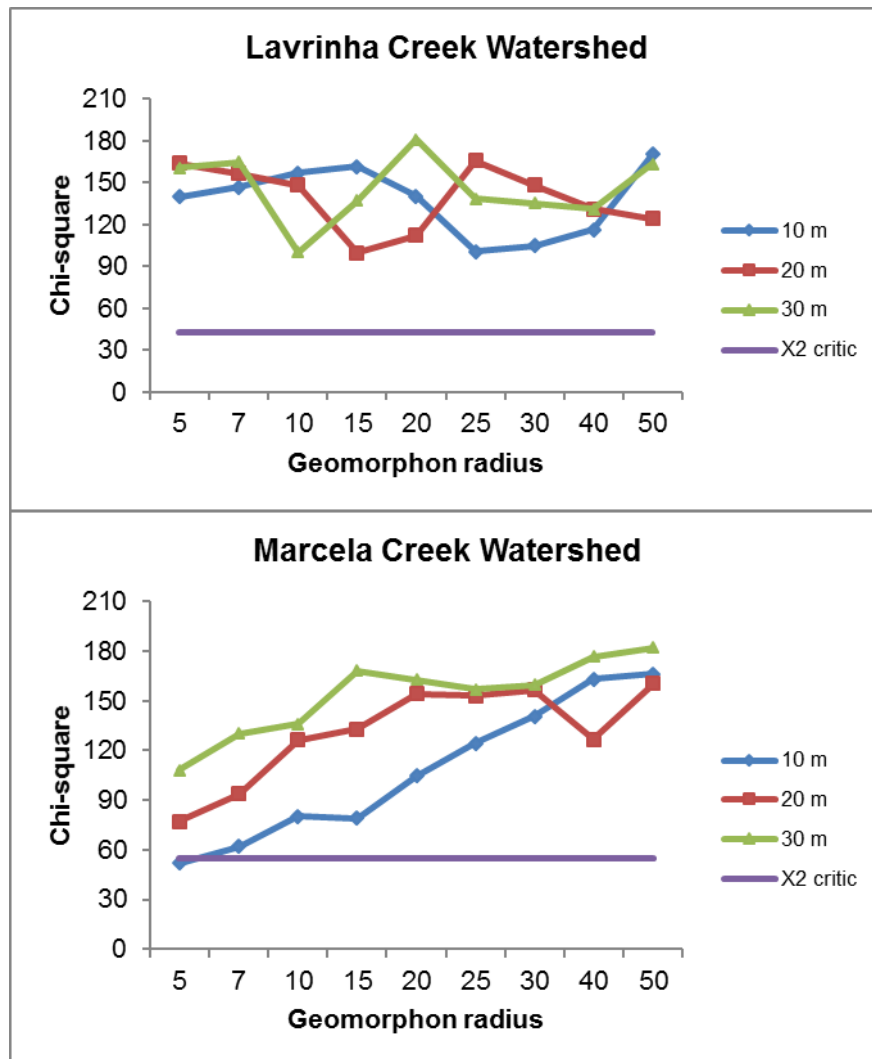


Figure 2 - Chi-square for the two watersheds calculated from varying pixel size and Geomorphon radius to assess they correspondence with soil types.

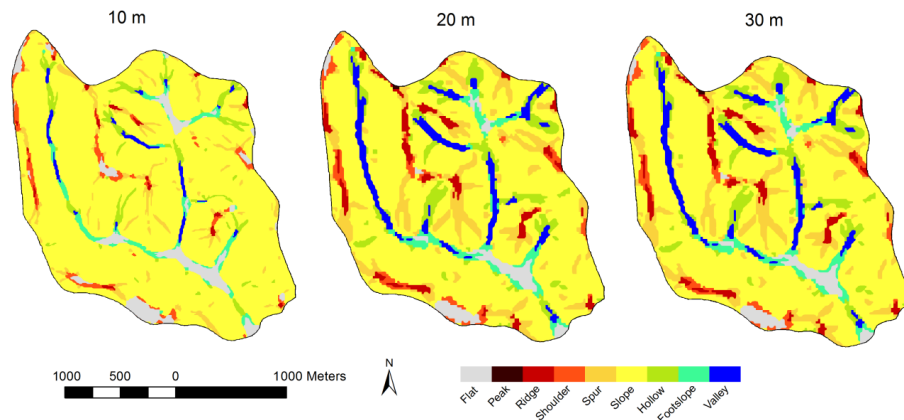


Figure 3 - Geomorphons created with different spatial resolutions with five cells of radius.

