

Resolução espacial de um modelo digital de elevação definida pela função wavelet

Alexandre ten Caten⁽¹⁾, Ricardo Simão Diniz Dalmolin⁽²⁾, Fabrício de Araújo Pedron⁽²⁾
e Maria de Lourdes Mendonça-Santos⁽³⁾

⁽¹⁾Instituto Federal Farroupilha, Campus Júlio de Castilhos, São João do Barro Preto, CEP 98130-000 Júlio de Castilhos, RS. E-mail: acaten@yahoo.com.br ⁽²⁾Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Solos, Avenida Roraima, nº 1.000, CEP 97105-900 Santa Maria, RS. E-mail: dalmolinr@pq.cnpq.br, fapedron@ymail.com ⁽³⁾Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, nº 1.024, CEP 22460-000 Rio de Janeiro, RJ. E-mail: loumendonca@cnpq.embrapa.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi definir a resolução espacial mais apropriada para representar a variabilidade da elevação, declividade, curvatura em perfil e índice de umidade topográfica de um terreno, por meio de avaliações com a transformada wavelet. Os dados utilizados no estudo têm sua origem em três transectos de 27 km, posicionados em áreas do Planalto, Rebordo do Planalto e Depressão Central na região central do Estado do Rio Grande do Sul. As variáveis – elevação, declividade, curvatura em perfil e índice de umidade topográfica – foram derivadas de um modelo digital de elevação Topodata com resolução de 30 m. A avaliação da resolução com a máxima variabilidade foi realizada pela aplicação da wavelet-mãe, denominada Morlet. Os resultados foram analisados a partir do isograma e do escalograma dos coeficientes wavelet e indicaram que sensores remotos com resolução espacial próxima a 32 e 40 m podem ser utilizados em pesquisas que considerem os atributos de terreno, como declividade, curvatura em perfil e índice de umidade topográfica, ou, ainda, fenômenos ambientais correlacionados a eles. No entanto, não foi possível estabelecer um valor conclusivo para a resolução espacial mais adequada para a variável elevação.

Termos para indexação: mapeamento digital de solos, wavelet-mãe de Morlet, escala, pedometria.

Spatial resolution of a digital elevation model defined by the wavelet function

Abstract – The objective of this work was to define the most appropriate spatial resolution to represent the variability of elevation, slope, profile curvature and topographic wetness index of a terrain by evaluations with the wavelet transform. Data used in the study have their origin in three 27-km transects, positioned in areas of the Planalto, Rebordo do Planalto and Depressão Central in the central region of Rio Grande do Sul state, Brazil. The variables – elevation, slope, profile curvature and topographic wetness index – were derived from a Topodata digital elevation model with 30 m resolution. The assessment of the resolution with the highest variability was evaluated through the application of the Morlet mother wavelet. The results were analyzed from the wavelet coefficients plotted in isograms and scalograms, and indicate that remote sensors with spatial resolution between 32 and 40 m should be used in researches considering terrain attributes as slope, profile curvature and topographic wetness index, or even environmental phenomena related to them. However, it was not possible to establish a conclusive value for a more appropriate spatial resolution to the attribute elevation.

Index terms: digital soil mapping, Morlet mother wavelet, scale, pedometry.

Introdução

Variáveis ambientais, normalmente, apresentam substancial variabilidade em uma ampla gama de escalas espaciais. As propriedades do solo estão entre as variáveis que, em geral, exibem um complexo padrão espacial, fruto das interações entre processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em uma variedade de escalas espaciais. A elucidação das escalas em que esses processos se desenvolvem é essencial para o entendimento e a predição de processos hidrológicos,

biológicos e químicos, que atuam diretamente na gênese do solo (Si, 2008).

A resolução espacial está fortemente relacionada à escala (Bian, 1997; Hengl, 2006). Entre as dúvidas dos pesquisadores, está a que diz respeito à resolução espacial em que os modelos baseados em variáveis de terreno irão desempenhar seu máximo. Com a diminuição da resolução espacial, as variáveis de terreno derivadas do modelo digital de elevação (MDE) perdem detalhamento, e muitas nuances da paisagem também são perdidas (Wu et al., 2008). Segundo esses autores,

diferentes resoluções espaciais do MDE produzem distintas informações sobre as variáveis de terreno. À medida que o MDE é agregado em resoluções cada vez mais grosseiras, a declividade diminui e a área de contribuição aumenta. Ainda de acordo com os autores, há um valor ótimo para a resolução espacial, a partir do qual o modelo hidrológico irá gerar os melhores resultados. Embora a resolução espacial dependa da complexidade da paisagem e das variáveis de terreno utilizadas na modelagem, Hengl (2006) argumenta que muitos trabalhos que utilizam dados em formato matricial (raster) optam por uma determinada resolução espacial, sem qualquer justificativa científica em favor da opção adotada.

