Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Espacialização das classes solos a partir da utilização de atributos geomorfométricos na Bacia do Paraná 3, Brasil*

Bruno Aparecido da Silva¹, Ericson Hideki Hayakawa², Vanda Moreira Martins³

¹Doutorando em Geografia pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), CEP: 85605-010, Francisco Beltrão (PR), Brasil, brunoborchertsilva@gmail.com (autor correspondente). ²Departamento de Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), CEP: 85960-000, Marechal Cândido Rondon (PR), Brasil, ericson.geo@gmail.com. ³Departamento de Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), CEP: 85960-000, Marechal Cândido Rondon (PR), Brasil, mmvanda@hotmail.com. *Parte da dissertação do primeiro autor.

Artigo recebido em 25/03/2021 e aceito em 13/12/2021

RESUMO

O emprego de atributos geomorfométricos para a espacialização das classes de solos, associado aos pressupostos da relação solo-relevo, tornou-se uma das bases para a obtenção das Unidades de Mapeamento (UM) dos solos. Essa abordagem norteou o objetivo deste trabalho que foi verificar a possibilidade de espacializar as classes de solos a partir de atributos geomorfométricos na Bacia do Paraná 3 (BP3), região Oeste do estado do Paraná. Os procedimentos incluíram a obtenção de atributos topográficos de Declividade (D), *Sediment Transport Index (STI)*, *Terrain Wetness Index (TWI)*, *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF)*, *Multiresolution Ridge Top Flatness Index (MRRTF)* e Índice de Posição Relativa (IPR), utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG). As operações de manipulação dos campos geográficos (variáveis geomorfométricas) permitiram a obtenção de cinco UM de solos. A Análise de Componentes Principais (ACP) retratou a correlação entre as unidades mapeadas e cada variável empregada. O mapa de solos gerado foi comparado com os mapas oficiais disponíveis, obtendo-se avanço no detalhamento da escala de mapeamento dos solos e aprimoramento dos limites das UM. As UM foram aferidas e validadas com a verificação de 170 pontos amostrais em campo. São elas: LATOSSOLO VERMELHO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO REGOLÍTICO + NEOSSOLO LÍTOLICO + CAMBISSOLO HÁPLICO; GLEISSOLO HÁPLICO + CAMBISSOLO FLÚVICO e CAMBISSOLO HÁPLICO + NEOSSOLO REGOLÍTICO + GLEISSOLO HÁPLICO. Os resultados da validação (Exatidão global – 0,80) demonstraram a eficiência dos procedimentos adotados para a espacialização das UM de solos na escala adotada, com abrangência regional.

Palavras-chave: mapeamento de solos; geomorfometria; solo-relevo.

Spatial distribution of soil classes based on the use of geomorphometric attributes in Paraná Basin 3, Brazil

ABSTRACT

The use of geomorphometric attributes for the spatial distribution of soil classes, associated with suppositions on the soil-relief relationship, has become a basis to obtain soil Map Units (MU). This approach guided the aim of this study, which was to verify the possibility of soil class spatialization based on geomorphometric attributes in Paraná Basin 3 (BP3), in the western region of the state of Paraná. The procedures include obtaining topographical attributes of Declivity (D), *Sediment Transport Index (STI)*, *Terrain Wetness Index (TWI)*, *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF)*, *Multiresolution Ridge Top Flatness Index (MRRTF)* and Relative Slope Position, using Geographic Information Systems (GIS). Manipulation of the geographic fields (geomorphometric variables) enabled attainment of five soil MU. Principal Components Analysis (PCA) portrayed the correlation between the mapped units and each variable. The generated soil map was compared with the available official maps, to improve the detail of the scale of soil mapping and enhance the MU limits. The MU were measured and validated with the verification of 170 sample points in the field. They are: Rhodic Ferrasols + Eutric Nitosols, Regosols + Leptsols + Eutric Cambisols, Eutric Gleysols + Eutric Cambisols and Eutric Cambisols + Regosols + Eutric Gleysols. The validation results (Global accuracy – 0.80) demonstrated the efficiency of the procedures adopted for the spatial distribution of the soil MU at the adopted scale, with regional coverage.

Keywords: soil mapping; geomorphometry; soil-geomorphology.

Introdução

A obtenção de informações sobre a distribuição dos solos e seus atributos (Gagkas et al., 2021), em escala detalhada, é um dos grandes desafios de quem mapeia solos (Mulder et al., 2011; Gray et al., 2015; Pinheiro et al., 2018; Zeraatpisheh et al., 2020). Essas informações estão se tornando cada vez mais importantes no contexto global (Arrouays et al., 2020; Goldman et al., 2020; Searle et al., 2021), o que aumenta a demanda por conhecimento sobre o recurso solo (Fragoso-Servón et al., 2017), pois contribuem para a solução de problemas naturais/antropogênicos (Mulder et al., 2011; Martínez-Graña et al., 2015). Ademais, o entendimento do solo na paisagem, com o objetivo de subsidiar o planejamento territorial/agrícola (Abdelfattah e Pain, 2012; Gray et al., 2015; Meier et al., 2018; Carvalho Junior et al., 2020), depende do conhecimento da sua distribuição geográfica, consensualmente por meio de mapas pedológicos detalhados (Martínez-Graña et al., 2015; Rossel et al., 2015; Gagkas et al., 2021; Godoi et al., 2021; Morais et al., 2020; Poppiel et al., 2021; Sothe et al., 2022).

Os pressupostos conceituais do paradigma solo-relevo ou solo-paisagem (Kempen et al., 2012; Lepsch, 2017) que garantem que os pedólogos obtenham informações prévias da distribuição espacial dos solos de forma rápida (Lacerda et al., 2005; Dobos e Hengl, 2009; Kempen et al., 2012). Nesse contexto, a relação solo-relevo configurou-se em um modelo conceitual utilizado no Mapeamento Convencional de Solos (MCS). Descrito como predominantemente qualitativo, o MCS, muitas vezes, é preterido em relação ao Mapeamento Digital de Solos (MDS). Este é considerado uma abordagem quantitativa, com estimativas de precisão e de incerteza dos resultados alcançados (Dalmolin et al., 2017). Enquanto que, o MCS pauta-se numa modelagem mental apoiada em conhecimentos tácitos (Hudson, 1992; Lepsch, 2017). Alguns autores argumentam que a eficácia dessas duas técnicas (convencional e digital) para a elaboração de mapa de solos são satisfatórias (Meier et al., 2018).

A disponibilidade de ferramentas de geotecnologias, em especial os Modelos Digitais de Elevação (MDE), tem sido essencial para uma leitura prévia da paisagem apoiada em índices geomorfométricos (Gallant e Wilson, 2000; Wilson e Gallant, 2000; Hengl e Macmillan, 2009; Olaya, 2009; Pike et al., 2009; Mulder et al., 2011; Silveira et al., 2012; Gallant e Austin, 2015; Maleki et al., 2020). Estes índices abarcam aplicações relacionadas não somente à relação solo-paisagem, mas a diversas outras finalidades, demonstradas por Cavalli et al. (2013), Gray et al. (2015), Bannari et al. (2017), Tarolli et al. (2017), Gomes et al. (2019), Morais et al. (2020), Tarolli e Sofia (2020), Assis et al. (2021), Bellinaso et al. (2021), Godoi et al. (2021), Silvero et al. (2021) e Zhang et al. (2022). Aplicações que vão além da separação e identificação das classes de solos e de seus atributos pedológicos (Moore et al., 1993; Gessler et al., 1995; Gallant e Dowling, 2003; Böhner e Selige, 2006; McKenzie e Gallant, 2007; Sirtoli et al., 2008a; Silveira et al., 2012; Demattê et al., 2015; Chagas et al., 2017).