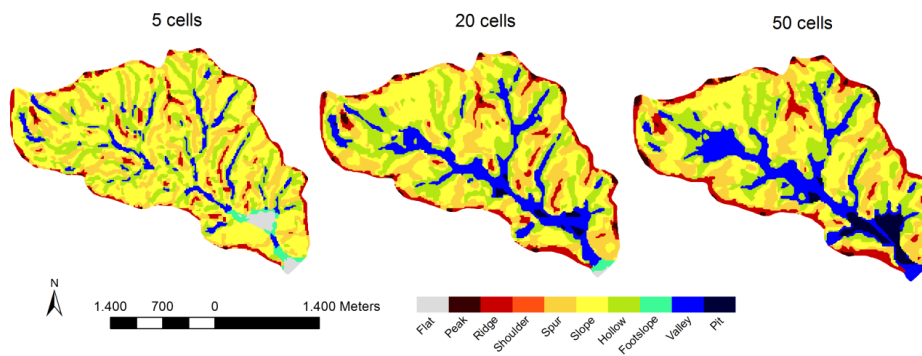


Figure 4 - Different number of cells as radius for the creation of Geomorphons for Lavrinha Creek watershed, with 20 m of spatial resolution.

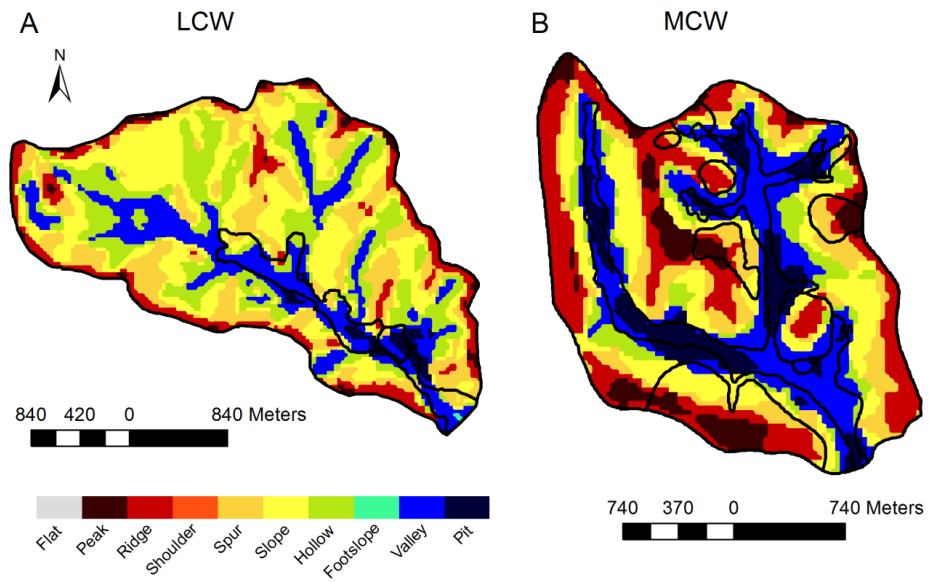


Figure 5 - Geomorphons that had the highest relationship with soil types of the two studied watersheds.

