



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 15, nº 1 (2014)



EMPREGO DE TÉCNICAS DE INFERÊNCIA ESPACIAL PARA IDENTIFICAÇÃO DE UNIDADES DE RELEVO APOIADO EM ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS E ÁRVORE DE DECISÃO

SPATIAL INFERENCING TECHNIQUES TO IDENTIFY LANDFORM UNITS, SUPPORTED BY TOPOGRAPHICAL ATTRIBUTES USING A DECISION TREE

Ricardo Michael Pinheiro Silveira

*Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná
Rua Cel. Francisco H. dos Santos S/N. CEP: 81531980 - Jardim das Américas, Curitiba, PR - Brasil
E-mail: ricardomichael@ufpr.br*

Claudinei Tabora da Silveira

*Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná
Rua Cel. Francisco H. dos Santos S/N. CEP: 81531980 - Jardim das Américas, Curitiba, PR - Brasil
E-mail: claudineits@ufpr.br*

Chisato Oka-Fiori

*Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná
Rua Cel. Francisco H. dos Santos S/N. CEP: 81531980 - Jardim das Américas, Curitiba, PR - Brasil
E-mail: chisato@ufpr.br*

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
02/07/2013
Data de Aprovação:
26/12/2013

Palavras-chave:

Análise Digital do Relevo;
Mapeamento Geomorfológico;
MDE SRTM90.

Keywords:

Digital Terrain Analysis;
Geomorphological Mapping;
DEM SRTM90.

Resumo:

A identificação e representação das formas do relevo é de grande importância para alicerçar ações de planejamento e gestão ambiental e territorial, sendo o mapeamento geomorfológico um importante instrumento de apoio. A demanda por cartografia geomorfológica é crescente, no entanto métodos convencionais são onerosos, de elevado custo pois envolvem extensos trabalhos de campo e complexa subjetividade na determinação das feições do relevo. Devido ao avanço das geotecnologias e informática aplicadas no campo da geomorfologia, é crescente o uso de técnicas de inferência espacial para identificação de distintas unidades do relevo, apoiada na análise digital do relevo. Nesse sentido, visando contribuir com o avanço de método e técnicas de mapeamento digital do relevo, o presente trabalho apresenta o experimento que identificou unidades morfológicas apoiando-se em atributos topográficos derivados do MDE SRTM90 no Estado do Paraná. As variáveis empregadas foram: declividade, plano de curvatura e acumulação do fluxo. Baseia-se na proposta de mapeamento automatizado de Iwahashi e Pike (2007), que consiste na classificação não-supervisionada das formas do terreno utilizando uma árvore de decisões com base nos valores médios,

que resultou em 18 classes. A validação da proposta de mapeamento automatizado se consolidou em duas etapas principais: verificação em campo com 36 pontos de controle e comparação com o Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná pautada na quantificação dos resultados obtidos, que evidenciaram a possibilidade de avançar na questão de taxonomia do relevo utilizando o modelo como referência. A proposta se mostrou eficaz, exequível e com grande aplicabilidade, constatando o potencial de uso dos dados SRTM90 e seus subprodutos, aliado às técnicas de SIG e geoprocessamento, na identificação de formas do relevo.

Abstract:

The identification and representation of landforms is of great importance in environmental and territorial planning and management, with geomorphic mapping an important support tool in this task. The demand for geomorphic cartography is growing, even though conventional methods are costly, as they involve extensive field work and complex subjectivity in the determination of landform features. Owing to advances in geotechnology and applied informatics in the field of geomorphology, the use of spatial inferencing techniques to identify distinct landform units is growing, supported by digital landform analysis. In this sense, aiming to contribute to the advancement of methods and techniques in digital landform mapping, this paper presents an experiment to identify morphological units supported by topographic attributes derived from DEM SRTM90 in the state of Paraná, southern Brazil. The variables utilized were: slope, plan curvature and flow accumulation. The work stems from Iwashashi and Pike's (2007) proposal for automated mapping, and consists of the unsupervised classification of landforms using a decision tree based on average values, resulting in 18 classes. Validation of the proposed automated mapping was consolidated in two main stages: field verification with 36 control points, and comparison with the Geomorphological Mapping of the State of Paraná, based on quantification of the results, which showed the possibility of progress on the issue of landform taxonomy using the model as a reference. The proposal was effective, feasible and has wide applicability, noting the potential use of SRTM90 data and its by-products, coupled with GIS and geoprocessing techniques in the identification of landforms.

Introdução

A cartografia das múltiplas variáveis que compõe o meio físico-natural é de elevada importância para alicerçar ações de planejamento ambiental, dentre essas variáveis uma de destaque são as formas do relevo, que potencializam o entendimento dos processos atuantes na paisagem e, desse modo, possuem grande potencial no apoio ao processo de ocupação e gestão do uso da terra, como um instrumento auxiliar no planejamento físico-ambiental.

No cenário brasileiro existe grande demanda e carência por mapas geomorfológicos. Isso se deve às diversas variáveis envolvidas no seu processo de elaboração: falta de cartas topográficas em escala compatível e com ampla abrangência de todo território nacional, a grande extensão de áreas a serem mapeadas, a dificuldade de acesso em muitas regiões, o elevado custo dos levantamentos, entre diversos outros fatores.

Porém, os atuais avanços e desenvolvimento no campo da informática, associada ao avanço das geotecnologias, potencializam o emprego de

técnicas digitais na análise do relevo, apoiadas na representação da superfície terrestre na forma de Modelos Digitais Numéricos (MDN), Modelos Digitais do Terreno (MDT) ou Modelos Digitais de Elevação (MDE), que permitem extrair variáveis que representam a morfologia do relevo e podem contribuir com o avanço da cartografia geomorfológica. Esse campo do conhecimento vem sendo designado de geomorfometria (WOOD, 1996 e 2009).

A geomorfometria é definida como a ciência da análise quantitativa da superfície terrestre (PIKE, 2000), uma moderna abordagem analítico-cartográfica para representar a topografia da Terra (TOBLER, 2000) e também um campo interdisciplinar que envolve a matemática, as geociências e, mais recentemente, a ciência da computação (PIKE *et al.*, 2008).

Seu emprego permite a parametrização da morfologia do relevo por meio de técnicas empregadas nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), no processo de extração de atributos quanti-

tativos da topografia de um MDT (HENGL, 2003) de forma contínua (WOOD, 1996). Esses atributos que representam mensurações quantitativas das formas do relevo recebem distintas designações na literatura, como atributos topográficos (MOORE *et al.*, 1991 e 1993; WILSON E GALLANT, 2000; CHAGAS, 2006; SILVEIRA, 2012; SILVEIRA *et al.*, 2012 e 2013), parâmetros das formas do relevo (SPEIGHT, 1968), variáveis morfométricas (SHARY *et al.*, 2002), variáveis geomorfométricas (MUÑOZ, 2009; BISPO *et al.*, 2009), informações do terreno (MARTINONI, 2002), atributos do terreno (PENNOCK, 2003; CÁTEN, 2009), atributos geomorfométricos (SCHMIDT E DIKAU, 1999), atributo do relevo (IPPOLITI *et al.*, 2005; SIRTOLI *et al.*, 2008), dentre outras. Portanto optou-se no presente trabalho utilizar a designação de atributos topográficos para as informações derivadas do MDT.

Nessa perspectiva, o desenvolvimento das geotecnologias nas últimas décadas propicia a busca de novas alternativas que deem suporte à identificação e caracterização de unidades homogêneas do relevo apoiadas em técnicas de inferência espacial.

Desse modo, o presente trabalho apresenta a classificação morfológica do relevo apoiado na análise digital do terreno, utilizando dados do MDE SRTM90 como alternativa para mapeamentos automatizados. Utilizou-se de técnica de classificação apoiada em árvore de decisão com uso de três variáveis geomorfométricas: declividade, plano de curvatura e acumulação de fluxo. O recorte geográfico adotado foi o estado do Paraná, contemplando a escala cartográfica de 1:100.000.