Apesar do aperfeiçoamento de técnicas de mapeamento de solos, a ausência de mapa pedológicos, em escala de detalhe/semidetalhe, ainda persiste no Brasil, em que a maior parte do território nacional é recoberta por mapeamentos em escala de 1:1.000.000, conforme já destacaram Coelho e Giasson (2010). Este cenário não é diferente na Bacia do Paraná 3 (BP3). Esta bacia integra um conjunto de sub-bacias cujos canais deságuam no Reservatório de Itaipu. Adicionalmente, a área possui elevado destaque no cenário agropecuário paranaense, sendo uma das principais produtoras de grãos do estado. Dada a sua importância regional, muitos estudos e ações visam o correto manejo e conservação dos solos, a fim de evitar prejuízos ambientais, sociais e econômicos na área. Considerando a importância do conhecimento pedológico para ações de gestão e planejamento da área, diferentes estudos veem sendo desenvolvidos na região (Magalhães e Cunha, 2006; Giarola et al., 2007; Magalhães et al., 2012; Rocha et al.,

2012; Janjar, 2013; Calegari e Marcolin, 2015; Bade et al., 2016; Magalhães et al., 2016; Oliveira et al., 2017; Rocha et al., 2018; Silva et al., 2018; Silva e Calegari, 2019a; Marcolin e Calegari, 2020; Silva et al., 2020; 2021). Contudo, um dos entraves é a ausência da espacialização das classes de solos em escala > 50.000. Isso dificulta o gerenciamento de propriedades rurais e microbacias (Coelho e Giasson, 2010) e a definição de práticas de uso, manejo e conservação apropriadas a cada classe de solo (Mcbratney et al., 2000; Dobos e Hengl, 2009; Cambule et al., 2013).

Trabalhos prévios, realizados por Silva et al. (2018) e Silva e Calegari (2019a), que visaram a espacialização das classes de solos amparados em índices morfométricos (Declividade, *Sediment Transport Index* e *Terrain Wetness Index*), alcançaram bons resultados quanto a delimitação das classes dos Latossolos, Nitossolos, Neossolos e Cambissolos. Porém, classes de solos associadas aos setores de fundo de vale, tais como Gleissolos e solos com caráter flúvico, tiveram sua ocorrência subestimada na paisagem do oeste paranaense (e. g. Embrapa, 1984, 2018; Bhering et al., 2007; Silva et al., 2018). Neste contexto, busca-se verificar se a incorporação/testagem de outros índices geomorfométricos podem melhorar a representação das classes de solos e a sua distribuição na paisagem (Böhner e Selige, 2006; Prates et al., 2012; Mehnatkesh et al., 2013; Adhikari et al., 2014; Oliveira et al., 2014; Miller e Schaetzl, 2016; Khan et al., 2020). A hipótese deste artigo propõe que os atributos *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF)*, *Multiresolution Ridge Top Flatness Index (MRRTF)* e Índice de Posição Relativa (IPR) permitem uma melhor individualização das Unidades de Mapeamento (UM), especialmente nas áreas de vale. Por fim, o objetivo deste artigo foi avaliar a eficácia de índices geomorfométricos no mapeamento de solos na paisagem na BP3, em escala detalhada (1:50.000).

Área do Estudo

A área do estudo se insere na Bacia do Paraná 3 (BP3), no oeste do estado do Paraná (Figura 1), e abrange os setores da

bacia compostos por rochas basálticas do Grupo Serra Geral (Mineropar, 2013). O tipo climático é o Cfa, clima subtropical, verão quente, com temperaturas médias anuais que variam entre 18°C e 22°C, sem ocorrência de estação seca e precipitação média anual entre 1400 mm e 2000 mm (Paraná, 2013).

As formas de relevo são agrupadas em três (03) unidades geomorfológicas: Planalto de São Francisco, Planalto de Foz do Iguaçu e Planalto de Cascavel (Santos et al., 2006). A rede de drenagem é caracterizada por canais perenes, com padrão predominantemente dendrítico a sub-dendrítico, por vezes, padrão sub-retangular, assim como segmentos anômalos (Silva e Calegari, 2019b).

A cobertura pedológica da BP3 é composta de Latossolos e Nitossolos Vermelhos, Neossolos, Cambissolos e Gleissolos (Embrapa, 2018; Silva et al., 2018; Silva e Calegari, 2019a). A vegetação nativa restringe-se aos remanescentes da Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 2012), uma vez que a cobertura florestal original foi substituída pela monocultura, a partir da década de 1950.

Métodos

Obtenção das Unidades de Mapeamento de solos (UM)

A obtenção das unidades de mapeamento (UM) dos solos a partir de atributos geomorfométricos (Figura 2) amparou-se nos dados oriundos do *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM, com resolução de 1 arco-segundo (~30m): SRTM1S25-W054; SRTM1S25-W055; SRTM1S26W054; SRTM1S26W055, obtidos de (USGS, 2019). Os dados do Modelo Digital de Elevação (MDE-SRTM) foram manipulados no software Saga 7.7.0 (*System for Automated Geoscientific Analyses*), com o uso da ferramenta *Geoprocessing>Terrain Analysis* (Figura 3-a-b).

A definição dos atributos geomorfométricos, utilizados para o estudo amparou-se no conhecimento dos processos pedogenéticos, gerais e específicos, que atuam na formação dos solos na paisagem estudada (Figura 2c, d) (Calegari e Marcolin, 2015; Ghidin et al., 2006; Janjar, 2013; Magalhães et al., 2012; 2016; Rocha et al.,

2012; 2018; Silva et al., 2018; Marcolin e Calegari, 2020; Silva et al., 2020) (Figura 2a; 3a).

Posteriormente, selecionaram-se os atributos geomorfométricos: D, STI, TWI, MRVBF, MRRTF e IPR (Figura 2a) com a respectiva extração dos mesmos. Os arquivos *rasters* gerados foram importados para o software Arcgis 10.4, disponibilizado

pelo Laboratório de Cartografia e Geoprocessamento do Colegiado de Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná-Campus de Marechal Cândido Rondon. Com isso, seguiu-se com a discretização das classes de cada atributo geomorfométrico (Figura 3a).

Figura 1 - Localização da BP3 e da área do estudo no extremo oeste do estado do Paraná.

Os valores das classes dos atributos foram separados em intervalos sugeridos na literatura, conforme é apresentado na figura 3a. Sirtoli et al. (2008a; 2008b,) e Silveira et al. (2012) consideraram que os valores mais elevados de Declividade (classes entre 17% e 67%) e de STI (classes entre 0,14 e 0,7), figura 3a, indicam rejuvenescimento do solo. A Declividade < 17% favorece ao espessamento dos solos. Para a separação de setores hidromórficos, valores mais elevados de TWI (classes entre 9,9 e 11,9; Figura 3a) indicam áreas de hidromorfismo nas paisagens (Oliveira et al., 2014; Prates et al., 2012; Sirtoli et al., 2008a, 2008b). Por sua vez, os valores de MRVBF inferiores a 0,5 são considerados áreas de remoção de solos e aqueles > 0,5 são considerados setores de fundo de vale sujeitos à agradação (Gallant e Dowling, 2003). Ainda segundo estes autores, valores de MRRTF entre 2,5 e 3,5

são considerados topos planos. Por fim, Böhner e Selige (2006) sugerem que valores de IPR próximos a 0 indicam áreas de fundo de vale, enquanto que próximos a 1 estão associados aos setores de topo.

Após a discretização das classes dos atributos geomorfométricos, os arquivos foram reclassificados e suas respectivas classes foram identificadas conforme o processo pedogeomórfico que o atributo e suas classes representam (Figura 2; 3a), conforme segue: (1) Processos mistos (junção dos cinco processos subsequentes); (2) Hidromorfismo; (3) Acumulação; (4) Drenagem livre e fluxos verticais, (5) Drenagem livre e fluxos laterais; (6) Remoção de material e fluxos laterais (Figura 2a, 3a). Seguiu-se com a operação de análise geográfica, também no Arcgis (Figura 3a, Eq. 1). Obteve-se um arquivo de

com 6 classes (as UM) as quais foram atribuídas suas respectivas classes de solos,

1

Figura 2 – Representação da interação de processos pedogenéticos e atributos geomorfométricos na paisagem da área do estudo com base na relação solo-relevo. a) Processos pedogenéticos relacionados à gênese dos solos e a interação com os atributos geomorfométricos na BP3. Classes dos atributos e seus respectivos valores e a relação com os processos pedogeomórficos (lado direito da figura); b) blocos diagramas representando a espacialidade das classes dos atributos geomorfométricos na BP3; c e d) indicação de processos pedogeomórficos nos setores da paisagem da BP3.

considerando os processos pedogeomórficos que as classes 1, 2, 3, 4, 5 e 6 representam.