A estratégia automatizada de mapeamento do solo, denominada mapeamento digital de solos (MDS), emprega preditores derivados de MDE para a predição espacial de classes e propriedades do solo (Scully et al., 2003; Sanchez et al., 2009). Esses preditores podem ser derivados diretamente de MDE, como é o caso da declividade, direção do fluxo e curvaturas. Outros são de definição um pouco mais complexa e constituem-se de variáveis mais elaboradas, resultantes da análise geomorfológica da paisagem. Esse é o caso do índice de posição topográfica (IPT), utilizado para classificar a paisagem em classes morfológicas (Tagil & Jenness, 2008). A metodologia utilizada influencia sobremaneira a qualidade dos valores gerados na derivação do IPT (Judex et al., 2006). Esse índice representa a diferença entre a elevação de um pixel e a elevação média dos pixels vizinhos, e possibilita uma classificação simples e rápida da paisagem em classes morfológicas. Como o índice está relacionado à extensão e à forma com que o algoritmo analisa pixels vizinhos, os valores adotados durante a sua geração devem ser produto de uma criteriosa análise prévia das características geomorfológicas da região para a qual os dados estão sendo gerados. Isso possibilitará avaliar a extensão e os padrões da variabilidade espacial que têm reflexo direto na resolução espacial de trabalho (Tagil & Jenness, 2008).

Entre as alternativas de estudo das resoluções espaciais mais apropriadas para os diversos fenômenos ambientais, tem-se a aplicação da análise wavelet (Cho & Chon, 2006; Dong et al., 2008), que consiste em mimetizar os dados originais a partir de um sinal artificial produzido por uma pequena onda, a wavelet-mãe. A wavelet é dilatada e transladada a fim

de buscar a melhor convolução entre os dados originais e a wavelet-mãe. Desse procedimento, são gerados os coeficientes wavelet, que representam o grau de correlação entre o sinal original e o sinal gerado. Esses coeficientes podem, então, ser visualizados na forma do isograma local e do escalograma global, que irão auxiliar na avaliação das estruturas predominantes nos dados em questão (Torrence & Compo, 1998).

A wavelet é uma função matemática, representada na forma de uma pequena onda. É considerada pequena, porque contrasta com as funções seno e cosseno típicas da análise de Fourier, que se estendem para o infinito. A análise wavelet é executada por meio da transformada wavelet, que decompõe a variância de um processo físico em uma série de coeficientes que representam a distribuição da variância em diferentes resoluções espaciais e posições da paisagem (Yates et al., 2006). A análise wavelet constitui-se em uma boa alternativa para a análise de dados assimétricos e não estacionários, comuns em dados ambientais (Lark & Webster, 1999).

O objetivo deste trabalho foi empregar a transformada wavelet para avaliar a variabilidade da elevação, declividade, curvatura em perfil e índice de umidade topográfica de terreno, em três regiões fisiográficas distintas do Estado do Rio Grande do Sul.

Material e Métodos

Os dados utilizados neste estudo têm origem em três transectos posicionados em distintas regiões fisiográficas típicas da região central do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). Essas três regiões são: o Planalto da Serra Geral, o Rebordo do Planalto e a Depressão Central. A complexidade geomorfológica dessa região do Estado implica um desafio para o mapeamento preditivo de classes e propriedades do solo, em razão da diversidade de nuances do relevo, o que influencia significativamente a formação dos solos. Cada transecto tinha um comprimento de aproximadamente 27 km, o que possibilitou, na atual resolução espacial das variáveis de terreno, um total de 900 pixels amostrados por transecto, bem superior às 128 amostras preconizadas como valor mínimo para o emprego da análise wavelet (Si, 2008).

Optou-se por utilizar variáveis de terreno com significado físico e relacionadas à formação dos solos, para a sua aplicação posterior em estudos relacionados ao MDS. A elevação, ou altitude acima de uma

superfície de referência, tem importante papel na definição do clima local. A declividade, como medida da taxa de mudança da elevação na direção do declive, afeta a velocidade de fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais. A curvatura em perfil, que representa a taxa de mudança da declividade na direção de uma linha de fluxo, é fundamental no comportamento da água sobre a paisagem. O índice de umidade topográfica, originalmente referido como índice de saturação (Christofoletti, 1980), é uma função do logaritmo natural da razão entre a área de contribuição e a declividade, e indica o controle da topografia sobre a umidade do solo (Wilson & Gallant, 2000).

As quatro variáveis foram derivadas do MDE Topodata (Valeriano & Rossetti, 2010), que, por sua vez, consiste de uma interpolação dos dados SRTM (“Shuttle Radar Topography Mission”). Esse MDE apresenta a resolução espacial relativamente elevada (30 m), e é obtido por uma única técnica, além de estar disponível de maneira contínua para extensas regiões. Os arquivos raster de variáveis de terreno foram gerados a partir do programa Tapes-G, de acordo com procedimento detalhado por Wilson & Gallant (2000).

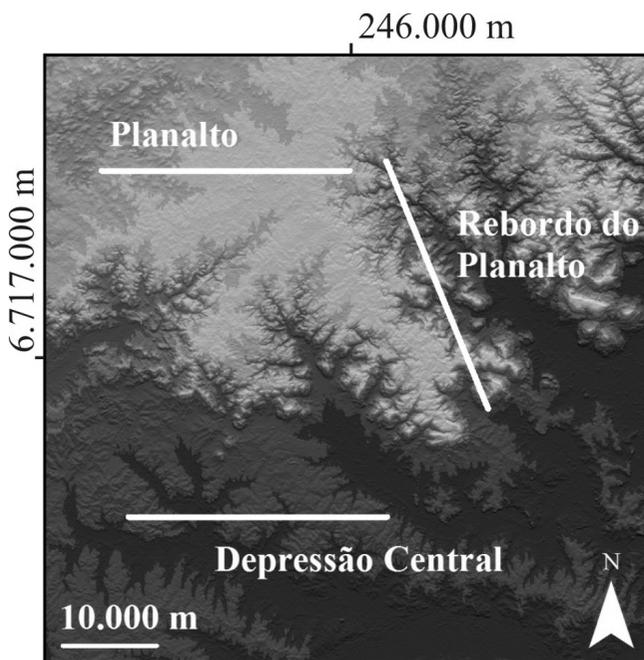


Figura 1. Localização dos transectos, nas três regiões fisiográficas predominantes da região central do Estado do Rio Grande do Sul. Cinza claro representa cotas acima de 400 m; e cinza escuro, locais com cota em torno de 60 m. Coordenadas UTM referenciadas ao datum SIRGAS 2000/ Fuso22.