Materiais e métodos

A inferência de unidades apoiada no mapeamento automatizado do relevo segue a proposta de Iwahashi e Pike (2007), que emprega técnica de classificação não-supervisionada de formas do terreno por meio de árvore de decisões com base nos valores médios (geral, da metade inferior e do quarto inferior) de três variáveis geomorfométricas derivadas de um MDE.

O método se apoia no conceito de assinatura geométrica, que de acordo com Pike (1988) é um conjunto de medidas que descrevem formas topo-

gráficas bem o suficiente para distinguir paisagens geomorfologicamente distintas. Para discriminar efetivamente as formas da superfície e tipos de terreno, os constituintes de uma assinatura devem descrever importantes atributos das formas topográficas e utilizar diferentes valores como parâmetro em toda a gama de feições da superfície observadas.

As etapas operacionais feitas com auxílio de ferramentas de geoprocessamento em ambiente SIG foram: a) obtenção do MDE; b) geração dos atributos topográficos do relevo; c) cálculo dos valores médios para discretização das variáveis e operações de álgebra de mapas para as combinações; d) organização e quantificação dos resultados obtidos pela matriz.

Na primeira etapa os dados de elevação foram obtidos do MDE SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), versão 2, com a resolução espacial de 3 arcos de graus, reamostrada para 90 metros. Seguidamente, desse MDE foram gerados os atributos topográficos do relevo com janelas móveis 3x3 no *software ArcGIS 10* (ESRI, 2010). Para a obtenção da declividade utilizou-se das derivadas direcionais e do modelo proposto por Horn (1981), para o plano de curvatura foi adotado o modelo proposto por Zevenbergen e Thorne (1987) e para a acumulação de fluxo o algoritmo D8, proposto por O'Callaghan e Mark (1984), que considera uma direção única de fluxo na análise de 8 vizinhos.

A etapa seguinte consistiu em calcular os respectivos valores dos três atributos topográficos: média geral, média da metade inferior e média do quarto inferior. Esses valores são fundamentais para determinar as distintas classes do terreno, uma vez que representem as zonas limítrofes do particionamento de cada variável que, combinadas, resultam em matrizes de 8, 12 ou 16 classes.

Esse processo foi realizado por uma árvore de decisões, onde cada um dos três limiares determina as possibilidades de particionamento (Figura 1). Se apenas a média geral for considerada, a matriz resultante será particionada em 8 classes; se além da média geral a média da metade inferior for ponderada, o particionamento é feito em 12 classes; e, por fim, se além destas duas a média do quarto inferior também for considerada, o resultado é uma

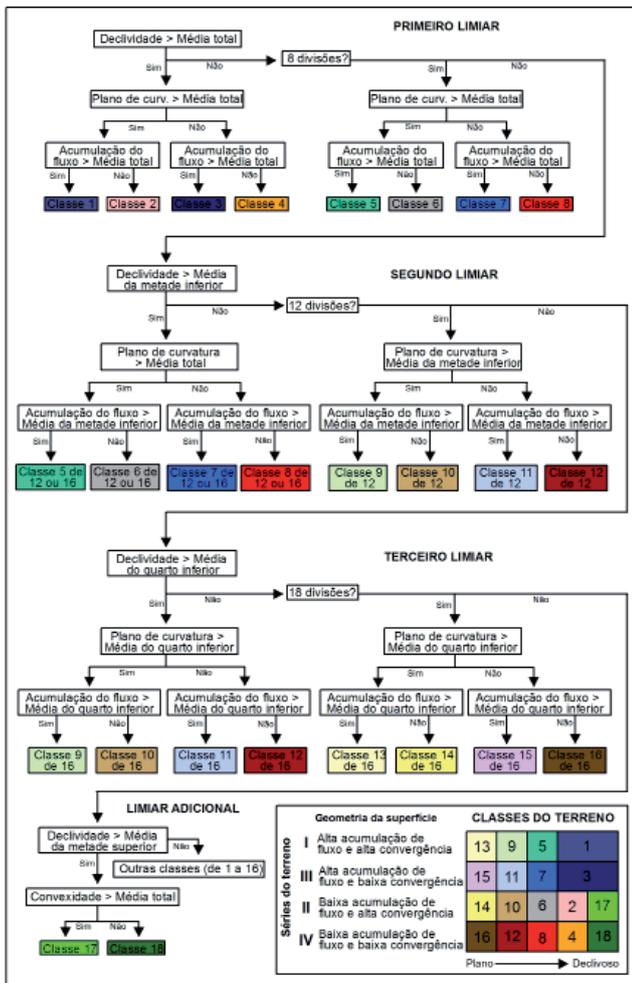


Figura 1 – Árvore de decisões empregada na definição de distintas classes do terreno.

matriz com 16 classes.

Originalmente a proposta de Iwahashi e Pike (2007) considerou apenas 8, 12 ou 16 classes no resultado final. Porém, devido às especificidades do relevo paranaense, foi calculado, unicamente para a declividade, o valor da média superior com o intuito de evidenciar as rupturas de declive de importantes unidades geomorfológicas paranaenses, como a Serra do Mar, cuja declividade apresenta transição abrupta entre o terço superior (formado por rachas mais resistentes) e o terço médio das vertentes (constituído por depósitos coluviais), e o *front* das escarpas nas *cuestas* paranaenses. Esse acréscimo resultou em duas classes adicionais de relevo, considerando o valor da média superior da declividade, a média geral do plano de curvatura e valores acima da média do quarto inferior da acumulação de fluxo.

Com base nesses parâmetros os atributos topo-

gráficos foram discretizados em quatro classes, nas variáveis plano de curvatura e acumulação de fluxo, e cinco na declividade. A combinação das variáveis discretizadas resultou em 80 combinações distintas (4x4x5), que foram reagrupadas de acordo com a proposta de particionamento do relevo em 18 classes, conforme parâmetros da árvore de decisões.

Após a combinação dos atributos topográficos, a etapa posterior se pautou nas questões referentes à simbologia, legendas e representação cartográfica dos resultados obtidos. Originalmente Iwahashi e Pike (2007) propuseram cores específicas para cada classe mapeada com base no trabalho pioneiro de Hammond (1964). Porém, devido às diferenças dos valores médios entre as duas áreas, foi constatado que as cores predeterminadas dificultam a leitura do produto final, sendo necessário redefini-las.

Na matriz de 18 classes, as respectivas cores foram redefinidas com base nos seguintes critérios: a) distinção visual, com a escolha de cores que proporcionem rápida assimilação dos diferentes elementos; b) interpretação das classes de terreno de acordo com suas características geométricas; c) proposta de cores de mapeamentos geomorfológicos que compreendem a área de estudo. A Figura 2 traz uma comparação entre a representação original (A) e a proposta modificada para o presente trabalho (B).

Com o intuito de validar os resultados obtidos, o controle de campo surge como importante etapa de apoio à identificação das limitações e potencialidades do modelo. Ao todo foram registrados 36 pontos de controle em todos os grandes

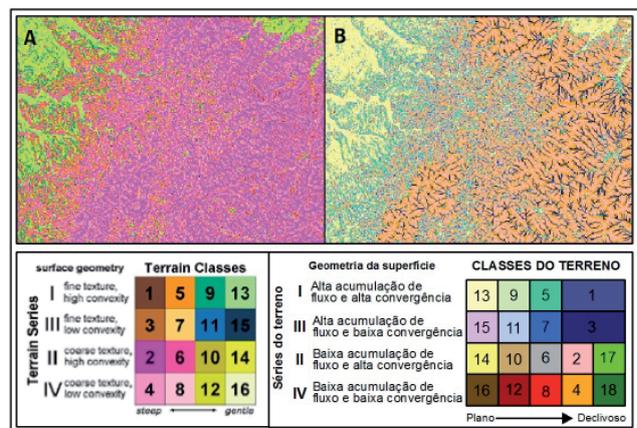


Figura 2 – Comparação entre a proposta de simbologia original (A) e a modificada (B).

compartimentos geomorfológicos do Paraná, com predominância na Planície Litorânea, Serra do Mar e Primeiro Planalto. Os pontos foram coletados por um receptor GPS (Sistema de Posicionamento Global) de navegação.