A validação das UM de solos geradas consistiu na verificação e aferição em campo de 170 pontos de observação e amostragem. Durante a validação de campo foram utilizados: trado holandês, enxada, fita métrica, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, carta de cores de solos (*Munsell Soil Color Charts*) e receptor GNSS (Sistema de Satélite para Navegação Global). Destes 170 pontos, foram validados 100 pontos a partir de perfis descritos/observados que constam na literatura regional (e.g., Embrapa, 1984; Magalhães et al., 2012; Rocha et al., 2012; Janjar, 2013; Calegari e Marcolin, 2015; Magalhães et al., 2016; Silva, 2017; Rocha et al., 2018; Silva et al., 2018; Silva e Calegari, 2019; Marcolin e Calegari, 2020; Silva et al., 2020).

Avaliação estatística

A avaliação da importância de cada variável na separação das UM deu-se a partir da Análise de Componentes Principais (ACP). Na ACP, cada componente (eixo) é gerado pela combinação da correlação entre as variáveis e são extraídos em ordem decrescente de importância, em termos de sua contribuição para a variação total dos dados. Comumente, os dois primeiros eixos explicam o comportamento dos dados (Gomes et al., 2004).

Inicialmente, organizou-se uma matriz com valores oriundos da tabulação cruzada entre os arquivos *rasters* dos atributos geomorfométricos e unidades de mapeamento. Os dados da matriz foram submetidos à análise estatística multivariada e os resultados apresentados na forma de gráfico de auto vetor, no software *Minitab 17*. O auto vetor é o valor que representa o peso de cada variável em cada componente

(eixos) e funciona como coeficientes de correlação, de modo que as variáveis com elevado auto vetor no primeiro eixo tendem

a ter auto vetor inferior no segundo eixo (Gomes et al., 2004).

1

Figura 3 – Síntese do roteiro metodológico para obtenção do mapa com as UM de solos. a) Etapas para a obtenção do mapa com as UM; b) equações envolvidas na obtenção dos atributos geomorfométricos.

Também foi avaliada a correspondência do mapa das UM com um mapa de solos oficial (EMBRAPA, 2018). Para tanto, realizou-se a tabulação cruzada entre estes mapas, no ArcGis 10.4. Os dados dessa tabulação foram organizados numa matriz de erros para determinar o percentual de acerto, Exatidão global (EG) entre os dois mapas, o percentual de Erros do Usuário (EU) e Erros do Produtor (EP) (Tabela 1, Eq. 9; 10). O EU reflete a taxa de acerto de correspondência entre os *pixels* da classe de solos do mapa gerado e esta mesma classe no mapa de referência. Quanto maior a taxa de

EU, menos erros de inclusão ocorrem. Os EP referem-se aos pixels das classes corretamente classificadas que, quanto menor a omissão de pixels de uma determinada classe, maior será o EP (Silveira, 2010).

Resultados e discussão

As UM e a relação com os atributos geomorfométricos

Os dados e informações sobre a distribuição espacial das classes de solos,

obtidos a partir dos atributos geomorfométricos avaliados na Bacia do Paraná 3, possibilitaram a obtenção de duas (02) unidades de mapeamento simples e três (03) formadas por associações de solos (Figuras 4, 7, 8), a saber: LATOSSOLO VERMELHO (LV); NITOSSOLO VERMELHO (NV); associação

NEOSSOLO REGOLÍTICO + NEOSSOLO LITÓLICO + CAMBISSOLO HÁPLICO (RR+RL+CX); associação GLEISSOLO HÁPLICO + NEOSSOLO FLÚVICO (GX+RY) e associação CAMBISSOLO HÁPLICO + NEOSSOLO REGOLÍTICO + GLEISSOLO HÁPLICO (CX + RR + GX).

Tabela 1 - Matriz de erros.

Matriz de Erros		Mapa produtor			
		X	Y	$\sum I(i)$	EP
Mapa referência	X	$m(i,i)$	...	...	...
	Y	...	$m(i,i)$	...	...
	$\sum c(i)$	...	...		
	EU	...	...	mt	EG = ...

$$EU = (m(i,i)/\sum c(i)) * 100$$

Eq. (9)

$$EP = (m(i,i)/\sum I(i)) * 100$$

Eq. (10)

$$EG = \sum mc/mt$$

Eq. (11)

EU – Ponto de vista do usuário; $m(i,i)$ - elementos da diagonal da linha (i) da matriz de erros; $\sum c(i)$ – Somatório da coluna; EP – Ponto de vista do produtor; $\sum I(i)$ - Somatório da linha; EG – Exatidão global; $\sum mc$ – Somatório de elementos da diagonal da linha (i) da matriz de erros corretamente classificados; mt – Total de elementos (pontos). **Fonte:** Adaptado de Silveira (2010).

A avaliação estatística das componentes principais (ACP, eixos 1 e 2 da Figura 5) indicaram 86% de correspondência entre as UM de solos e as classes dos atributos geomorfométricos.

A unidade dos LV, que representa uma área de 1.603,5 km² (21,2% de área), está atrelada aos setores de interflúvio e a alta vertente e setores de topo plano e suave ondulado, conforme já observado por Ghidin et al. (2006), Magalhães et al. (2012), Calegari e Marcolin (2015) e Marcolin e Calegari (2020). Os principais atributos que ajudaram a separar essa UM foram a Declividade e o MRRTF (Eixo 1, Figura 5). As classes com valores de Declividade < 5% e MRRTF entre 2,95 a 5,95 foram aquelas que contribuíram para a separação da UM dos LV. Esses resultados corroboram com os de Silveira et al. (2012) e Oliveira et al.

(2014), em que essas classes de atributos geomorfométricos refletem ambientes de interflúvios onde predomina a percolação hídrica ao longo do perfil (Assis et al., 2021), favorecendo a ocorrência de processos pedogenéticos relacionados a formação de Latossolos (Figura 6-a, b, c), conforme demonstrou estudo realizado por Nowatzki e Santos (2021), a partir do mapeamento de Latossolos e Argissolos no estado do Paraná.

A UM dos LV também correlacionou negativamente com os atributos TWI (>9,9), MRVBF (2,7 a 5,4), IPR (0 a 0,02), STI (0,14 a 0,7) e Declividade (> 17%). Estudo realizado por Liu et al. (2020) apontou que o índice TWI apresentou importante relação com áreas saturadas hidricamente, se opondo a ambientes favoráveis à gênese de Latossolos (Buol et al., 2011). No Eixo 2 (correlação

Figura 4 - Espacialização das UM nos quadrantes A, B, C, D, E, F, G, H, K, L, M e P nos setores norte e centro-leste da BP3.

Figura 5 - Análise de componentes principais dos atributos geomorfométricos e as UM de solos. a) Gráfico de auto vetores das variáveis e sua correlação com as UM de solos; b) representatividade percentual das UM em escala aproximada de 1:50.000.

negativa), os processos de agradação também se relacionaram à UM dos LV. A explicação para isto é que a condição geomórfica que propicia a agradação na paisagem é a presença de setores planos de áreas rebaixadas, que favorece o hidromorfismo, além da acumulação (Román Dobarco et al., 2021) de material com distintas granulometrias (Schaeztl, 2013) (Figura 6-i, j, k, l, m).