Cada uma das variáveis de terreno foi amostrada a partir do respectivo transecto, pela função “criar gráfico de perfil” do programa ArcMap 9.3. Essa função permite a exportação direta de todos os valores dos pixels encobertos pela linha do transecto imediatamente para o formato ASCII.

A análise foi executada por meio da transformada wavelet, como segue:

$$W(b, x_n) = \frac{1}{\sqrt{b}} \sum_{j=1}^n f(x_j) g\left(\frac{x_j - x_n}{b}\right)$$

em que: $W(b, x_n)$ refere-se aos coeficientes wavelet, positivos ou negativos, de acordo com a correlação entre a wavelet e o sinal original; j representa a j -ésima observação; n é o total de observações; b representa a resolução que está sendo testada, centrada em x_n ; e x_j é a posição onde a análise está sendo executada no transecto. A função $f(x_j)$ representa os dados originais, e a função $g(x_j)$ é a wavelet-mãe. No presente estudo, foi utilizada a wavelet-mãe denominada Morlet, como segue:

$$g(x_j) = \pi^{-\left(\frac{1}{4}\right)} e^{i6\eta} e^{-\left(\frac{1}{2}\right)\eta^2},$$

em que: $\eta = b/x_j$ (Torrence & Compo, 1998).

Durante o emprego da transformada wavelet, valores elevados de variância indicaram que houve um bom ajuste entre a wavelet e os dados originais. Esse processo foi repetido para uma faixa de resoluções, ao longo de todo o transecto, tendo dado origem ao isograma local (“wavelet power spectrum”), em que os coeficientes wavelet são plotados ao quadrado, o que resulta apenas em valores positivos (Torrence & Compo, 1998).

Os resultados da análise wavelet são altamente correlacionados à escolha da wavelet-mãe mais apropriada. Tal ponto merece uma especial atenção (Labat, 2005). A wavelet do tipo Morlet foi utilizada, no presente estudo, em razão de sua capacidade superior em detectar e localizar padrões nos dados (Mi et al., 2005).

A variância total $v(b)$ foi calculada por:

$$v(b) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W^2(b, x_n).$$

A determinação da variância total é importante, já que seu valor será máximo quando ocorrer a melhor

convolução entre as funções $f(x_i)$ e $g(x_j)$, ou seja, a variância será maximizada quando a resolução for igual ao tamanho médio das estruturas, como fragmentos e interrupções presentes nos dados (Si, 2008). O resultado da variância total será representado no escalograma global (“global wavelet power”).

Para determinar o nível de significância do espectro wavelet, primeiramente faz-se necessário determinar o sinal de referência. Entre as possibilidades para esse sinal está o ruído vermelho (Torrence & Compo, 1998). Para determinação da significância estatística dos picos nos isogramas e escalogramas, pode-se utilizar a hipótese nula, em que se considera o sinal como ruído vermelho com dado espectro de energia de fundo (EEF). O nível de significância de 5%, no espectro de energia wavelet, implica dizer que esta energia tem que ser aproximadamente três vezes maior do que a de seu espectro de fundo de ruído vermelho (EEF), para ser considerada significativa. Assim, regiões do isograma local, circundadas por isolinhas, denotam regiões de elevada correlação entre o sinal original e a wavelet-mãe, o que indicará padrões relevantes nos dados. No caso do escalograma, locais onde a variância total é superior à linha de significância apresentam resoluções espaciais relevantes para o presente estudo.

Sobre os isogramas dos coeficientes wavelet, foi representado o cone de influência. Os cones de influência delimitam a presença de efeitos de bordas nos dados próximos às extremidades de cada transecto. Informações nessa região dos isogramas não devem ser consideradas para efeito de afirmativas sobre o padrão de resoluções presente nos dados originais (Torrence & Compo, 1998). A análise wavelet dos dados foi executada de acordo com o algoritmo descrito e disponibilizado por Torrence & Compo (1998).

Gráficos de variância (isogramas e escalogramas) foram utilizados para avaliar os padrões de resolução, para cada variável, em cada transecto. Partindo-se do pressuposto de que as áreas do Planalto e da Depressão Central (Figura 1) constituem-se de áreas morfologicamente similares, os gráficos de variância foram agrupados em quatro figuras, tendo-se considerado uma variável para duas localidades distintas: elevação, no Planalto e no Rebordo; curvatura em perfil, no Planalto e no Rebordo; declividade, na Depressão e no Rebordo; e índice de umidade topográfica, na Depressão e no Rebordo. Assim, podem ser executadas comparações em uma mesma variável

entre duas áreas de maior contraste, e é possível analisar as quatro variáveis na área do Rebordo, onde há a maior diversidade de formas na paisagem.