A comparação foi feita por meio de um quadro que contém informações referentes à localização dos pontos de controle, às classes de relevo (particionamento de 18 classes) e à verificação realizada *in loco*. Dada a subjetividade da análise visual para definir precisamente as características geométricas de determinada feição observada, em campo cada atributo topográfico foi analisado separadamente com três opções de equiparação aos valores obtidos pelo modelo: alta, média e baixa.

Resultados e discussões

Foram obtidos quatro conjuntos de unidades morfológicas, compostas por 8, 12, 16 e 18 classes de relevo. A última se mostrou a mais adequada, apoiando-se na avaliação comparativa com as unidades do Mapeamento geomorfológico do estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006; OKA-FIORI *et al.*, 2006) e na validação por controle de campo.

A delimitação de oito classes, que considerou apenas os valores médios gerais, mostrou-se pouco representativa devido à classificação binária dos atributos topográficos (Figura 3).

Nesse caso, embora os fundos de vale estejam bem evidenciados na classificação, as formas de vertente associadas aos valores de curvatura horizontal não obtiveram representação satisfatória, pois apresentou ruídos de pixel nas unidades, devido a valores espúrios, que dificultam a leitura, análise e quantificação do produto final.

Em relação à dissecação do relevo, destacaram-se dois grandes grupos, vinculados à média da declividade: uma com as áreas de maior dissecação, representado, sobretudo, pelas classes 2 e 4, e outra com áreas menos dissecadas, enfatizadas pelas classes 6 e 8. Esse foi um fator limitante no particionamento em 8 classes, pois o modelo não permitiu identificar planícies, escarpas e demais feições com variação abrupta na declividade.

Referente à classificação do conjunto compos-

to por doze classes, a discretização dos valores médios da metade inferior, resultou em quatro classes de relevo adicionais, que conferiu maior detalhe na separação de distintas unidades morfológicas (Figura 4). Esse acréscimo permitiu identificar as áreas de planícies do estado do Paraná, apesar dos limites se mostrarem pouco precisos. Quanto aos talwegues e formas de vertente, a combinação proporcionou a distinção entre o grau de entalhamento dos fundos de vale, bem como melhor distinção entre vertentes convergentes e divergentes. Constatou-se que para escalas regionais ou caracterizações geomorfológicas preliminares, com número reduzido de variáveis e informações, o particionamento em doze classes apresentou resultados mais satisfatórios em relação às oito classes, anteriormente obtidas, porém foi verificado omissão e/ou generalização de importantes feições do relevo.

Com o acréscimo das classes discretizadas dos valores médios do quarto inferior para os atributos topográficos, a árvore de decisão resultou em dezesseis classes. Essa combinação obteve êxito ao proporcionar o detalhamento de feições do relevo (Figura 5). Diferentemente alternativas anteriores, nessa classificação as áreas de planícies e os interflúvios são representados com melhor distinção e maior detalhe. Entretanto, algumas feições de relevo presentes no Paraná não puderam ser identificadas nessa combinação, como as vertentes mais íngremes da Serra do Mar associados aos maciços rochosos de maior resistência e as escarpas situadas no *front* das cuestas.

Desse modo, a alternativa composta por deztoito classes de relevo (Figura 6) se mostrou mais adequada, frente aos resultados das três alternativas anteriores. Verificou-se que a separação da classe da média superior da declividade permitiu distinguir relevos íngremes na Serra do Mar e escarpas. Combinado com o plano de curvatura e acumulação de fluxo resultou em duas classes adicionais, são unidades com declividade superior a 28%, com vertentes divergentes (classe 17) ou planares e convergentes (classe 18), ambas com valor de acumulação do fluxo superior à média do quarto inferior.

A análise isolada das variáveis empregadas (Figura 7) possibilitou a compreensão do papel

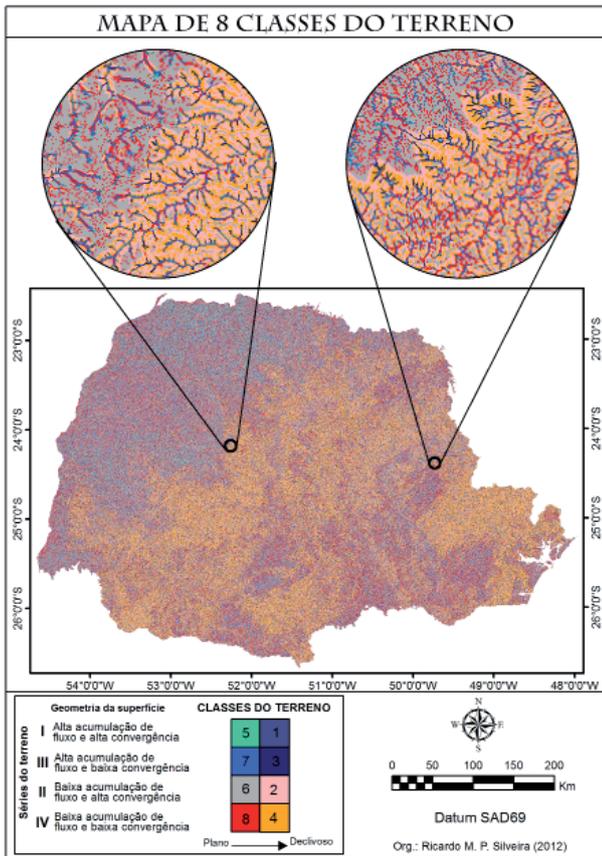


Figura 3 – Matriz resultante da classificação das 8 classes.

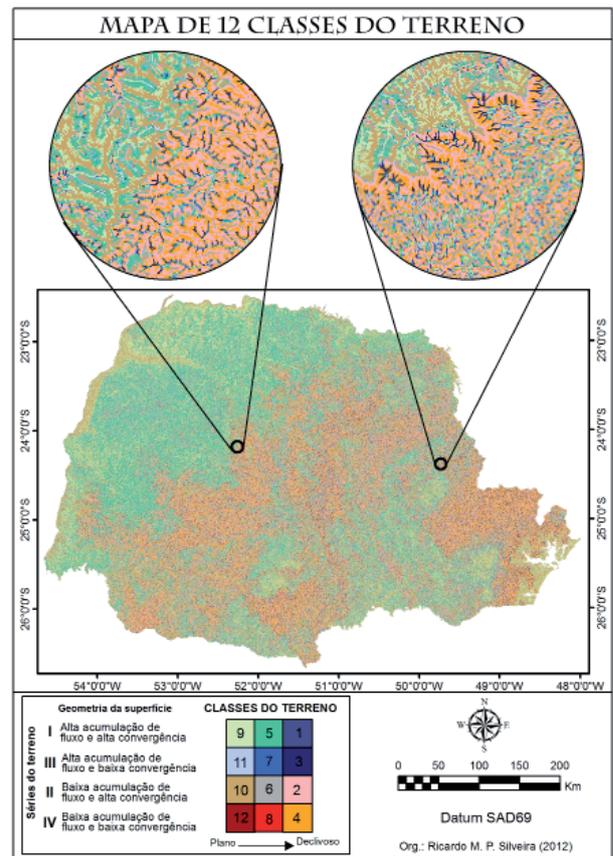


Figura 4 – Matriz resultante da classificação das 12 classes.

