

Comissão 3.3 - Manejo e conservação do solo e da água

CONSISTÊNCIA HIDROLÓGICA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVÇÃO (MDE) PARA DEFINIÇÃO DA REDE DE DRENAGEM NA SUB-BACIA DO HORTO FLORESTAL TERRA DURA, ELDORADO DO SUL, RS⁽¹⁾

Anna Hoffmann Oliveira⁽²⁾, Marx Leandro Naves Silva⁽³⁾, Nilton Curi⁽³⁾, Gustavo Klinke Neto⁽⁴⁾, Mayesse Aparecida da Silva⁽⁵⁾ & Elias Frank de Araújo⁽⁶⁾

RESUMO

O desenvolvimento da erosão hídrica ocorre em resposta ao modo como a água se move através e sobre uma determinada paisagem. O modelo digital de elevação (MDE) deve, portanto, ser o mais preciso possível, uma vez que constitui a base para a análise do relevo. Este trabalho teve como objetivo definir um modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC) e o método de direção de fluxo mais adequado para a definição da rede de drenagem na sub-bacia do horto florestal Terra Dura, município de Eldorado do Sul, RS. Foram testados os modelos gerados com os interpoladores Topogrid e redes triangulares irregulares (Triangulated Irregular Network - TIN) linear (TIN L) e TIN natural neighbor (TIN NN). A qualidade em relação às análises hidrológicas foi avaliada por meio da comparação das curvas de nível geradas pelos modelos testados com as curvas originais da sub-bacia (escala 1:10.000); da avaliação da quantidade de áreas planas; e da comparação da drenagem gerada pelos modelos a partir dos métodos de direção de fluxo Deterministic (D8) e Deterministic infinity (D ∞ ou D infinito) com a drenagem original. Entre os modelos avaliados, o Topogrid apresentou maior consistência hidrológica, verificada na melhor continuidade das curvas de

⁽¹⁾ Trabalho extraído da tese de doutorado da primeira autora. Recebido para publicação em 6 de setembro de 2011 e aprovado em 21 de maio de 2012.

⁽²⁾ Engenheira Florestal, Doutora em Ciência do Solo, Pesquisadora no Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras (DCS-UFLA). Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: anna.ufla@gmail.com

⁽³⁾ Professor, DCS, UFLA. Bolsistas do CNPq. E-mails: marx@ufla.br; niltcuri@ufla.br

⁽⁴⁾ Engenheiro Florestal, Consultor ambiental da Vitaramae Consultoria Ambiental Ltda. CEP 36108-000 Ewbank da Câmara (MG). E-mail: gus@vitaramae.com.br

⁽⁵⁾ Engenheira Florestal, Doutoranda, DCS, UFLA. Bolsista do CNPq. E-mail: mayesse@gmail.com

⁽⁶⁾ Engenheiro Florestal, Pesquisador da CMPC Celulose Riograndense. Rua São Geraldo, 1.680. CEP 92500-000 Guaíba (RS). E-mail: ejaraujo@cmpcrs.com.br

nível (menos arestas) e maior detalhamento da área de drenagem e divisores, acarretando menor quantidade de áreas planas e caminhos de fluxo mais detalhados, independentemente do método de direção de fluxo utilizado. Em relação à rede de drenagem, o método distribuído D_{∞} obteve melhor desempenho na descrição dos caminhos de fluxo, comparado ao método de direção única D8. O MDEHC Topogrid associado ao método D_{∞} proporcionou a identificação mais precisa dos caminhos preferenciais do fluxo que formam a rede de drenagem.

Termos de indexação: Topogrid, TIN linear, TIN natural neighbor, direção de fluxo.

RESUMO: *HYDROLOGICAL CONSISTENCY OF DIGITAL ELEVATION MODELS TO DEFINE DRAINAGE NETWORK IN THE SUBBASIN OF THE TERRA DURA FOREST STAND IN ELDORADO DO SUL, RS*

The development of water erosion occurs in response to the way water moves through and over a given landscape. The digital elevation model (DEM) must therefore be as accurate as possible, since it is the basis for the analysis of a relief. The objectives of this study were to define a hydrologically consistent digital elevation model (HCDEM) and the most appropriate method to determine the flow direction of the drainage network in the sub-basin of the Terra Dura forest stand, in Eldorado do Sul, RS. The generated models were tested with Topogrid interpolation, Triangulated Irregular Networks (TIN) linear (TINL) and natural neighbor TIN (TIN NN). The quality of the hydrological analysis was evaluated by comparing the contours generated by the test models with the original curves of the sub-basin (scale 1:10.000); assessment of the amount of flat areas; and comparison of the original drainage with that generated by the models using the Deterministic (D8) and Deterministic infinity (D_{∞} or infinite D) flow direction methods. The hydrological consistency of Topogrid was the best of the studied models, as indicated by the better contour continuity (fewer contact points) and more details of the drainage area and water divides, resulting in a lower number of flat areas and more detailed flow paths, independently of the method used to determine the flow direction. In relation to the drainage network, the description of the flow paths by the D_{∞} distributed method was better than that by the D_{∞} single direction method. In conclusion, the Topogrid HCDEM associated with the D_{∞} method identified the preferential flow paths that form the drainage network most precisely.