Com 3.701,3 km² (48,9%), a UM dos NV teve sua distribuição correlacionada aos processos mistos e às seguintes classes de atributos geomorfométricos: STI (0 a 0,14), TWI (2,2 a 9,9), MRRTF (0,5 a 2,9), MRVBF (0 a 2,7 e 5,4 a 6,8), IPR (0,02 a 1) e à boa drenagem com fluxos laterais (Declividade 5 a 17%). Tudo isso está comumente associado aos setores entre a alta e a baixa vertente, conforme verificado por Silva et al. (2018), favorecendo a ocorrência dos NV. Demattê et al. (2014) e Nowatzki et al. (2017) também constataram que a dinâmica que o fluxo hídrico adquire ao longo da vertente tem papel primordial para a ocorrência dos Nitossolos nos setores intermediários da vertente, uma vez que há uma mudança na inclinação nesses setores.

A UM referente à associação CX+RR+GX, com 1.142,8 km² (15,1% da área) teve sua separação influenciada pelas classes dos atributos MRVBF (2,7 a 5,4), tipicamente associada às áreas de acumulação (Dharumarajan et al., 2021), e IPR (0 a 0,02). Estas classes de atributos estão atreladas aos ambientes de agradação (Román Dobarco et al., 2021) de materiais removidos de setores a montante da vertente que se acumulam nos fundos de vale conforme sugerem Gallant e Dowling (2003) e McKenzie e Gallant (2007). No Eixo 2, os processos pedogenéticos de remoção foram os que mais se correlacionaram negativamente à UM do CX+RR+GX.

A UM com a associação RR+RL+CX (1032,7 km², 13,6% de área) correlacionou positivamente (Eixo 1 e 2) às condições pedogeomórficas de drenagem excessiva e remoção de material na vertente (Declividade > 17% e STI > 0,14). Assis et al. (2021) discutem que essas condições geomórficas favorecem o adelgaçamento dos solos, corroborando resultados apresentados por Souza Junior e Demattê (2008). De forma geral, esses resultados são concordantes com os resultados de Gallant e Dowling (2003), Ippoliti et al. (2005),

Mckenzie e Gallant (2007) e Demattê et al. (2014) ao relacionarem a ocorrência desses solos aos segmentos íngremes na vertente. Isso foi confirmado pela ACP, em que as condições de estabilidade são opostas a UM

RR+RL+CX, como verificado, também, por Silveira et al. (2012). De forma geral, as condições pedogeomórficas nos setores em que ocorre a UM da associação RR+RL+CX, contribuem para a redução da

Figura 6 – As Unidades de Mapeamento dos solos e a relação espacial com os atributos geomorfométricos. a) Blocos diagramas demonstrando a relação espacial entre as UM e os atributos geomorfométricos; b, c) perfis de Latossolos Vermelhos; d, e) perfis de Nitossolos Vermelhos; f) perfil de Cambissolo Háplico; g) perfil de Neossolo Litólico; h) perfil de Neossolo Regolítico; i) perfil de Cambissolo Flúvico em fundo de vale; j) amostras de Cambissolo Flúvico coletadas com trado holandês; k) amostras de Gleissolo Háplico coletadas com trado holandês; l, m) perfis de Gleissolos Háplicos.

pedogênese, favorecendo a morfogênese (Gerrard, 1993).

A associação de solos GX+CY representou a UM com menor percentual de ocorrência (93,8 km², 1,2% de área). Com base na ACP, a delimitação desta UM foi influenciada pelo TWI (valores > 9,9), representando condição de hidromorfia de solos (Goldman et al., 2020; Liu et al., 2020), também constatada por Prates et al. (2012). Destaca-se que, as classes dos atributos geomorfométricos IPR (< 0,02) e MRVBF (2,74 a 5,4) também contribuíram para a individualização dessa UM, pois refletem as condições de deposição e acumulação de material do solo ao longo do tempo, conforme discutem Gallant e Dowling (2003) e McKenzie; Gallant (2007). Ao mesmo tempo, a distribuição da UM dos GX+CY foi contrastante com a distribuição dos LV e NV (Eixo 1), pois a hidromorfia e agredação de material se opõem à ocorrência dos Nitossolos e Latossolos (Buol et al., 2011). No Eixo 2, ambientes de drenagem

excessiva na paisagem se correlacionaram negativamente à unidade dos GX+CY.

Avaliação das UM e o mapeamento da EMBRAPA (2018)

A exatidão global do mapa da Embrapa (2018) (Figura 9-a) com as UM foi de 0,46 (Tabela 2), taxa de exatidão inferior àquela obtida por Silveira et al. (2012), 0,66, e Silva et al. (2018), 0,69. Estes utilizaram metodologias semelhantes. As diferenças entre as escalas e o maior detalhamento da legenda de solos no mapa com as UM (Figura 9-a, b), em relação ao mapa da Embrapa (2018), devem ser consideradas ao avaliar a baixa taxa de exatidão global.

Os valores mais elevados de EU (Tabela 2) estiveram atrelados às unidades dos LV (75,7%), RR+RL+CX (51,0%) e NV (46,6%). Naquelas duas primeiras UM, mais de 50% dos pixels mapeados corresponderam com os pixels do mapa da Embrapa (2018). Por outro lado, a UM dos GX+CY teve a menor taxa de EU (0,38%).

Figura 7 - Espacialização das UM no quadrante O, Q, R, T, U, V, S, W, X, Y e Z no setor centro-sul da BP3.

Figura 8 - Espacialização das UM nos quadrantes I, J e N no setor oeste da BP3.

Destaca-se que a área dos Gleissolos no mapa da Embrapa foi subestimada, conforme foi verificado em campo, uma vez que a escala deste mapa é de 1:300.000. A UM dos CX+RR+GX não consta no mapeamento da Embrapa (2018), o que impossibilita a avaliação de sua

correspondência espacial entre os mapas avaliados. Os valores de EP foram em torno de 56,9% para NV, 44,5% para Neossolo, 36,0% para LV e 0,93% para Gleissolo. Novamente, ressalta-se que a baixa taxa de acerto está relacionada a diferença entre a escala dos mapas.

Tabela 2 – Matriz de erros entre os mapas de solos da BP3.

Matriz de erros		UM (Geomorfometria)						EP (%)
		RR+RL+CX	GX+CY	LV	NV	CX+RR+GX	Total	
Mapeamento EMBRAPA (2018)	Neossolo	528.215.127	2.633.211	24.419.895	401.387.702	230.012.499	1.186.668.436	44,51
	Gleissolo	2.676	320.339	12.909.074	12.926.920	8.203.914	34.362.925	0,93
	Latossolo	83.635.488	13.730.000	1.300.614.778	1.924.892.559	283.246.519	3.606.119.346	36,07
	Nitossolo	422.190.166	66.711.011	380.257.508	2.046.308.621	672.703.600	3.588.170.907	56,98
	-	-	-	-	-	-	-	-
	Total	1.034.043.459	83.394.563	1.718.201.256	4.385.515.804	1.194.166.532	Total pixel	EG
	EU (%)	51,08	0,38	75,70	46,61	0,00	8.415.321.617	0,46

EP-erros do produtor; EU-erros do usuário; G-exatidão global.

1

Validação de campo das UM

Dos 170 pontos verificados em campo, 133 corresponderam com a realidade de campo; outros 37 pontos não corresponderam com as UM no mapa, resultando em exatidão global de 0,80 (Tabela 3). Esta taxa de acerto é equiparável, de forma geral, aos trabalhos que se

apoiaram em técnicas relacionadas à Pedometria. Por exemplo, Chagas et al. (2017), que aplicaram três metodologias para elaborar o mapa digital de solos: Árvore de decisão, *Random forest* e Rede neural artificial, obtiveram índices Kappa de 0,66, 0,76 e 0,72, respectivamente. Goldman et al. (2020) alcançaram performance parecida

com estes autores, sendo 0,77, 0,73 e 0,68 para essas mesmas metodologias respectivamente. Silva et al. (2016), para

predizer a distribuição de Latossolos, obtiveram precisão de 0,78.