Para definir a resolução espacial (tamanho de pixel) que melhor representa a variabilidade espacial das quatro variáveis, foi adotado o critério de He et al. (2007). Para esses autores, a resolução espacial do pixel deve ser de um quarto (1/4) do valor identificado pela análise wavelet, já que, com esse critério, há maior segurança em evitar que padrões importantes associados às variáveis sejam perdidos.

Resultados e Discussão

A análise preliminar dos dados da amostragem, nos três transectos, permite visualizar características típicas das regiões fisiográficas onde os dados foram coletados (Tabela 1). O menor (115,33 m) e o maior (491,97 m) valor para a variável elevação, no transecto localizado na área do Rebordo do Planalto, são reflexos da conformação do relevo nessa área. Localizada na transição entre o Planalto Meridional Brasileiro e a Depressão Periférica, essa região tem como característica a presença de paisagem fortemente dissecada, que forma vales em forma de “V”. Essas formas são resultado dos processos erosivos, que ao longo de milhares de anos vêm esculpindo a região e gerando esse padrão de grande variabilidade na geomorfologia (Uberti & Klamt, 1984). Os desvios-padrão da elevação de 32,33 m, no Planalto, e de 20,35 m, na Depressão Central, indicam que essas áreas são morfologicamente similares.

Quanto à declividade, o valor máximo (41,96°), o valor médio (13,72°) e o desvio-padrão (9,83°), em áreas do Rebordo, indicam relevo acidentado. Comparando-se os valores da declividade no Rebordo com os obtidos no Planalto e Depressão, verifica-se que, nessas áreas, o relevo é mais suave. Segundo Sartori (2009), na Depressão Central predominam as colinas e planícies aluviais formadas a partir de rochas sedimentares. Nas áreas do Planalto, o relevo varia de ondulado a suave-ondulado, formado sobre uma sucessão de derrames vulcânicos sobrepostos.

A curvatura em perfil indica a taxa de mudança do relevo ao longo do declive; valores positivos indicam superfícies convexas com possível perda de material que, por sua vez, acumula-se nos locais côncavos com curvatura negativa (Wilson & Gallant, 2000). As áreas

de Rebordo possuem as maiores curvaturas entre os três transectos (Tabela 1), o que era esperado, em razão da complexidade do terreno. A suavidade do relevo na Depressão e no Planalto é retratada pelo pequeno desvio-padrão da variável curvatura em perfil.

O índice de umidade topográfica teve os resultados mais semelhantes entre os valores do Planalto, Rebordo e Depressão (Tabela 1). Contudo, as maiores amplitudes entre áreas úmidas (valores elevados) e áreas drenadas (valores baixos) foram verificadas na Depressão. Para essa região, drenam todos os córregos que se originam nas encostas do Rebordo do Planalto (Sartori, 2009), o que resulta em valores elevados de área de contribuição, associados às menores declividades, e acarreta maiores valores do índice de umidade topográfica.

Na região do Planalto, a variável elevação mostrou um comportamento em que, conforme aumentava a resolução espacial, também aumentava a variância, sendo que a distribuição dos tons de cinza ocorreu de maneira quase horizontal ao longo de todo o transecto (Figura 2 B). Há maior variabilidade entre 4 e 5 km do início do transecto, para valores de resolução de 900 a 2.100 m, o que indica a presença de pequenos talwegues e mudanças abruptas da elevação (Figura 2 A). Esse é o padrão típico de um evento local; não há um ciclo repetitivo desse padrão no restante do isograma e, portanto, não se pode atribuir uma resolução a esta variável (Yates et al., 2006). O escalograma da Figura 2 C indica variância crescente com o aumento da resolução, embora os valores não sejam significativos.

Três foram os locais de variância significativa dos dados de elevação, no transecto localizado no Rebordo (Figura 2 E): o primeiro, localizado entre 2,5 e 5 km do início do transecto, na faixa de resoluções de 700 a 1.500 m; o segundo, na região de 11,5 km, nas resoluções

de 512 a 1.024 m; e o terceiro, com início em 13,5 km, estende-se até o final do transecto, o que mostra um grande padrão de variabilidade. Contudo, nesse último, há duas resoluções espaciais predominantes, uma em torno de 1.024 m e outra localizada próxima aos 4.096 m. Todos esses eventos estão relacionados à grande variabilidade da elevação do terreno, mostrada na Figura 2 D. Nas distâncias em que ocorreram os maiores valores de variância significativa, também foram localizadas mudanças abruptas no relevo.

As informações do isograma da Figura 2 E não revelam a presença de um padrão cíclico na variabilidade. Nesse tipo de gráfico, resoluções associadas a eventos cíclicos, ao longo de todo o transecto, são o foco do presente estudo. Entretanto, a análise de significância para a variância global (Figura 2 F) mostra que há resoluções associadas a padrões de variabilidade entre 550 e 4.200 m. Ressalta-se que essas informações devem ser tomadas com cautela, uma vez que não ocorreram eventos cíclicos no isograma, e os dados de variância global foram apenas levemente superiores aos do espectro de ruído vermelho. Também é importante frisar que áreas contidas sob o cone de influência não devem ser consideradas, em razão de efeitos de bordas nos dados (Torrence & Compo, 1998). Observa-se que uma grande área de significativa variância encontra-se na região, na Figura 2 E.