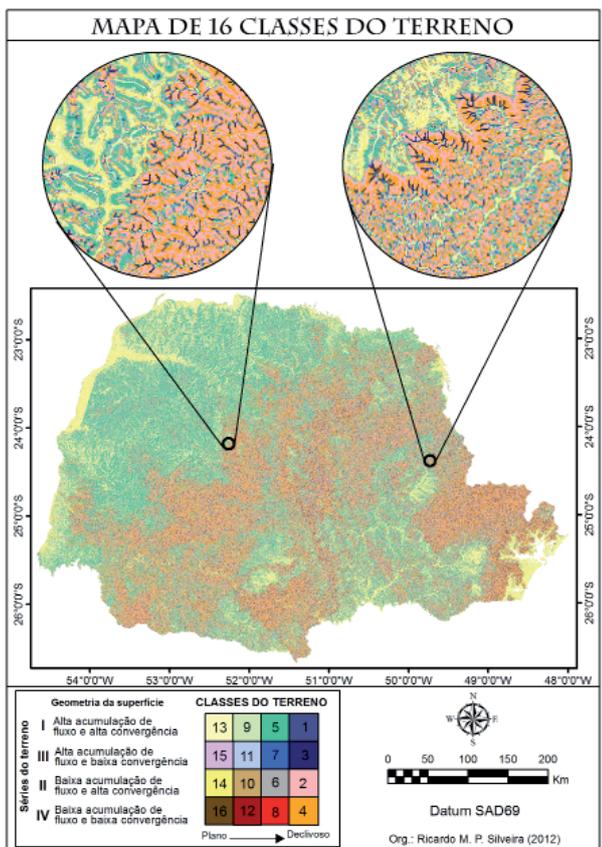


Figura 5 – Matriz resultante da classificação das 16 classes.

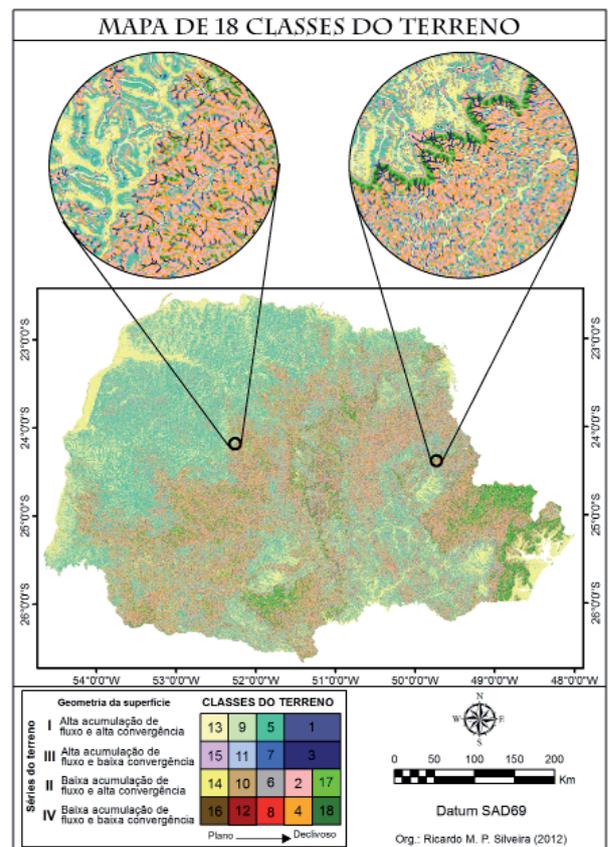


Figura 6 – Matriz resultante da classificação das 18 classes.

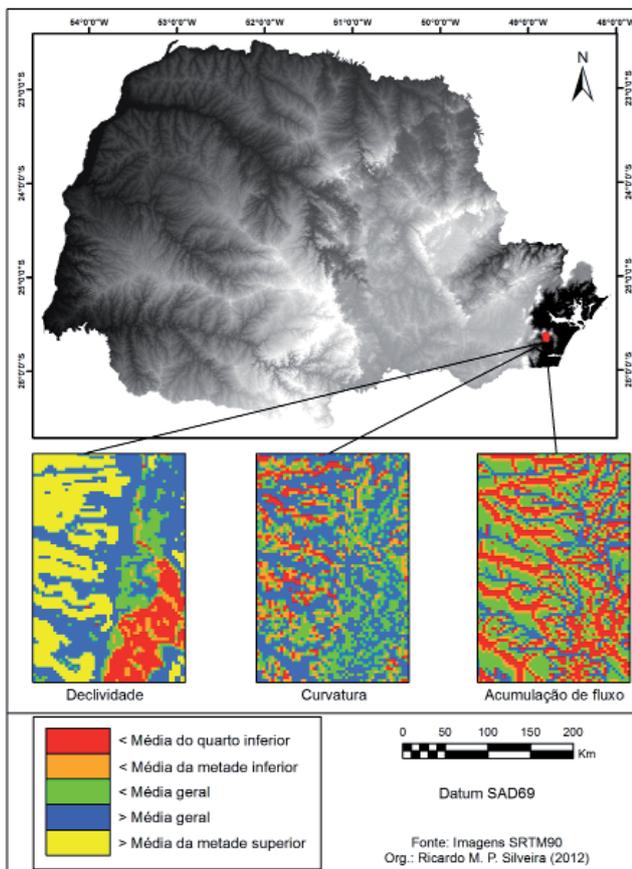


Figura 7 – Espacialização dos atributos topográficos derivados do MDE com os valores médios discretizados.

de cada uma delas no modelo. Verificou-se que a declividade foi o atributo topográfico que apresentou maior potencial para distinguir unidades morfológicas de relevo, cujas divisões referentes aos valores médios foram satisfatórias. A média do quarto inferior (0-3,1%) evidenciou, sobretudo, as áreas de planície, enquanto a média da metade inferior (3,1-5,1%) caracterizou as áreas de transição para porções mais declivosas, o intervalo que representa a média geral (5,1-9,6%) ocorre predominante nos planaltos, caracterizando relevo suave ondulado. Já o intervalo entre a média geral e a média da metade superior (9,6 - 28%), além de possuir o maior intervalo entre todas as divisões também ocupou maior área, distribuída em todos os grandes compartimentos geomorfológicos. Por fim, a divisão adicional exclusiva para a declividade, que considera os valores maiores que a média da metade superior (>28%), se restringe às porções mais dissecadas do relevo paranaense, como as unidades geomorfológicas de blocos soerguidos da

Serra do Mar, vales fortemente entalhados, o *front* das escarpas e morros isolados.

O plano de curvatura, por sua vez, foi uma importante variável que permitiu identificar unidades de relevo compostas por vertentes coletoras e dispersoras de fluxo hídrico, que implicam nos processos erosivos e agradacionais. Os valores negativos representam segmentos convergentes, os valores positivos segmentos divergentes e quanto mais próximo de 0 (zero) superfícies planares. Após o cálculo de seus valores médios, verificou-se que as partições do quarto inferior (-5 a -0,2), da metade inferior (-0,2 a -0,1) e da média geral (-0,1 a -0,02) são todas vertentes convergentes, enquanto a porção com valores superiores à média geral (-0,02 a 5,9) representam, portanto, vertentes planares e divergentes. A vantagem da classificação pormenorizada dos valores negativos é o detalhamento dessas importantes propriedades do relevo, uma vez que muitos processos geomórficos (leitos de drenagem, deslizamentos, transporte de sedimentos etc) ocorram em superfícies com essas características.