Figura 9 - Espacialização das UM na BP3, em diferentes escalas de mapeamento. a) Mapa com as UM; b) mapeamento da EMBRAPA (2018). Os pontos em vermelho nos dois mapas indicam os locais verificados em campo e levantados na literatura; c) percentual das classes mapeadas.

Tabela 3 - Matriz de Erros referente ao mapa de solos e validação de campo.

Matriz de Erros		Unidades de mapeamento identificadas					
		RR+RL+CX	GX + CY	LV	NV	CX+RR+GX	Tp
Realidade de Campo	RR+RL+CX	25,0	0,0	3,0	8,0	3,0	64,1
	GX+CY	0,0	18,0	4,0	1,0	0,0	78,3
	LV	0,0	0,0	36,0	9,0	0,0	80,0
	NV	0,0	0,0	2,0	24,0	2,0	85,7
	CX+RR+GX	0,0	0,0	0,0	5,0	30,0	85,7
	EU	100,0	100,0	80,0	51,1	85,7	Tp=170
	Tp	25,0	18,0	45,0	47,0	35,0	EG=0,80

EP-erros do produtor; EU-erros do usuário; Tp-total de pontos verificados; EG-exatidão global.

Destaca-se que o contexto paisagístico encontrado por esses autores, diversidade geológica principalmente, difere

da condição paisagística da região oeste paranaense. Sobre litologia complexa e relevo fortemente dissecado, Jeune et al.

(2018) obtiveram índice *Kappa* de 0,55 para *Random Forest* e de 0,33 para Regressão Logística Multinomial, ao realizarem o mapeamento digital de solos no Haiti. Meier et al. (2018) alcançaram acurácia global variando de 0,54 a 0,58 para o mapeamento de solos em setores dissecados e montanhosos no sudeste do Brasil.

A taxa de exatidão global está atrelada tanto aos elevados valores de EU (>80,0%), exceto para a UM dos NV que obteve 51,1% de acerto, quanto aos valores

de EP>80%. As unidades dos RR+RL+CX (100%), GX+CY (100%) e CX+RR+GX (85,7%) foram aquelas que apresentaram os maiores acertos para EU. Quando se compara estes resultados com o que se tem para a região, nota-se um avanço na taxa de acerto em relação a Silva et al. (2018). Isso pode ser explicado pelo fato dessas UM englobarem mais de um tipo de solo (associações), aumentando as chances de acerto, em contraponto às UM simples como as do LV e do NV.

Figura 10 – Exemplos de áreas que não corresponderam com a unidade mapeada. a) Área mapeada como LV. No centro da imagem ocorre hidromorfismo associado a depressão fechada que está inserida na UM dos LV; b) área mapeada como NV. Em campo foi constatada a ocorrência de GX; c) área mapeada como LV. No centro da imagem há um setor deprimido favorecendo a gleização do solo que está inserido na UM dos LV.

Por sua vez, a baixa taxa de acerto da UM dos NV pode ser explicada por ocorrer nos setores intermediários da vertente, onde podem ocorrer diversos processos pedogeomórficos (Demattê et al., 2014; Silva et al., 2018). Assim, 48,9% dos pontos verificados para a UM dos NV corresponderam aos solos das outras UM, principalmente aos Neossolos e

Cambissolos, conforme verificado em campo. Destaca-se que 09 pontos corresponderam aos LV. Estudos regionais têm demonstrando que ora os LV ocorrem até a baixa vertente; ora os NV avançam até os setores de topo (Magalhães et al., 2016; Silva et al., 2020), dificultando a separação dos limites entre estas duas classes de solos.

Taxas de acerto de EP foram predominantemente superiores a 80,0% (Tabela 3). No entanto, as associações RR+RL+CX e GX+CY (64,1 e 76,3%, respectivamente) obtiveram as taxas de EP mais baixas em relação às UM dos LV (80,0%), NV (85,7%) e CX+RR+GX (85,7%). Para a UM dos RR+RL+CX, 14 pontos verificados em campo não corresponderam no mapa, por vezes sendo atribuídas, no mapa, como LV (topos curtos e planos), NV (rupturas de declive) e solos atrelados aos ambientes de fundos de vale. A taxa de EP relacionada aos GX+CY teve 05 pontos mapeados como LV (04 pontos) e NV (01 ponto). Os LV ocorrem comumente em setores planos de topo, nos quais também ocorrem depressões fechadas (Silva et al., 2020), dominadas por processos de hidromorfismo, conforme apontaram Goldman et al. (2020) (Figura 10).

Considerações Finais

O uso de atributos geomorfométricos possibilitou identificar 05 unidades de mapeamento, tendo como parâmetro a taxa de Exatidão Global-EG (0,80), numa área com aproximadamente 7.500,0 km². Os resultados permitiram, também, aprimorar e detalhar as ocorrências das UM e seus limites espaciais na paisagem, demonstrando um avanço na escala de mapeamento, no número de classes de solos e UM identificadas em relação ao mapeamento da EMBRAPA (2018). Isso se deu unicamente a partir da relação estabelecida entre os processos pedogeomórficos e os atributos geomorfométricos analisados.

A elevada taxa de EG, que passa pela discretização das classes de cada atributo geomorfométrico estabelecido, demonstrou que os procedimentos metodológicos adotados neste estudo poderiam ser replicados para outras áreas com litologia homogênea. Pois, foi a relação solo-relevo o modelo conceitual que direcionou a separação dos atributos geomorfométricos e sua relação com os solos na paisagem regional.

Os resultados indicaram as seguintes relações entre as UM e os atributos geomorfométricos (Figuras 2, 3): Declividade e *Multiresolution Ridge Top Flatness Index* foram úteis para a delimitação de Latossolos (setores bem drenados e de topo); *Multiresolution Index of Valley Bottom*

Flatness e Índice de Posição Relativa contribuíram para a separação de solos associados aos fundos de vale (Gleissolos, Cambissolos e Neossolos); *Topographic Wetness Index* contribuiu para separar os setores hidromórficos/agradacionais (Gleissolos e solos com caráter flúvico); *Sediment Transport Index* e Declividade auxiliaram na separação de solos rasos, materiais sujeitos à remoção de material na vertente.

A incorporação dos índices *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* e Índice de Posição Relativa possibilitou separar os solos que ocorrem nos setores de fundo de vale e áreas com restrição de drenagem de forma mais coerente com o que foi constatado em campo (de taxa de acerto > 78,0%). Isso se configurou como um avanço metodológico em relação ao que se tem publicado para o oeste do Paraná, principalmente para o mapeamento de solos nos setores de fundo de vale. Por outro lado, para a identificação da distribuição espacial e transições laterais da UM dos Nitossolos Vermelhos, as classes dos atributos devem ser revistas ou mesmo se os atributos geomorfométricos utilizados são viáveis para o mapeamento desta unidade, considerando que a taxa de acerto obtida foi inferior a 50%.

Por fim, o mapa da distribuição de solos da BP3, apresentado neste artigo, poderá subsidiar trabalhos futuros voltados para o planejamento ambiental regional, com foco na conservação dos solos, com destaque para a separação de áreas impróprias à mecanização, onde predomina a saturação hídrica (solos hidromórficos) e aquelas com solos rasos. A realização de análises físicas e químicas dos solos mapeados também serão de fundamental importância para complementar os resultados até então alcançados. O aprimoramento da metodologia deverá ser uma etapa futura a ser considerada, buscando expandir a metodologia para áreas com litologia complexa.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, mediante à concessão de bolsa de mestrado para o primeiro autor, e

da UNIOESTE, instituição que disponibilizou a infraestrutura física.