A distribuição da variância da curvatura em perfil apresentou padrão cíclico, ao longo dos 27 km do transecto, da região do Planalto (Figura 3 B). Entre 2,5 e 5 km, há grande variabilidade nos valores dessa variável (Figura 3 A), mostrada pela transformada wavelet. Para a sequência do transecto, o que se verifica é que as regiões de variabilidade significativa se repetem praticamente a intervalos regulares. Grande parte desse

Tabela 1. Estatística descritiva das quatro variáveis de terreno, nos três transectos utilizados no estudo.

| Variável | Transecto | Mínimo | Máximo | Média | Mediana | Desvio-padrão | Variância |
|--|-----------|---------|---------|---------|---------|---------------|------------|
| Elevação (m) | Rebordo | 115,329 | 491,970 | 272,617 | 240,220 | 106,159 | 11.269,818 |
| | Planalto | 383,259 | 513,487 | 462,471 | 475,019 | 32,329 | 1.045,153 |
| | Depressão | 57,715 | 140,803 | 97,904 | 100,173 | 20,352 | 414,187 |
| Curvatura em perfil (m ⁻¹) | Rebordo | -1,241 | 0,996 | 0,015 | 0,028 | 0,221 | 0,049 |
| | Planalto | -0,296 | 0,253 | 0,005 | 0,007 | 0,063 | 0,004 |
| | Depressão | -0,182 | 0,450 | 0,004 | -0,001 | 0,062 | 0,004 |
| Declividade (°) | Rebordo | 0,240 | 41,963 | 13,720 | 10,854 | 9,830 | 96,639 |
| | Planalto | 0,264 | 17,088 | 3,382 | 2,946 | 2,047 | 4,188 |
| | Depressão | 0,342 | 9,547 | 3,430 | 3,203 | 1,946 | 3,786 |
| Índice de umidade topográfica | Rebordo | 4,657 | 16,306 | 7,458 | 6,869 | 1,985 | 3,942 |
| | Planalto | 5,734 | 18,725 | 8,553 | 8,193 | 1,524 | 2,322 |

padrão está situada entre as resoluções de 128 e 512 m, que correspondem à variância total significativa na Figura 3 C. Contudo, a opção por esta amplitude de valores poderia fazer com que padrões importantes, principalmente em escalas menores, fossem perdidos; por isso, o menor valor significativo no escalograma foi adotado como critério para considerar a resolução a ser adotada para cada variável de terreno. A partir deste critério e da observação da Figura 3 C, a resolução mais adequada para descrever o padrão espacial da curvatura em perfil, na região do Planalto, estaria em torno de 128 m.

O padrão da variância da transformada wavelet para a curvatura em perfil, no transecto localizado no Rebordo, também apresentou ciclos de ocorrência repetitivos (Figura 3 E). Quanto a essa variável, observa-se que as variações de curvatura envolveram amplitudes maiores

– localizadas em 3, 12, 14, 17,5, 22,5, 24 e 27 km (Figura 3 D) – do que aquelas observadas na área do Planalto (Figura 3 A). No entanto, a amplitude de resoluções significativas para o Rebordo (Figura 3 F) é muito similar à observada na região de Planalto (Figura 3 C). Os valores significativos para esta área também se situaram entre 128 e 512 m, e a opção pelo menor valor de resolução, para garantir que os menores padrões de variabilidade sejam contemplados, indica que a resolução de 128 m se aplica à curvatura em perfil nas áreas de Rebordo.

Duas regiões, com resoluções espaciais significativas, podem ser verificadas na transformada wavelet dos dados de declividade do transecto localizado na Depressão. Uma primeira, com um padrão mais cíclico, situada entre 70 e 512 m, e outra não cíclica, entre as resoluções de 512 e 1.100 m,

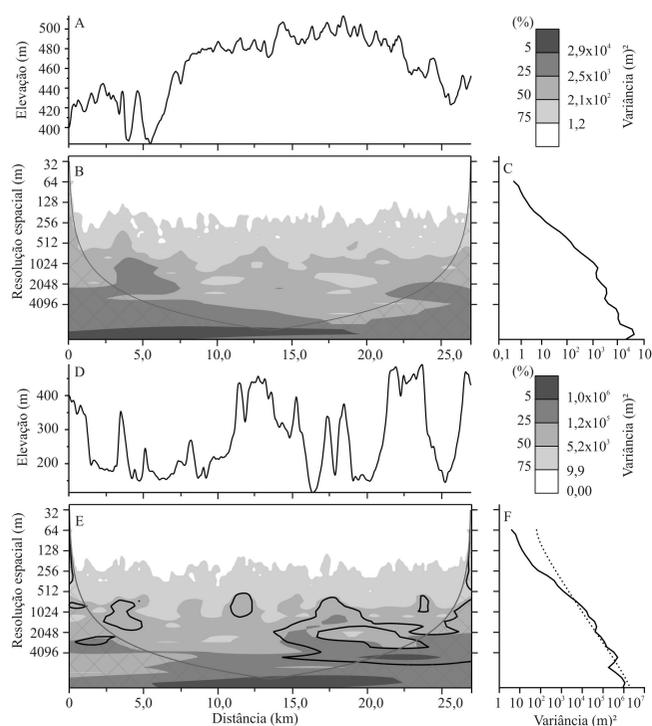


Figura 2. Elevação no Planalto (A) e Rebordo (D). Isogramas de variância wavelet no Planalto (B) e Rebordo (E). Regiões quadriculadas representam o cone de influência. Escalogramas da variância total no Planalto (C) e Rebordo (F). Análise de significância foi realizada com o ruído vermelho como espectro de fundo, a 5% de probabilidade, nos isogramas (isolinhas) e escalogramas (linha tracejada). A legenda dos níveis de cinza indica o valor e a quantidade de variância relativa em cada nível, acima, no isograma.