Já o atributo topográfico acumulação de fluxo acrescentou importantes informações referentes à concentração do escoamento, possibilitando a identificação de canais de drenagem. Quanto maior seu valor, maior será a área de contribuição. Nessa perspectiva, o quarto inferior do particionamento (0 - 0,3) representa os divisores d'água, que associados ao plano de curvatura podem definir os tipos de topos (tabular, aguçado etc), por exemplo. Os intervalos alusivos à metade inferior (0,3 - 1,6) e geral (1,6 - 10,1) são as zonas intermediárias, enquanto os valores superiores (10,1 - 7321) evidenciam os fundos de vale. Estes, associado à declividade, por exemplo, podem caracterizar canais de drenagem. Entretanto é importante salientar que essa variável morfométrica se mostrou eficaz em áreas com grandes amplitudes altimétricas como a Serra do Mar, porém não obteve a mesma eficiência em áreas planas e com pouca variação da hipsometria, que resultou em pixels isolados no modelo na forma de ruídos.

Uma importante questão que cabe ser destacada é a escala de representação do produto cartográfico (Figura 8). Quando visto em escalas superiores à 1:3.000.000, verificou-se que devido

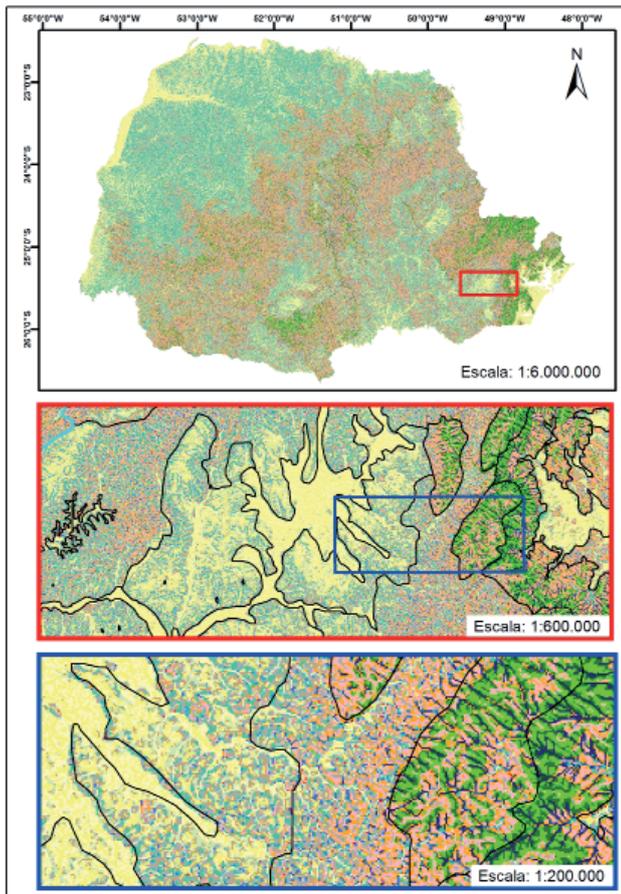


Figura 8 – Apresentação das classes mapeadas em diferentes escalas cartográficas.

a predominância de determinadas classes, que formam “manchas” com semelhança na rugosidade, foi possível distinguir, com pouca precisão, grandes unidades geomorfológicas. Da mesma forma, mas em escala mais detalhada (aproximadamente 1:600.000), as unidades geomorfológicas homólogas são passíveis de identificação. Contudo a potencialidade dessa proposta de mapeamento automatizado é evidenciada em escalas de ainda maior detalhe, entre 1:100.000 e 1:200.000, devido à combinação das três variáveis que resultam em até dezoito classes distintas com características morfológicas distintas de relevo.

No âmbito da discussão sobre a taxonomia do relevo, embora a escala cartográfica não ultrapasse a representação de 1:100.000, devido às limitações impostas pela base de dados do SRTM90 e a resolução espacial do MDE que não permite alcançar grande escala, a proposta apresenta potencial para auxiliar o mapeamento geomorfológico atingindo o 5º nível de táxon, conforme a proposta de Ross

(1992), sobretudo porque possibilita a representação das distintas formas das vertentes. Segundo Ross (1992), o 5º táxon são as vertentes ou setores das vertentes pertencentes a cada uma das formas individualizadas do relevo. Como exemplo, tornando-se a forma de uma colina ou de um morro, os diversos setores apresentam características geométricas, genéticas e dinâmicas bem distintas. O topo e a parte superior da vertente podem, por exemplo, ter formato retilíneo e a base côncava, ao mesmo tempo esses setores podem apresentar inclinações diversas que também ajudam a definir as suas características. Ou seja, o atributo topográfico plano de curvatura, subdividido em quatro segmentos, é o principal responsável pela distinção dessas características.

Na fase de controle de campo, dos 36 pontos de controle, 29 apresentaram concordância com as unidades mapeadas no modelo, resultando em 81% de acerto. Esse resultado demonstra satisfatoriamente que o mapeamento automatizado é capaz de distinguir feições do relevo em nível local e nos mais diversos terrenos (Quadro 1).

Devido à incompatibilidade de escala entre o mapeamento automatizado de 18 classes de terreno e o Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006; OKA-FIORI *et al.*, 2006), constatou-se que não foi possível estabelecer comparação direta entre os dois mapas. Entretanto a quantificação dos resultados obtidos pelo mapeamento automatizado em relação aos limites dos compartimentos geomorfológicos definidos pelo mapeamento convencional apresenta importantes informações que podem auxiliar a compreensão e aperfeiçoamento dessas unidades.

Dessa forma, para todas as 50 subunidades morfoesculturais delimitadas pelo Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006; OKA-FIORI *et al.*, 2006) foram calculadas as cinco classes predominantes obtidas pelo modelo (Quadro 2), com a finalidade de identificar padrões de distribuição das classes mapeadas e caracterizar quantitativamente essas zonas geomorfológicas homólogas.

Essa avaliação qualitativa facilitou a análise das informações que são visualmente perceptíveis no modelo, além de indicar possibilidades de de-

Quadro 1 – Controle de campo.

PONTO	COORDENADAS (UTM)	CLASSE (MODELO)	CAMPO									
			Declividade			Convexidade			Acumulação de fluxo			
			Alta	Média	Baixa	Alta	Média	Baixa	Alta	Média	Baixa	
1	N 765194 E 7168021	13			X		X			X		✓
2	N 768884 E 7167664	2	X			X				X		✓
3	N 750097 E 7158764	9			X		X			X		✓
4	N 731987 E 7173300	10			X		X			X		✓
5	N 732183 E 7172956	13			X		X			X		✓
6	N 731682 E 7172236	13			X		X			X		✓
7	N 730908 E 7170545	9	X				X	X				✓
8	N 699020 E 7190023	2	X			X					X	✓
9	N 701212 E 7188420	2			X			X		X		✗
10	N 716074 E 7208313	17	X			X				X		✓
11	N 716862 E 7207886	17	X				X	X				✓
12	N 717568 E 7207189	2	X			X					X	✓
13	N 718710 E 7206612	17	X			X					X	✓
14	N 697275 E 7172456	9	X				X			X		✓
15	N 673967 E 7188630	6			X			X	X			✗
16	N 678890 E 7175914	13			X			X	X			✓
17	N 691528 E 7220466	18	X				X				X	✓
18	N 674465 E 7725698	2	X				X	X				✗
19	N 654585 E 7285736	13			X					X	X	✗
20	N 601683 E 7432016	13			X		X				X	✓
21	N 616547 E 7202762	7	X					X	X			✓
22	N 585729 E 7213929	14	X					X	X			✗
23	N 630635 E 7147713	2	X			X					X	✓
24	N 546104 E 7127551	14			X		X				X	✓
25	N 547665 E 7122594	13	X				X			X		✓
26	N 492371 E 7101182	17	X			X					X	✓
27	N 376369 E 7152215	10			X			X	X			✗
28	N 543419 E 7183682	6	X			X					X	✓
29	N 234209 E 7250423	10			X		X				X	✓
30	N 376532 E 7318286	2	X			X					X	✓
31	N 598368 E 7296300	10	X			X					X	✓
32	N 523463 E 7298675	2	X			X					X	✓
33	N 330646 E 7479629	17	X			X					X	✓
34	N 480308 E 7200096	18	X			X					X	✗
35	N 398891 E 7186578	2	X			X					X	✓
36	N 331932 E 7721398	4	X			X					X	✓

talhamento para cada um desses compartimentos geomorfológicos. Nas planícies, por exemplo, as classes 13 e 14, referentes às áreas com declividade inferior a 3% e curvatura horizontal planar, juntas representam em média 75% de sua área total. A classe 9, terceira com maior representatividade, expõe áreas com declividade que variam entre 3 e 5%, sendo os limites externos das planícies. Essa homogeneidade da classificação confere às planícies grande destaque pela acurácia, confiabilidade e representação.