Referências

- Abdelfattah, M. A., Pain, C. 2012. Unifying regional soil maps at different scales to generate a national soil map for the United Arab Emirates applying digital soil mapping techniques. *Journal of Maps*, 8(4), 392–405.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2012.746744>
- Adhikari, K., Minasny, B., Greve, M. B., Greve, M. H. 2014. Constructing a soil class map of Denmark based on the FAO legend using digital techniques. *Geoderma*, 214–215, 101–113.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.023>
- Arrouays, D., Poggio, L., Guerrero, O. A. S., Mulder, V. L. 2020. Digital Soil Mapping and GlobalSoilMap. Main Advances and Ways Forward. *Geoderma Regional* 21: 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00265>
- Assis, L. M., Francelino, M. R., Daher, M., Fernandes-Filho, E. I., Veloso, G. V., Gomes, L. C., Schaefer, C. E. G. R. 2021. Modeling regolith thickness in iron formations using machine learning techniques. *Catena*, 207, 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105629>
- Bade, M. R., Rocha, A. S., Cunha, J. E., Nóbrega, M. T. 2016. Geomorphological partitioning of Paraná III (Brazil/ Paraguay) hydrological basin. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(5), 1370–1383.
<https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160094>
- Bannari, A., Ghadeer, A., El-Battay, A., Hameed, N. A., Rouai, M. 2017. Detection of Areas Associated with Flash Floods and Erosion Caused by Rainfall Storm Using Topographic Attributes, Hydrologic Indices, and GIS. In S. Pirasteh & J. Li (Eds.), *Global Changes and Natural Disaster Management: Geo-information Technologies* (p. 228).
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-51844-2>
- Bellinaso, H., Silvero, N. E. Q., Ruiz, L. F. C., Accorsi Amorim, M. T., Rosin, N. A., Mendes, W. S., Demattê, J. A. M. 2021. Clay content prediction using spectra data collected from the ground to space platforms in a smallholder tropical area. *Geoderma*, 399, 1–18.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115116>
- Bhering, S. B., Santos, H. G., Manzatto, C. V., Bognola, I., Fasolo, P. J., Carvalho, A. P., Carvalho Junior, W. 2007. Mapa de Solos do Estado do Paraná. In Embrapa Solos
- Böhner, J., Selige, T. 2006. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *SAGA - Analysis and Modelling Applications*, 115, 13–27.
<https://doi.org/10.1186/1471-2288-4-5>
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., McDaniel, P. A. 2011. *Soil Genesis and Classification* (6a)
- Calegari, M. R., Marcolin, L. 2015. Relação Solo - Paisagem Na Bacia Da Sanga Matilde Cuê, Marechal Cândido Rondon (Pr). *Boletim de Geografia*, 32(3), 110.
<https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v32i3.18257>
- Cambule, A. H., Rossiter, D. G., Stoorvogel, J. J. 2013. A methodology for digital soil mapping in poorly-accessible areas. *Geoderma*, 192(1), 341–353.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.020>
- Carvalho Junior, W., Pereira, N. R., Fernandes Filho, E. I., Calderano Filho, B., Pinheiro, H. S. K., Chagas, C. S., Lawall, S. 2020. Sample design effects on soil unit prediction with machine: Randomness, uncertainty, and majority map. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 44, 1–21.
<https://doi.org/https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190120>
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L. 2013. Geomorphology Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31–41.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>
- Chagas, C. S., Pinheiro, H. S. K., Carvalho Junior, W., Anjos, L. H. C., Pereira, N. R., Bhering, S. B. 2017. Data mining methods applied to map soil units on tropical hillslopes in Rio de Janeiro, Brazil. *Geoderma Regional*, 9, 47–55.

- <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.03.004>
- Coelho, F. F., Giasson, E. 2010. Comparação de métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. *Ciência Rural*, 40(10), 2099–2106. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000156>
- Dalmolin, R. S. D., Caten, A., Dotto, A. C. 2017. Pedometria: uma breve contextualização nacional e mundial. *Boletim Informativo Da SBCS*, 43(3), 18–21
- Demattê, J. A. M., Demattê, J. L. I., Camargo, W. P., Fiorio, P. R., Nanni, M. R. 2001. Remote sensing in the recognition and mapping of tropical soils developed on topographic sequences. *Mapping Sciences and Remote Sensing*, 38(2), 79–102. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/07493878.2001.10642168>
- Demattê, J. A. M., Alves, M. R., Gallo, B. C., Fongaro, C. T. 2014. Detecção de limites de solos por dados espectrais e de relevo. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 38(3), 718–729. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300004>
- Demattê, J. A. M., Rizzo, R., Botteon, V. W. 2015. Pedological mapping through integration of digital terrain models spectral sensing and photopedology. *Revista Ciencia Agronomica*, 46(4), 669–678. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150053>
- Dharumarajan, S., Hegde, R., Lalitha, M. 2021. Modelling of soil depth and hydraulic properties at regional level using environmental covariates- A case study in India. *Geoderma Regional*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00439>
- Dobos, E., Hengl, T. 2009. Soil mapping applications. In Tomislav Hengl; H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: concepts, software, applications* (Vol. 33, p. 765). [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00020-2)
- EMBRAPA. 1984. Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná: Tomo I e II. In EMBRAPA - SNLCS/SUDESUL/IAPAR. Curitiba: EMBRAPA - SNLCS/SUDESUL/IAPAR
- EMBRAPA. 2018. Levantamento de reconhecimento dos solos dos municípios formadores da Bacia do Paraná 3 e do município de Palotina na escala 1:300.000 em 2018. Retrieved from GeoInfo-EMBRAPA website: http://geoinfo.cnpf.embrapa.br/layers/geonode%3Aunidadesmapeamento_bp3_wgs84_2#license-more-above
- Fragoso-Servón, P., Corona, A. P., Zúñiga, F. B., Zapata Buenfil, G. de J. 2017. Digital soil map of Quintana Roo, Mexico. *Journal of Maps*, 13(2), 449–456. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1328317>
- Gagkas, Z., Lilly, A., Baggaley, N. J. 2021. Digital Soil Maps Can Perform as Well as Large-Scale Conventional Soil Maps for the Prediction of Catchment Baseflows. *Geoderma* 400. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115230>
- Gallant, J. C., Austin, J. M. 2015. Derivation of terrain covariates for digital soil mapping in Australia. *Soil Research*, 53(8), 895–906. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1071/SR14271> Derivation
- Gallant, J. C., Dowling, T. I. 2003. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12). <https://doi.org/10.1029/2002WR001426>
- Gallant, J. C., Wilson, J. P. 2000. Secondary topographic attributes. In J. C. Gallant; J. P. Wilson (Eds.), *Terrain analysis: principles and applications* (p. 520). John Wiley & Sons, Inc
- Gerrard, J. 1993. Soil geomorphology - present dilemmas and future challenges. *Geomorphology*, 7(1–3), 61–84. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(93\)90012-Q](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90012-Q)
- Gessler, P. E., Moore, I. D., McKenzie, N. J., Ryan, P. J. 1995. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4), 421–432. <https://doi.org/10.1080/02693799508902047>
- Ghidin, A. A., Melo, V. F., Lima, V. C., Lima, J. M. J. C. 2006. Topossequências de latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I - Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos