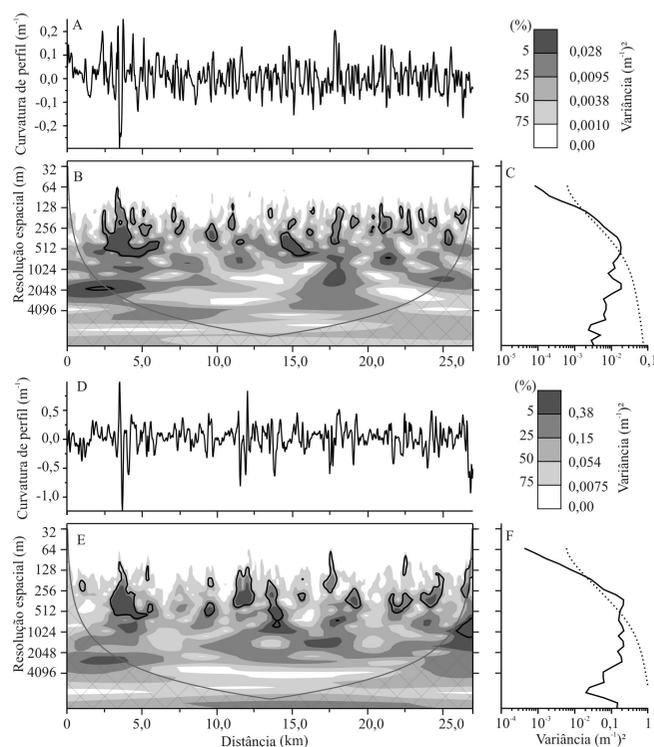


Figura 3. Curvatura em perfil no Planalto (A) e Rebordo (D). Isogramas de variância wavelet no Planalto (B) e Rebordo (E). Regiões quadriculadas representam o cone de influência. Escalogramas da variância total no Planalto (C) e Rebordo (F). Análise de significância foi realizada com o ruído vermelho como espectro de fundo, a 5% de probabilidade, nos isogramas (isolinhas) e escalogramas (linha tracejada). A legenda dos níveis de cinza indica o valor e a quantidade de variância relativa em cada nível, acima, no isograma.

aproximadamente (Figura 4 B). A observação do espectrograma da variância total (Figura 4 C) permite avaliar que os valores significativos de resolução se estendem por volta de 140 a 800 m. Ao se adotar o critério de menor valor significativo, para que todos os padrões presentes na variável de terreno fossem capturados, o valor de 140 m seria definido como importante para a variabilidade espacial da declividade em áreas da Depressão. Os valores próximos a 800 m são praticamente equivalentes ao espectro de fundo do ruído vermelho, o que não permite afirmar que essa região é não aleatória. Si & Farrell (2004) verificaram que a variável comprimento de rampa possuía uma resolução significativa em 180 m.

A avaliação do somatório de todas as áreas tidas como significativas, no isograma da Figura 4 E, indica ser esse o maior valor entre os gráficos analisados. Tal

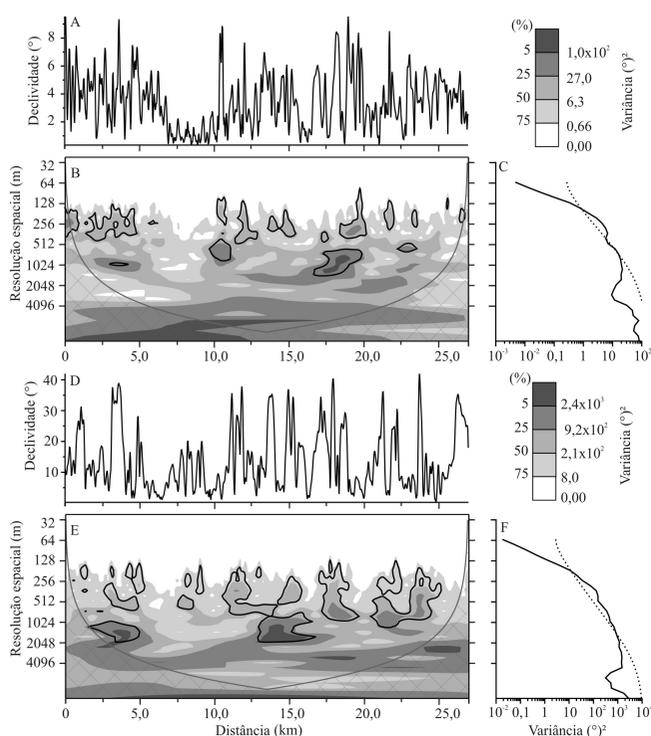


Figura 4. Declividade na Depressão (A) e Reborde (D). Isogramas de variância wavelet na Depressão (B) e Reborde (E). Regiões quadriculadas representam o cone de influência. Escalogramas da variância total na Depressão (C) e Reborde (F). Análise de significância foi realizada com o ruído vermelho como espectro de fundo, a 5% de probabilidade, nos isogramas (isolinhas) e escalogramas (linha tracejada). A legenda dos níveis de cinza indica o valor e a quantidade de variância relativa em cada nível, acima, no isograma.

fato decorre das grandes amplitudes de declividade presentes sistematicamente ao longo de todo o transecto do Reborde do Planalto. Há um padrão cíclico entre as resoluções de 128 a 1.024, e outro entre as resoluções de 1.024 a 2.048 m, embora este último não se repita sistematicamente ao longo dos 27 km. A variância total, representada no escalograma da Figura 4 F, indica uma amplitude de resoluções significativas desde, aproximadamente, 150 a 1.200 m. Ao se adotar o menor valor desta faixa como o valor da resolução espacial, para capturar os padrões presentes na variável declividade na região de Reborde, obtém-se a resolução de 150 m.