As subunidades morfoesculturais da Serra do Mar, por sua vez, apresentaram predominância das classes que contemplam as porções mais declivosas do relevo, com destaque para as classes 17 e 18, majoritariamente, e secundariamente 2 e 4. Dentre as quatro subunidades desse grande compartimento geomorfológico, a subunidade denominada Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas é a exceção, pois as classes 17 e 18 não constam entre as cinco

primeiras justamente por representar áreas de depósitos de tálus e colúvios advindos das porções superiores, resultando, portanto, em declives mais suavizados.

A Figura 9 ilustra as transições abruptas de declividade características da região, numa comparação entre a realidade observada in loco, com uma fotografia registrada em março de 2011, logo após os eventos de movimentos de massa, e o modelo visualizado em três dimensões. Verificou-se que, mesmo em perspectivas aproximadas, o mapeamento automatizado conseguiu distinguir assim como as principais feições geomorfológicas de mais detalhe em nível de vertente.

Já os Planaltos demonstraram grande variedade de classes, cada subunidade com características peculiares e diversas feições do relevo identificadas. De maneira geral verificou-se a predominância da classe 2. A Figura 10 demonstra dois exemplos

Quadro 2 – Quantificação das cinco classes que apresentaram maior representatividade em cada compartimento definido pelo mapeamento geomorfológico do Paraná.

SUBUNIDADE MORFOESCULTURAL	1º		2º		3º		4º		5º	
	CLASSE	%								
(0) Morros Isolados Costeiros	17	26,5	18	21,3	2	20,5	4	14,9	3	9,9
(0) Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas	2	22,3	4	21,2	6	11,8	13	9,1	9	7,09
(0) Serra do Mar Paranaense	17	23	2	22	18	18,9	4	17	3	11,1
(0) Blocos Soerguidos da Serra do Mar	17	28,8	18	21,5	2	19	4	13	13	10,4
(1) Blocos Soerguidos do Primeiro Planalto Paranaense	2	28,3	4	20,3	6	10,9	17	9,65	18	7,67
(1) Planalto de Castro	6	21,6	2	11,8	13	1,15	14	11,3	9	10,7
(1) Planalto do Complexo Gnáissico-Migmatítico	2	27,1	4	21,7	6	12,9	7	6,05	17	4,85
(1) Planalto Dissecado de Adrianópolis	17	25,8	2	21,4	18	19,7	4	14,9	3	9,74
(1) Planalto de Curitiba	6	24	2	17,7	4	12,7	10	8,48	5	8,46
(1) Planalto do Alto Iguaçu	6	20,1	14	17,3	13	16,8	9	16,5	10	12,8
(1) Planalto Dissecado de Tunas do Paraná	2	30,5	4	22,7	17	9,91	6	8,45	18	7,44
(1) Planalto Dissecado de Rio Branco do Sul	2	28,9	4	20,7	17	17,8	18	13	3	7,52
(1) Planalto Dissecado do Alto Ribeira	2	34	4	25	6	9,25	17	6,1	18	4,55
(1) Planalto do Alto Jaguariáiva	2	28,7	4	20	6	17,2	7	6,4	5	4,69
(2) Planalto de São Luiz do Purunã	6	18,7	2	15,7	9	13,2	5	13,1	10	8,86
(2) Planaltos Residuais da Formação Serra Geral	2	32	4	20,9	6	10,6	17	6,88	3	6,37
(2) Planalto do Alto Ivaí	2	28,8	4	20,4	6	12,6	17	5,77	7	5,53
(2) Planalto de Cândido de Abreu	6	24	2	14,9	5	11,2	4	9,6	9	9,36
(2) Planalto de Ortigueira	2	28,4	4	20,6	6	15,4	7	4,81	10	4,14
(2) Planalto de Santo Antônio da Platina	2	30,3	4	19,6	6	10,5	17	8,74	18	6,91
(2) Planalto do Médio Cinzas	6	24	2	12	9	11,9	5	11,5	10	9,99
(2) Planalto de Carlópolis	6	21,6	2	20,6	4	12,9	5	10,5	9	8,31
(2) Planalto de Jaguariáiva	2	27	6	18,3	4	12,6	5	11,4	9	6,59
(2) Planalto de Tibagi	6	23,2	5	17,4	2	14,7	10	8,3	14	7,64
(2) Planalto de Ponta Grossa	2	25,9	6	19,6	4	16	5	9,99	9	6,25
(2) Planalto de Guatá	2	27,5	6	20,5	4	17	10	5,92	9	5,23
(2) Planalto de São Mateus do Sul	6	26,3	9	14,3	5	13,5	10	12	14	10,4
(2) Planalto de Iratí	6	23	2	20,8	4	15,4	5	10,5	9	7,25
(2) Planaltos Residuais da Formação Teresina	2	22,4	6	19,3	4	14	5	9,51	10	7,26
(2) Planalto de Prudentópolis	6	24,5	5	11	2	12,5	9	11	10	9,69
(3) Planalto Pitanga/Ivaiporã	2	23,7	6	19,4	4	14,5	5	10,6	10	6,73
(3) Planalto de Campo Mourão	5	23,6	9	20,1	6	16,3	14	10,5	13	10
(3) Planalto de Paranavaí	9	31,6	5	17,4	13	13,6	6	12,7	10	11,8
(3) Planalto de Umuarama	6	25,8	5	25,7	9	16,1	10	9,72	14	6,55
(3) Planalto de Cascavel	5	25,3	6	19	9	14,2	2	11,4	14	7,68
(3) Planalto do Baixo Iguaçu	2	27,8	4	20,7	6	15,4	5	9,86	9	5,24
(3) Planalto de Francisco Beltrão	2	26,5	4	19,8	6	17,1	5	9,06	9	5,57
(3) Planalto do Alto Capanema	2	34,8	4	23,2	6	7,91	17	7	18	5,99
(3) Planalto do São Francisco	2	25,4	4	16,5	6	16,1	5	14,6	9	6,74
(3) Planalto de Foz do Iguaçu	9	23	5	17,1	6	14,4	14	14,1	13	13,5
(3) Planalto do Foz do Areia	2	30,5	4	21	6	9,46	17	8,17	18	6,22
(3) Planalto de Clevelândia	2	26,3	4	18,7	6	13,3	5	6,17	9	5,38
(3) Planalto de Palmas/Guarapuava	6	19,8	9	14,9	5	12,2	14	10,8	2	10,8
(3) Planalto do Alto/Médio Piquiri	2	31,7	4	22,2	6	12,9	5	6,37	7	4,19
(3) Planalto de Apucarana	2	26,6	4	18,5	6	17,4	5	13,7	9	5,61
(3) Planalto de Londrina	2	22,7	6	19,2	5	14,5	4	13,8	9	7,83
(3) Planalto do Médio Parapanema	5	16,1	6	16,1	9	22	14	12,9	13	11,5
(3) Planalto de Maringá	5	24,4	9	21,6	6	17,4	13	9,8	14	8,96
(4) Planície Litorânea e Planícies Flúvio-Marinhas	14	38,3	13	33,8	9	7,63	4	4,38	10	4,35
(4) Planícies Flúvias	14	41,9	13	39,1	9	5,71	10	3,26	6	3,06

Obs.: (0) Serra do Mar; (1) Primeiro Planalto; (2) Segundo Planalto; (3) Terceiro Planalto; (4) Planícies.

pertinentes do detalhamento proporcionado pelo modelo, tendo como base duas subunidades morfoescolturaes definidas pelo Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná. O compartimento A representa o Planalto de Castro e a unidade B representa os limites do Planalto Dissecado de Rio Branco do Sul, ambos localizados no Primeiro

Planalto.