- solos. R. Bras. Ci. Solo, 30(2), 307–319.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000200011>
- Giarola, N. F. B., Tormena, C. A., Dutra, A. C. 2007. Degradação física de um latossolo vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. R. Bras. Ci. Solo, 31(5), 863–873. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500004>
- Godoi, R. F., Rodrigues, D. B. B., Borrelli, P., Oliveira, P. T. S. 2021. High-Resolution Soil Erodibility Map of Brazil. Science of the Total Environment 781: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146673>
- Goldman, M. A., Needelman, B. A., Rabenhorst, M. C., Lang, M. W., McCarty, G. W., King, P. 2020. Digital soil mapping in a low-relief landscape to support wetland restoration decisions. Geoderma, 373, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.11442>
- Gomes, J. B. V., Curi, N., Motta, P. E. F., Ker, J. C., Marques, J. J. G. S. M., Schulze, D. G. 2004. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma Cerrado. R. Bras. Ci. Solo, 28(6), 137–153. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100014>
- Gomes, L. C., Faria, R. M., Souza, E., Veloso, G. V., Schaefer, C. E. G. R., Filho, E. I. F. 2019. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. Geoderma, 340, 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>
- Gray, J. M., Bishop, T. F. A., Yang, X. (2015). Pragmatic models for the prediction and digital mapping of soil properties in eastern Australia. Soil Research, 53(1), 24–42. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1071/SR13306>
- Hengl, T., MacMillan, R. A. 2009. Geomorphometry — A Key to Landscape Mapping and Modelling. In Developments in Soil Science: Vol. Volume 33 (pp. 433–460). [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00019-6](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00019-6)
- Hudson, B. D. (1992). The Soil Survey as Paradigm-based Science. Soil Sci. Soc. Am. J., 56, 836–841
- IBGE. 2012. Manual Técnico da Vegetação Brasileira: Sistema fitogeográfico; Inventário das formações florestais e campestres; Técnicas e manejo de coleções botânicas; Procedimentos para mapeamentos. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 271. <https://doi.org/ISSN 0101-4234>
- Ippoliti, G. A., Costa, L. M., Schaefer, C. E. G. R., Fernandes Filho, E. I., Gaggero, M. R. 2005. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedomorfismos em microbacia na região de Mar de Morros (MG). Revista Brasileira de Ciência do Solo, 29(3), 269–276
- Janjar, C. 2013. Variações morfopedológicas da unidade de paisagem de bela vista, município de Marechal Cândido Rondon – PR. Geografia Em Questão, 6(2), 221–234
- Jeune, W., Francelino, M. R., Souza, E., Fernandes Filho, E. I., Rocha, G. C. 2018. Multinomial logistic regression and random forest classifiers in digital mapping of soil classes in western Haiti. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 42, 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170133>
- Kempen, B., Brus, D. J., Stoorvogel, J. J., Heuvelink, G. B. M., Vries, F. 2012. Efficiency Comparison of Conventional and Digital Soil Mapping for Updating Soil Maps. Soil Science Society of America Journal, 76(6), 2097. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0424>
- Khan, U., Sharma, A., Tuteja, N. K. 2020. A new approach for delineation of hydrologic response units in large catchments. 18th World IMACS Congress and MODSIM 2009 - International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, Proceedings, (January), 3521–3527
- Lacerda, M. P. C., Barbosa, I. O., Meneses, P. R., Wilson, J., Roig, H. L. 2005. Aplicação de Geotecnologias em correlações entre solos, geomorfologia, geologia e vegetação nativa no Distrito Federal, DF. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2211–2218
- Lepsch, I. F. 2017. Pedometria, mapas digitais e convencionais de solos e os modelos conceituais solo-paisagem. Boletim Informativo da SBCS, 43(3), 16–17

- Liu, F., Rossiter, D. G., Zhang, G. L., Li, D. C. 2020. A soil colour map of China. *Geoderma*, 379, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114556>
- Magalhães, V. L., Cunha, J. E. 2006. O solo como base da sustentabilidade agrícola: estudo de caso no município de Marechal Cândido Rondon-PR. *RA'E GA - O Espaço Geográfico Em Análise*, 10(12), 179–193
- Magalhães, V. L., Cunha, J. E., Nóbrega, M. T. 2016. Caracterização Morfopedológica de Unidades de Paisagem do Extremo Oeste do Paraná. *Perspectiva Geográfica*, 11(15), 245–253
- Magalhães, V. L., Nóbrega, M. T., Cunha, J. E. 2012. Transformações pedológicas no platô de Marechal Cândido Rondon (PR). *Revista Ambiência*, 8(Especial 1), 633–649. <https://doi.org/10.5777/ambiencia.2012.03.02>
- Maleki, S., Khormali, F., Mohammadi, J., Bogaert, P., Bodaghabadi, M. B. 2020. Effect of the Accuracy of Topographic Data on Improving Digital Soil Mapping Predictions with Limited Soil Data: An Application to the Iranian Loess Plateau. *Catena* 195: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104810>
- Marcolin, L., Calegari, M. R. 2020. Atributos químicos, físicos e mineralogia de Latossolos e sua relação com a paisagem no oeste do Paraná. *Revista do Departamento de Geografia - USP*, 39, 48–61. <https://doi.org/10.11606/rdg.v39i0.158400>
- Martinez-Graña, A. M., Goy, J. L., Zazo, C. 2015. Dominant soil map in ‘Las Batuecas-Sierra De Francia’ and ‘Quilamas’ nature parks (Central System, Salamanca, Spain). *Journal of Maps*, 11(3), 371–379. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2014.960014>
- McBratney, A. B., Odeh, I. O. A., Bishop, T. F. A., Dunbar, M. S., Shatar, T. M. 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 97(3–4), 293–327. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00043-4)
- Mckenzie, N. J., Gallant, J. C. 2007. Digital Soil Mapping with Improved Environmental Predictors and Models of Pedogenesis. In P. Lagacherie, A. B. McBratney, M. Voltz (Eds.), *Developments in Soil Science* (Vol. 31, pp. 327–349). [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(06\)31024-0](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31024-0)
- Mehnatkesh, A., Ayoubi, S., Jalalian, A., Sahrawat, K. L. 2013. Relationships between soil depth and terrain attributes in a semi arid hilly region in western Iran. *Journal of Mountain Science*, 10(1), 163–172. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2427-9>
- Meier, M., de Souza, E., Francelino, M. R., Fernandes Filho, E. I., Schaefer, C. E. G. R. 2018. Digital soil mapping using machine learning algorithms in a tropical mountainous area. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 42, 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170421>
- Miller, B. A., Schaetzl, R. J. 2016. History of soil geography in the context of scale. *Geoderma*, 264, 284–300. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.041>
- MINEROPAR. 2013. O Grupo Serra Geral no estado do Paraná: mapeamento geológico na escala de 1:250.000 (I e II). In E. A. et al. Arioli (Ed.), *Mineropar* (1a, Vol. 1 e 2). Curitiba: Mineropar
- Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A., Peterson, G. A. 1993. Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2), NP. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.572NPb>
- Morais, V. A., Ferreira, G. W. D., de Mello, J. M., Silva, C. A., de Mello, C. R., Araújo, E. J. G., Scolforo, J. R. S. 2020. Spatial distribution of soil carbon stocks in the Cerrado biome of Minas Gerais, Brazil. *Catena*, 185(May 2019), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.10428>
- Mulder, V. L., de Bruin, S., Schaepman, M. E., Mayr, T. R. 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping - A review. *Geoderma*, 162(1–2), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.018>
- Nowatzki, A., Santos, L. J. C., Silveira, C. T. 2017. Potencialidade do Índice de Posição Topográfica no Mapeamento Pedológico Preditivo em uma Sub-Bacia