Como a região do Reborde do Planalto serve como área de contribuição da drenagem para a Depressão Central, os valores do índice de umidade topográfica foram maiores em áreas do transecto localizado na Depressão do que no transecto localizado em área de Reborde (Figura 5 A e D). Ambos os isogramas apresentam um padrão cíclico da variância significativa ao longo dos 27 km (Figura 5 B e E). A observação dos espectrogramas dessas regiões indica que há uma faixa de resoluções, entre 160 e 800 m, responsável por grande parte da variabilidade nesses transectos (Figura 5 C e F). Pelo critério de menor valor desta faixa, a resolução espacial determinante para explicar o padrão de distribuição espacial do índice de umidade topográfica seria de 160 m, em ambas as regiões.

A análise feita nos isogramas indicou que as resoluções espaciais importantes têm os seguintes valores: curvatura em perfil, 128 m em áreas de Planalto e Reborde; declividade, 140 m para as áreas da Depressão, e 150 m para as áreas de Reborde; e índice de umidade topográfica 160 m, tanto em áreas de Depressão quanto em áreas de Reborde. O critério do valor de 1/4 dessas resoluções (He et al., 2007) remeteria a tamanhos de pixel de 32 a 40 m para essas variáveis. Quanto à variável elevação, não foi possível precisar com segurança a resolução espacial que melhor representa sua variabilidade.

A definição da resolução espacial e do tamanho de pixel dessas variáveis de terreno pode ainda ser utilizada para definir a densidade de amostragem de outras covariáveis ambientais. Si & Farrell (2004) identificaram um padrão de variabilidade espacial similar entre o índice de umidade topográfica e o rendimento do trigo, em áreas de estudo do Canadá, para resoluções menores do que 140 m. Para He et al. (2007), uma resolução espacial

apropriada, determinada pela transformada wavelet para o estudo de padrões associados a variáveis de terreno e índices de área foliar, seria de 20 m de resolução.

Os resultados do nosso estudo indicam que sensores remotos com tamanhos de pixel entre 32 e 40 m devem ser utilizados em pesquisas que considerem as variáveis de terreno declividade, curvatura em perfil e índice de umidade topográfica ou, ainda, fenômenos ambientais correlacionados a elas. Em pesquisa com uso de sistemas de informação geográfica, para estudo da declividade, Valeriano (2003) observou que o mapeamento desta variável requer alta resolução para a representatividade adequada de sua variabilidade. Resoluções espaciais menores do que 40 m são desaconselhadas por esse autor, para o estudo da declividade, o que corrobora os resultados encontrados no presente trabalho.

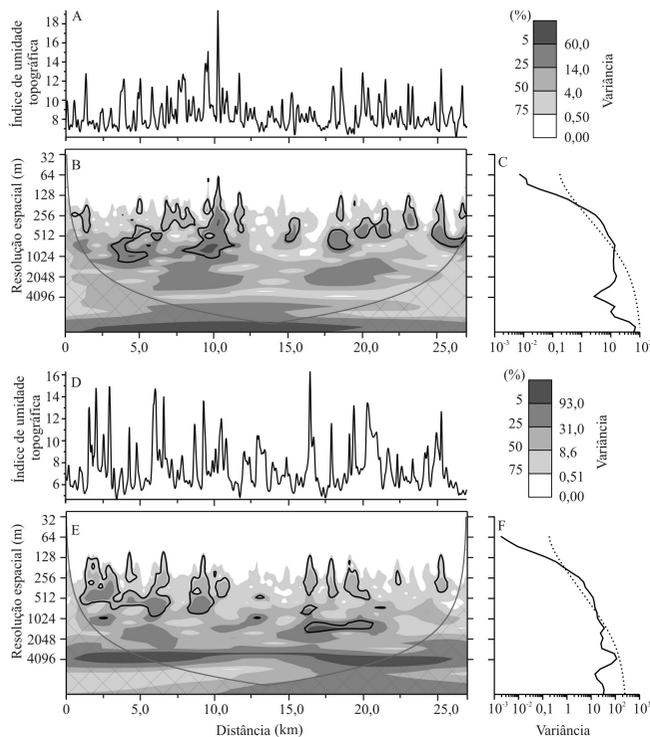


Figura 5. Índice de umidade topográfica na Depressão (A) e Rebordo (D). Isogramas de variância wavelet na Depressão (B) e Rebordo (E). Regiões quadriculadas representam o cone de influência. Escalogramas da variância total na Depressão (C) e Rebordo (F). Análise de significância foi realizada com o ruído vermelho como espectro de fundo, a 5% de probabilidade, nos isogramas (isolinhas) e escalogramas (linha tracejada). A legenda dos níveis de cinza indica o valor e a quantidade de variância relativa em cada nível, acima, no isograma.