Já no Planalto Dissecado de Rio Branco do Sul (Figura 10-B) notam-se importantes feições mapeadas que indicam particularidades da região. Devido ao forte controle estrutural exercido pelo enxames de diques expostos da megaestrutura de soergimento Arco de Ponta Grossa, situados nas

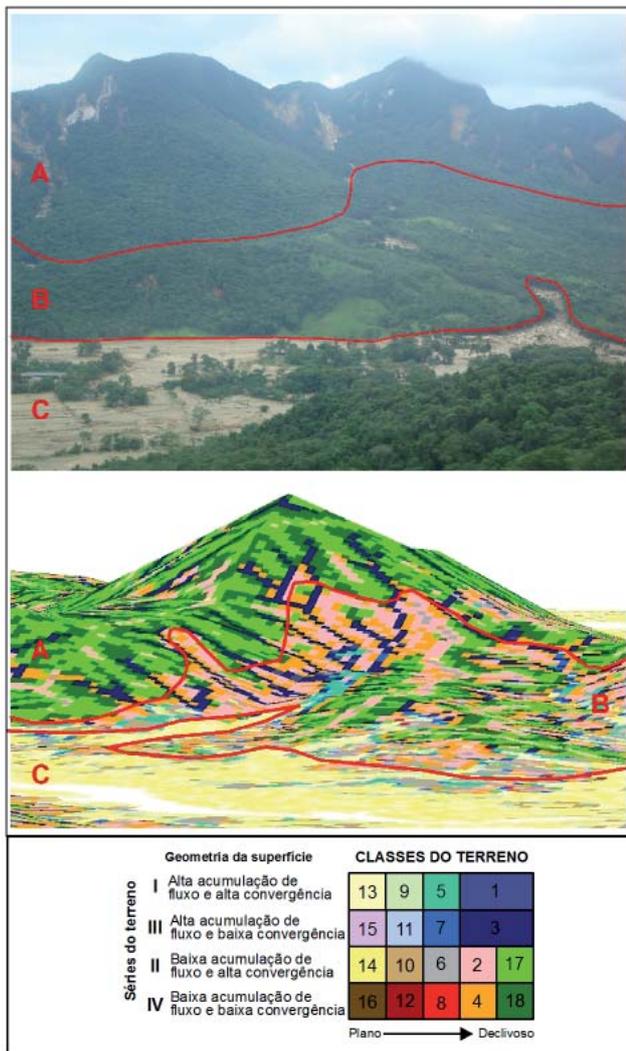


Figura 9 – Comparação aproximada entre uma fotografia e o modelo, na bacia do rio Jacaréi, Serra do Mar paranaense, com destaque para as transições abruptas de declividade.

bordas da Bacia do Paraná. Esses diques apresentam extensões variadas, chegando a ordem de quilômetros, dispõe-se de modo paralelo com orientação a NW (RAPOSO, 2005).

As características do Arco de Ponta Grossa conferem à região do vale do ribeira um relevo rugoso. O enxame de diques, subparalelos e orientados para NW foram evidenciados nas classes 17 e 18, que acompanham as fraturas distensivas. Além disso, se verificou um controle exercido pelos sistemas de falhas Proterozóicas (FIORI e GASPAR, 1993). Nas áreas que não há controle estrutural a classe de terreno 2 prevalece.

Cabe destacar que devido à área reduzida dos fundos de vale em relação às vertentes e divisores

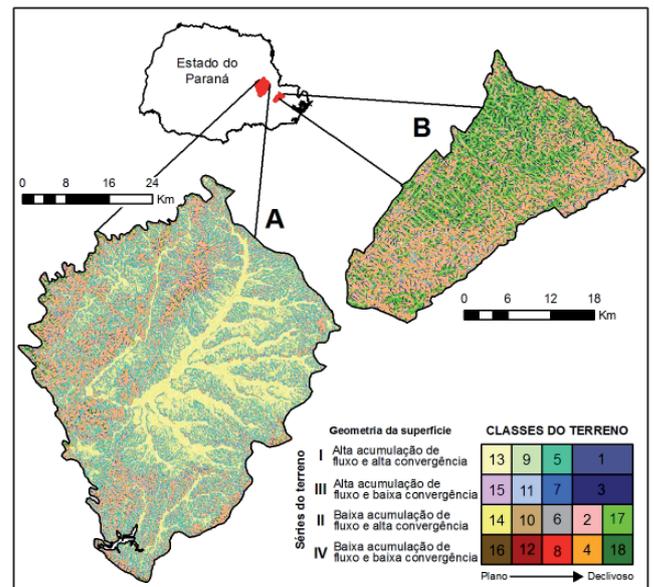


Figura 10 – Exemplos de classes do terreno com o recorte de subunidades morfoesculturais.

d'água (Figura 11), as classes das séries de terreno I e III, que compreendem alta acumulação de fluxo, tiveram pouca representatividade nos cálculos obtidos se comparados às demais classes. Entretanto, mesmo com essa desvantagem, as classes 9 e 13 obtiveram destaque.

Como possibilidade de refinamento das classes identificadas pelo modelo, o quadro 3 demonstra os valores médios calculados para cada uma das cinco grandes unidades morfoesculturais paranaenses. Essa análise particularizada é importante para avaliar a discrepância em relação aos valores utilizados para todo o estado, além de dar subsídio para mapeamentos de mais detalhe ou para áreas específicas do Paraná. A inclusão dos valores da metade superior para o plano de curvatura e acumulação do fluxo, que não foram utilizados nessa proposta, também servem como referência para futuros trabalhos.

Cabe ressaltar que no trabalho original de Iwahashi e Pike (2007), definido pelos autores como “introdutório e metodológico”, a proposta é aplicada em três áreas com distintos níveis de abrangência e resolução espacial: parte da Ilha de Hokkaido, no Japão, com *pixel* de 55m; ilhas japonesas, com *pixel* de 270m; e toda a área continental do globo, com *pixel* de 1km. Entretanto, a comparação dos resultados obtidos pela aplicação do método no estado do Paraná em relação ao trabalho



Figura 11 – Proporção da área ocupada pelos fundos de vale.

Quadro 3 – Valores médios das unidades morfoesculturais do Paraná.

UNIDADES	DECLIVIDADE (%)				PLANO DE CURVATURA				ACUMULAÇÃO DE FLUXO			
	VALORES MÉDIOS				VALORES MÉDIOS				VALORES MÉDIOS			
	Quarto inferior	Metade inferior	Geral	Metade superior	Quarto inferior	Metade inferior	Geral	Metade superior	Quarto inferior	Metade inferior	Geral	Metade superior
Serra do Mar	8,9	15,2	26,1	39,6	-0,3	-0,2	-0,01	0,2	0,6	2,1	15,7	148
Primeiro Planalto	3,8	6,7	13,6	24,7	-0,31	-0,16	-0,01	0,15	0,3	1,1	7,2	48
Segundo Planalto	3,4	5,7	10,2	17,1	-0,2	-0,11	-0,01	0,09	0,3	1,4	9,3	70,9
Terceiro Planalto	2,9	4,8	8,8	15,8	-0,18	-0,09	-0,01	0,07	0,3	1,8	11,8	98
Planície litorânea	0,8	1,4	3,4	9,9	-0,14	-0,07	-0,02	0,03	0,2	1,1	8,7	63,9
PARANÁ	3,1	5,1	9,6	28	-0,2	-0,1	-0,02	0,07	0,3	1,6	10,1	81,7

original aplicado ao globo, que abrange o recorte geográfico do estudo, não pode ser realizado de maneira direta, por influência das distintas resoluções de pixel adotadas e pelos critérios estatísticos empregados na discretização das classes dos atributos topográficos, visto que essas duas condições afetam a determinação das unidades morfológicas. Portanto, as classes de terreno automatizadas não podem ser estritamente comparáveis entre os vários conjuntos de resultados.