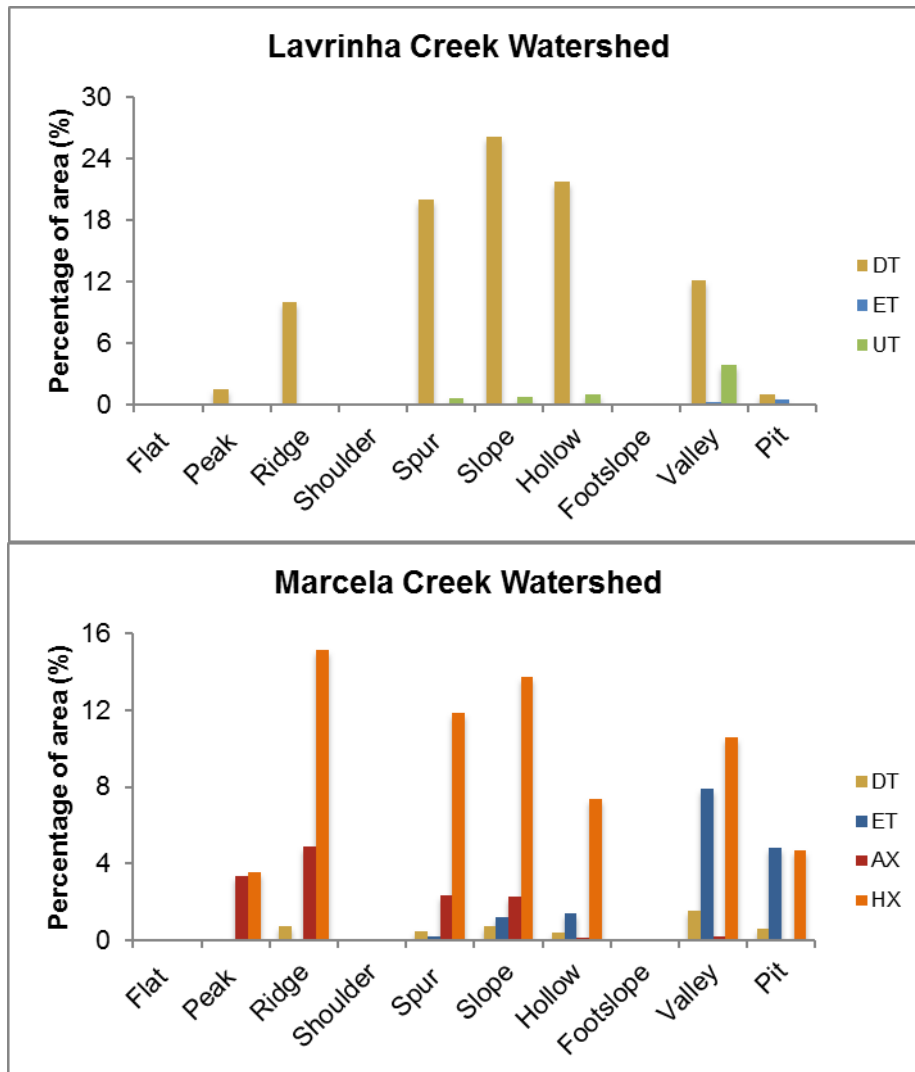


Figure 6 - Graphics of the distribution of soil types within the Geomorphons units for the two studied watersheds.

Table 1 - Characterization of the two studied watersheds.

Characteristics	Watersheds	
	LCW	MCW
Location (coordinates)	Between longitudes UTM 553800 and 557867 m and latitudes 7554419 and 7551367 m, zone 23K	Between longitudes UTM 552591 and 550230 m and latitudes 7648373 and 7651231, zone 23K
Area (ha)	676 ha	470 ha
Altitude (m)	From 1151 to 1687 m	From 957 to 1057 m
Climate ¹	Cwb - humid temperate with dry winter and temperate summer	Cwa - humid temperate with dry winter and hot summer
Meanannual temperature ²	15°C	19.7°C
Meanannual precipitation ²	2,000 mm	1,300 mm
Meanslopegradient (%)	36.5	11.8
Parent material	Gneiss	Mica schists
Nativevegetation	Atlantic Forest (Rainforest)	Cerrado (BrazilianSavanna)

¹According to Köppen classification system. ²Mello et al. (2015).

Table 2 - Chi-square values calculated for the combinations of pixel sizes and Geomorphons units with soil types of the two studied watersheds.

Watershed	Radius	X^2_{critic}	Spatial resolution		
			10 m	20 m	30 m
Lavrinha Creek	5	42.56	139.88	164.13	160.81
	7		146.95	156.62	164.90
	10		156.92	148.24	100.36
	15		161.70	99.91	137.25
	20		140.66	112.46	181.01
	25		100.53	165.80	138.58
	30		104.87	148.31	135.34
	40		116.36	131.09	131.18
	50		170.62	124.42	163.68
	Marcela Creek		5	54.57	51.90
7		62.13	93.70		130.30
10		80.35	126.36		136.19
15		78.90	132.91		168.10
20		104.56	154.11		162.75
25		124.34	153.31		157.03
30		140.76	156.45		159.79
40		163.20	126.89		176.63
50		166.49	160.53		182.33

Table 3 - Number of observation points per soil class in each Geomorphons unit in the two watersheds of study.

Soil Types	Geomorphonsunits										Total
	Flat	Peak	Ridge	Shoulder	Spur	Slope	Hollow	Footslope	Valley	Pit	
-----LCW-----											
DT	--	--	2	--	7	12	7	--	5	--	33
ET	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1	1
UT	--	--	--	--	--	1	--	--	1	1	3
Total											37
-----MCW-----											
DT	--	1	--	--	--	2	--	--	--	--	3
ET	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1	1
AX	--	1	3	--	2	1	--	--	--	--	7
HX	--	1	2	--	3	5	3	--	4	--	18
Total											29

DT - Dystrudepts; ET - Endoaquents; UT - Udifluvents; AX - Acrudox; HX - Hapludox. LCW - Lavrinha Creek Watershed; MCW - Marcela Creek Watershed.

Table 4 - Sand, silt, and clay content for the two watersheds of study.

GUs	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
-----LCW-----			
Ridge	48.2 b	20.10 a	34.70 a
Spur	52.20 b	16.62 a	31.18 a
Slope	53.95 b	16.31 a	29.74 a
Hollow	52 b	17.71 a	30.28 a
Valley	57.14 a	18.48 a	24.38 b
Pit	58.00 a	14.25 a	27.75 b
-----MCW-----			
Peak	17.77 b	19.41 a	62.82 a
Ridge	18.84 b	19.88 a	61.27 a
Spur	21.06 a	18.41 a	60.23 a
Slope	21.81 a	18.96 a	59.23 a
Hollow	22.00 a	18.71 a	59.07 a
Valley	22.63 a	19.4 a	57.97 a
Pit	24.46 a	17.38 a	58.15 a

Means followed by the same letter in the column do not differ statistically at 5 % probability according to Scott-Knott test.