O emprego do MDE Topodata (30 m) (Valeriano & Rossetti, 2010) para MDS pode representar um grau de detalhamento adequado, o que deverá ser testado em estudos futuros. A aplicação da informação original, oriunda do MDE SRTM com resolução de 90 m, considerada satisfatória para MDS, também deve ser avaliada, assim como a aplicação da transformada wavelet para definição da melhor resolução espacial das plataformas Landsat e Cbers aplicadas ao MDS.

Conclusões

1. A variável curvatura em perfil tem seu padrão de variabilidade espacial associado à resolução de 128 m, com tamanho de pixel de 32 m, requerido para o estudo desta variável ou de fenômenos a ela associados.

2. A variável declividade apresenta padrão de variabilidade associado a resoluções entre 140 e 150 m, o que permite definir o tamanho de pixel de 35 m como adequado para esta variável.

3. A variável índice de umidade topográfica apresenta padrão de variabilidade espacial importante em 160 m, com tamanho de pixel de 40 m necessário para seu estudo.

4. Não é possível estabelecer, para a variável elevação, um valor conclusivo e adequado de resolução espacial e tamanho de pixel.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, por concessão de bolsa e apoio financeiro.

Referências

- BIAN, L. Multiscale nature of spatial data in scaling up environmental models. In: QUATTROCHI, D.A.; GOODCHILD, M.F. (Ed.). **Scale in remote sensing and GIS**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p.13-26.
- CHO, E.; CHON, T. Application of wavelet analysis to ecological data. **Ecological Informatics**, v.1, p.229-233, 2006.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher: EDUSP, 1980. 188p.
- DONG, X.; NYREN, P.; PATTON, B.; NYREN, A.; RICHARDSON, J.; MARESCA, T. Wavelets for agriculture and biology: a tutorial with applications and outlook. **BioScience**, v.58, p.445-453, 2008.
- HE, Y.; GUO, X.; SI, B.C. Detecting grassland spatial variation by a wavelet approach. **International Journal of Remote Sensing**, v.28, p.1527-1545, 2007.

- HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers and Geosciences**, v.32, p.1283-1298, 2006.
- JUDEX, M.; THAMM, H.-P.; MENZ, G. Improving land-cover classification with a knowledge based approach and ancillary data. In: WORKSHOP OF THE EARSeL SIG ON LAND USE AND LAND COVER, 2., 2006, Bonn. **Proceedings**. Bonn: Center for Remote Sensing of Land Surfaces, 2006. p.184-191.
- LABAT, D. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. **Journal of Hydrology**, v.314, p.275-288, 2005.
- LARK, R.M.; WEBSTER, R. Analysis and elucidation of soil variation using wavelets. **European Journal of Soil Science**, v.50, p.185-206, 1999.
- MI, X.; REN, H.; OUYANG, Z.; WEI, W.; MA, K. The use of the Mexican Hat and the Morlet wavelets for detection of ecological patterns. **Plant Ecology**, v.179, p.1-19, 2005.
- SANCHEZ, P.A.; AHAMED, S.; CARRÉ, F.; HARTEMINK, A.E.; HEMPEL, J.; HUISING, J.; LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B.; MCKENZIE, N.J.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; MINASNY, B.; MONTANARELLA, L.; OKOTH, P.; PALM, C.A.; SACHS, J.D.; SHEPHERD, K.D.; VÄGEN, T.; VANLAUWE, B.; WALSH, M.G.; WINOWIECKI, L.A.; ZHANG, G. Digital soil map of the world. **Science**, v.325, p.680-681, 2009.
- SARTORI, P.L.P. Geologia e geomorfologia de Santa Maria. **Ciência e Ambiente**, v.38, p.17-42, 2009.
- SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O.A.; MCARTHUR, D. Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**, v.27, p.171-197, 2003.
- SI, B.C. Spatial scaling analyses of soil physical properties: a review of spectral and wavelet methods. **Vadose Zone Journal**, v.7, p.547-562, 2008.
- SI, B.C.; FARRELL R.E. Scale-dependent relationship between wheat yield and topographic indices: a wavelet approach. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.577-587, 2004.
- TAGIL, S.; JENNESS, J. GIS-based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. **Journal of Applied Sciences**, v.8, p.910-921, 2008.
- TORRENCE, C.; COMPO, G.P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.79, p.61-78, 1998.
- UBERTI, A.A.; KLAMT, E. Relações solo-superfícies geomórficas na encosta inferior do nordeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, p.124-132, 1984.
- VALERIANO, M. de M. Mapeamento de declividade em microbacias com Sistemas de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, p.303-310, 2003.
- VALERIANO, M. de M.; ROSSETTI, D.F. **Topodata**: seleção de coeficientes geoestatísticos para refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 74p.
- WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. **Terrain analysis**: principles and applications. New York: John Wiley and Sons, 2000. 479p.
- WU, W.; FAN, Y.; WANG, Z.; LIU, H. Assessing effects of digital elevation model resolutions on soil-landscape correlations in a hilly area. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.126, p.209-216, 2008b.
- YATES, T.T.; SI, B.C.; FARRELL, R.E.; PENNOCK, D.J. Wavelet spectra of nitrous oxide emission from hummocky terrain during spring snowmelt. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, p.1110-1120, 2006.

Recebido em 24 de março de 2011 e aprovado em 12 de janeiro de 2012