Considerações finais

Foi constatado o potencial de aplicação dos dados SRTM90 e seus subprodutos, aliado às técnicas de geoprocessamento, aos trabalhos de mapeamento geomorfológico. A proposta se mostrou eficaz, exequível e com grande aplicabilidade, além de ser uma alternativa viável e oferecer subsídios aos trabalhos de mapeamentos automatizados ou preliminares.

A tentativa de estabelecer critérios com parâmetros fixos para mapeamentos geomorfológicos é importante para avançar na questão da subjetividade, uma vez que a identificação e delimitação das feições geomorfológicas é tradicionalmente feita por julgamentos de ordem qualitativa.

Conforme demonstrado, o mapeamento final só não pode ser representado em escala geomorfológica maior devido às limitações do MDE empregado, pois a resolução espacial não acompanha o nível de detalhamento da matriz resultante, porém o método mostra potencial para identificar a morfologia do relevo em nível de setores nas vertentes.

É válido ressaltar, também, que embora muitos autores evidenciem a necessidade dos mapas geomorfológicos incluam informações referentes à morfometria, morfografia, morfodinâmica e morfocronologia, a proposta apresentada contempla somente as duas primeiras categorias. O acréscimo de informações temporais exige o conhecimento prévio da área ou mesmo a inserção de variáveis

relacionadas, como clima e geologia.

Embora a coincidência entre as classes mapeadas pela proposta da assinatura geométrica e o controle de campo tenha atingido 81% e seja um valor satisfatório, além dos avanços discutidos na questão de taxonomia do relevo, o modelo ainda carece de melhorias. A inserção de outras variáveis, valores, combinações e/ou recortes espaciais individualizados surge como desafio para estudos posteriores.

Referências bibliográficas

- BISPO, P. C.; VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M. Variáveis geomorfométricas locais e sua relação com a vegetação da região do interflúvio Madeira-Purus (AM-RO). **Acta Amazonica**, v. 39, n. 01, p-81-90, 2009.
- CÁTEN A.; DALMOLIN, R. S. D.; RUIZ, L. F. C.; SEBEM, E.; PEREIRA, R. S. Pedometria aplicada à predição de classes de solos utilizando de regressões logísticas múltiplas. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, XIV, 2009, Natal. Anais... Natal : INPE, p. 25-30, 2009.
- CHAGAS, C. S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa – UFV, 223p. 2006.
- ESRI. **ArcGis, Spatial Analyst, 3D Analyst, versão 10**. Environmental Systems Research Institute, 2010.
- EVANS, I. S. **General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics**. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). *Spatial analysis in geomorphology*. London: Harper & Row, Publishers, 1972.
- FIORI, A. P.; GASPAR, L. A. Considerações sobre a estratigrafia do Grupo Açungui (Proterozóico Superior), Paraná. Sul do Brasil, **BoL.JG-USP, SboC;enl.**, 24:1-19, 1993.
- FLORENZANO, T. G. (Org.) **Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- HAMMOND, E.H. Analysis of properties in land form geography: an application to broad-scale landform mapping. **Ann. Assoc. Am. Geogr.** 54, 11–19, 1964.
- HENGL, T. **Pedometric mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches**. Wageningen University, Enschede, 2003. 233p. PhD thesis - Wageningen University. Disponível em: [http://spatial-analyst.net/wiki/index.php?title= Pedometric_mapping:_PhD_thesis](http://spatial-analyst.net/wiki/index.php?title=Pedometric_mapping:_PhD_thesis).
- HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, n. 69, v. 01, p. 14-47, 1981.
- IPPOLITI, G. A.; COSTA, L.M.; SCHAEFER, C. E.G.R.; FERNANDES FILHO, E. I.; GAGGERO, M. R.; SOUZA, E. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedofomas em microbacia na região de “Mar de Morros” (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.269-276, 2005.
- IWAHASHI, J.; PIKE, R. J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. **Geomorphology** 86(3-4): 409-440, 2007.
- MARTINONI, D. **Models and experiments for quality handling in digital terrain modelling**. Ph.D. Thesis. University of Zürich, 2002.
- MOORE, I. D.; GESSLER, G.A.; PETERSON, G.A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.443-452, 1993.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B., LADSON, A. R. Digital terrain modeling: A review of Hydrological, geomorphological an biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30, 1991.
- MUÑOZ, V. A. **Análise geomorfométrica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 112p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), 2009.
- O’CALLAGHAN, J.F.; MARK, D.M. The

- extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, n. 28, p. 328-344, 1984.
- OKA-FIORI C.; SANTOS L. J. C.; CANALI N, E.; FIORI A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA J. M. F.; ROSS J. L. S. 2006. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. Curitiba, MINEROPAR, 2006.
- PENNOCK, D. J. Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. **Soil and Tillage Research** 69 (1–2), 15–26, 2003.
- PIKE, R. J. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. **Math. Geol.** 20, 491–511, 1988.
- PIKE, R. J. Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography** 24 (1), 1–20., 2000.
- PIKE, R.J.; EVANS, I., HENGL, T. Geomorphometry: A Brief Guide. In: **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Hengl, T. and Hannes I. Reuter (eds.), Series Developments in Soil Science** vol. 33, Elsevier, pp. 3-30, 2008.
- RAPOSO, M. I.B. Episódios intrusivos no Arco de Ponta Grossa, determinados através de um estudo paleomagnético. **Revista Brasileira de Geociências**, n.25, v.1, p.:3-19, 1995.
- ROSS, J. S. Registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Rev. Geografia. São Paulo**, IG-USP, 1992.
- SANTOS, L.J.C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N.E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de geomorfologia**. Ano 7, n°2, 2006.
- SCHMIDT, J., DIKAU, R. **Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models — semantics, methods, future needs**. In: Dikau, R., Saurer, H. (Eds.), GIS for Earth Surface Systems — Analysis and Modelling of the Natural Environment. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, pp. 153–173, 1999.
- SHARY, P.A., SHARAYA, L.S., MITUSOV, A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma** 107 (1–2), 1–32, 2002.
- SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. Análise digital do relevo empregada no mapeamento de unidades geomorfológicas. **Revista Geografar**, Curitiba, v.7, n.2, p.43-68, 2012.
- SILVEIRA, C. T. OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; SIRTOLI, A. E.; SILVA. Pedometria apoiada em atributos topográficos com operações de tabulação cruzada por álgebra de mapas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.2, p.125-137, 2012.
- SILVEIRA, C. T. OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; SIRTOLI, A. E.; SILVA, C. R.; BOTELHO, M. F. Soil prediction using artificial neural networks and topographic attributes. **Revista Geoderma** 195-196, p. 165–172, 2013.
- SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA-FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia agraria**, v.9, n.3, p.317-329, 2008.
- SPEIGHT, J.G. Parametric description of land form. In: **Stewart, G.A. (Ed.), Land Evaluation: Papers of a CSIRO Symposium. Macmillan, Melbourne**, pp. 239–250, 1968.
- TOBLER, W.R. The development of analytical cartography: a personal note. **Cartography and Geographic Information Science** 27 (3), 189–194., 2000.
- WOOD, J. **The geomorphological characterisation of digital elevation models**. Leicester, UK, 1996. 185p. PhD Thesis - University of Leicester. Disponível em: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>.
- WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Digital terrain analysis, chapter 1**. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, p.1-27, 2000.

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

ZEVENBERGEN, L.W.; THORNE, C.R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.12, p.47-56, 1987.