- do Rio Capricórnio-PR. Geography Department University of Sao Paulo, 34, 10.
<https://doi.org/10.11606/rdg.v34i0.130727>
- Nowatzki, A., Santos, L. J. C. 2021. Integration of topographic attributes in the application of logistic regressions in digital soil mapping in low relief areas in the northwestern region of Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 22(4), 730–746.
<https://doi.org/10.20502/RBG.V22i4.1797>
- Olaya, V. 2009. Basic land-surface parameters. *Developments in Soil Science*, 33(C), 141–169. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00006-8)
- Oliveira, J. C., Melo, V. F. de, Souza, L. C. de P., Rocha, H. O. 2014. Terrain attributes and spatial distribution of soil mineralogical attributes. *Geoderma*, 213(January), 214–225.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.020>
- Oliveira, P. A., Hayakawa, E. H., Silva, B. A. 2017. Potencial erosivo em micro bacia do Rio São Francisco Verdadeiro em Marechal Cândido Rondon – PR. *Anais - II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia*
- PARANÁ. 2013. Bacias Hidrográficas do Parana: Série Histórica. In SEMA - Governo do Estado do Paraná. Curitiba: SEMA - Governo do Estado do Paraná
- Pike, R. J., Evans, I. S., Hengl, T. 2009. Geomorphometry: A Brief Guide. In Tomislav Hengl; H. I. Reuter (Eds.), *Developments in Soil Science - Geomorphometry Concepts, Software, Applications* (p. 765). Amsterdam: Elsevier
- Pinheiro, H. S. K., Carvalho Junior, W., Chagas, C. D. S., Anjos, L. H. C., Owens, P. R. 2018. Prediction of topsoil texture through regression trees and multiple linear regressions. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42, 1–21.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170167>
- Poppiel, R. R., Demattê, J. A. M., Rosin, N. A., Campos, L. R., Tayebi, M., Bonfatti, B. R., Rahmati, M. 2021. High resolution middle eastern soil attributes mapping via open data and cloud computing. *Geoderma*, 385, 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114890>
- Prates, V., Souza, L. C. P., Oliveira Junior, J. C. 2012. Índices Para a Representação Da Paisagem Como Apoio Para Levantamento Pedológico Em Ambiente De Geoprocessamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(4), 408–414.
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400011>
- Rocha, A. S., Cunha, J. E., Martins, V. M. 2012. Relações morfopedológicas nos setores de fundos de vale da bacia hidrográfica do córrego Guavirá, Marechal Cândido Rondon-PR. *Boletim de Geografia*, 30(2), 99–110.
<https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v30i2.15057>
- Rocha, A. S., Nóbrega, M. T., Cunha, J. E. 2018. As unidades de paisagem, as vertentes características e os sistemas pedológicos na bacia hidrográfica do Paraná 3. *Ateliê Geográfico*, 12(1), 51–70
- Román Dobarco, M., McBratney, A., Minasny, B., Malone, B. 2021. A modelling framework for pedogenon mapping. *Geoderma*, 393, 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115012>
- Rossel, R. A. V., Chen, C., Grundy, M. J., Searle, R., Clifford, D., Campbell, P. H. 2015. The Australian three-dimensional soil grid: Australia's contribution to the GlobalSoilMap project. *Soil Research*, 53(8), 845–864.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1071/SR14366>
- Santos, L. J. C., Oka-Fiori, C., Canali, N. E., Fiori, A. P., Silveira, C. T., Silva, J. M. F., Ross, J. L. S. 2006. Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 7(2), 3–12
- Schaetzl, R. J. 2013. Catenas and Soils. In J. Shroder; G. A. Pope (Eds.), *Treatise on Geomorphology - Weathering and Soils Geomorphology* (Vol. 4, pp. 145–158).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00074-9>
- Searle, R., McBratney, A., Grundy, M., Kidd,

- D., Malone, B., Arrouays, D., Andrews, K. 2021. Digital soil mapping and assessment for Australia and beyond: A propitious future. *Geoderma Regional*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00359>
- Silva, B. A. 2017. Mapeamento Convencional e Digital de Solos na Folha Topográfica de Marechal Cândido Rondon - PR - Brasil. UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon
- Silva, B. A., Calegari, M. R. 2019a. Atualização do Mapa de Solos na Bacia do Paraná 3: Estudo de Caso das Sub-bacias Hidrográficas dos Rios São Francisco Verdadeiro e São Francisco Falso. *Perspectiva Geográfica*, 14(20), 48–58
- Silva, B. A., Calegari, M. R. 2019b. Identificação de superfícies geomórficas nas bacias hidrográficas dos rios São Francisco Verdadeiro e São Francisco Falso, Oeste do Paraná. In L. de S. Pinheiro; A. Goraybe (Eds.), *Geografia Física e as Mudanças Globais*. Fortaleza - CE: Editora UFC
- Silva, B. A., Hayakawa, E. H., Martins, V. M. 2020. Relação Solo-Relevo no Oeste do Paraná, Estudo de Caso: Folha Topográfica de Marechal Cândido Rondon. *Rev. Bras. Geomorfol.*, 21(1), 45–62
- Silva, B. A., Martins, V. M., Macedo, R. S., Hayakawa, E. H. 2018. Mapeamento Digital de Solos e os Atributos Topográficos das Vertentes no Alto Curso da Sub-Bacia Hidrográfica do córrego Quatro Pontes, PR–Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(4), 817–886. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1385>
- Silva, B. A., Calegari, M. R., Pinheiro, M. R., Fujita, R. H. 2021. Lithostructural and tectonic determinants in the geomorphic evolution of the Basalt Plateau – Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 110, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103351>
- Silva, S. H. G., Poggere, G. C., de Menezes, M. D., Carvalho, G. S., Guilherme, L. R. G., Curi, N. 2016. Proximal sensing and digital terrain models applied to digital soil mapping and modeling of Brazilian Latosols (Oxisols). *Remote Sensing*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/rs8080614>
- Silveira, C. T. 2010. Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: integração de atributos topográficos em sistemas de informações geográficas e redes neurais artificiais. Universidade Federal do Paraná
- Silveira, C. T., Oka-Fiori, C., Santos, L. J. C., Sirtoli, A. E., Silva, C. R. 2012. Pedometria apoiada em atributos topográficos com operações de tabulação cruzada por álgebra de mapas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13(2), 125–137. <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i2.180>
- Silvero, N. E. Q., Demattê, J. A. M., Vieira, J. de S., Mello, F. A. de O., Amorim, M. T. A., Poppiel, R. R., Bonfatti, B. R. 2021. Soil property maps with satellite images at multiple scales and its impact on management and classification. *Geoderma*, 397, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115089>
- Sirtoli, A. E., Silveira, C. T., Mantovani, L. E., Sirtoli, A. R. A., Oka-Fiori, C. 2008a. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. *Scientia Agraria*, 9(3), 317–329
- Sirtoli, A. E., Silveira, C. T., Silva, C. R., Mantovani, L. E., Ribeiro, S. R. A., Oka-Fiori, C. 2008b. Atributos topográficos secundários no mapeamento de pedoformas. *Geociencias (UNESP, Sao Paulo)*, 27(1), 63–77
- Sothe, C., Gonsamo, A., Arabian, J., Snider, J. 2022. Large scale mapping of soil organic carbon concentration with 3D machine learning and satellite observations. *Geoderma*, 405, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115402>
- Souza Junior, J. G. A., Demattê, J. A. M. 2008. Modelo digital de elevação na caracterização de solos desenvolvidos de basalto e material arenítico. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 32(1), 449–456. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100043>
- Tarolli, P., Calligaro, S., Cazorzi, F., Fontana, G. D. (2017). Recognition of surface flow processes influenced by roads and trails

- in mountain areas using high- resolution topography. *European Journal of Remote Sensing* ISSN:, 46(1), 176–197. <https://doi.org/https://doi.org/10.5721/EuJRS20134610>
- Tarolli, P., Sofia, G. 2020. Remote sensing for the analysis of anthropogenic geomorphology: Potential responses to sediment dynamics in the agricultural landscapes. In P. Tarolli & S. M. Mudd (Eds.), *Developments in Earth Surface Processes - Remote Sensing of Geomorphology* (Volume 23, pp. 1689–1699). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- USGS. 2019. EarthExplorer. U.S. Geological Survey website: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Zeraatpisheh, M., Jafari, A., Bagheri Bodaghabadi, M., Ayoubi, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Toomanian, N., Xu, M. 2020. Conventional and digital soil mapping in Iran: Past, present, and future. *Catena*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104424>
- Zhang, L., Yang, L., Cai, Y., Huang, H., Shi, J., Zhou, C. 2022. A multiple soil properties oriented representative sampling strategy for digital soil mapping. *Geoderma*, 406, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115531>
- Wilson, J. P., Gallant, J. C. 2000. Digital Terrain Analysis in Terrain Analysis: Principles and Applications. In J. P. Wilson & J. C. Gallant (Eds.), *Terrain analysis: principles and applications* (p. 520). John Wiley & Sons, Inc.