Keywords: Topogrid, linear TIN, natural neighbor TIN, flow direction.

INTRODUÇÃO

Na paisagem, a topografia determina o comportamento do escoamento superficial, fase do ciclo hidrológico mais diretamente associada à erosão hídrica, e necessita de uma análise rigorosa e eficaz em toda a sua extensão. Tal análise é possível a partir do uso de modelos digitais de elevação (MDE). Existem diferentes métodos de interpolação para geração de MDE, os quais podem ser construídos por grades regulares retangulares, a exemplo do Topogrid (Hutchinson, 1989), e a partir da interpolação de dados vetoriais, como no caso de redes irregulares triangulares (Triangulated Irregular Network - TIN) (Câmara et al., 2001). Diversos trabalhos de análise e modelagem da erosão hídrica utilizam o modelo TIN (Ferraz et al., 2007; Ferreira et al., 2008; Liu et al., 2009), bem como o modelo Topogrid (Freitas et al., 2007; Mata et al., 2007; Bilasco et al., 2009), para

geração do MDE. Contudo, a escolha do MDE eficiente para avaliação do processo erosivo deve ser precedida de uma análise intensa de informações a partir de um ponto de vista hidrológico, pois o desenvolvimento da erosão hídrica ocorre em resposta ao modo como a água se move através e sobre a paisagem (Chagas et al., 2010).

A consistência geomorfológica e hidrológica de um MDE é alcançada quando a matriz representa fidedignamente as feições do relevo, como divisores da bacia hidrográfica, talwegues e pedoformas côncavas e convexas, e assegura a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada. Nesse sentido, entre as principais limitações de um MDE tem-se a ocorrência de depressões e áreas planas, inclusive ao longo dos rios, verificadas após o processo de geração do modelo (Chagas et al., 2010). Essas áreas, naturais ou decorrentes do próprio processo de geração do modelo,

são células cercadas por outras de maior altitude que interrompem o escoamento superficial para a célula vizinha, comprometendo qualquer estudo hidrológico de superfície (Nardi et al., 2008).

A superfície representada no MDE possibilita, além da visualização tridimensional, também a extração de informações empregadas na modelagem hidrológica, como direção de fluxo do escoamento superficial, rede de drenagem, divisores da bacia hidrográfica, declividade e orientação das vertentes (Jenson & Domingue, 1988; Fairfield & Leymarie, 1991; ANA, 2007). A direção de fluxo define a trajetória de fluxo, tanto de água como de sedimentos e nutrientes, em áreas adjacentes aos pontos de menor altitude em todas as posições na bacia hidrográfica (Nardi et al., 2008). Os métodos de direção de fluxo baseados no MDE podem ser classificados genericamente em: concentrativos, também chamados de direção única ou de oito direções, que consideram o encaminhamento de toda a água para apenas uma célula adjacente; e dispersivos ou de múltipla direção, que transferem a água para uma ou mais células adjacentes. Na análise da erosão hídrica, os métodos mais amplamente utilizados são concentrativos, a exemplo dos trabalhos de Wang et al. (2001), Rickc-Zapp et al. (2005), Zhang et al. (2008) e Ferreira et al. (2008). Independentemente da magnitude do evento chuvoso, o algoritmo de fluxo em um SIG estabelece uma rede de fluxo unidimensional, conectando cada célula com outras células da bacia hidrográfica no MDE até o exutório, onde se encontra todo o escoamento superficial gerado no interior da bacia hidrográfica.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi definir um modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC) e o método de direção de fluxo mais adequado para a definição da rede de drenagem na sub-bacia do horto florestal Terra Dura, município de Eldorado do Sul, RS.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo abrange a sub-bacia do horto florestal Terra Dura, localizada no município de Eldorado do Sul e inserida na região fisiográfica Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), nas coordenadas UTM 22J 440.902 e 441.931E, e 6.662.028 e 6.660.462 S (Datum SAD 69). A sub-bacia está situada na Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí e seus afluentes e possui área de 101 ha, declividade média de 16 %, caracterizado como relevo ondulado, e altitudes entre 85 e 185 m. De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante na região é do tipo Cfa, subtropical úmido; a precipitação pluvial média anual é de 1.500 mm, com chuvas durante todos os meses do ano e

temperatura do mês mais quente superior a 22 °C, e a do mês mais frio, superior a 3 °C.

Determinação do modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC)

A qualidade em relação às análises hidrológicas foi testada em três modelos digitais de elevação (MDE) por meio da comparação das curvas de nível geradas com base nos MDEs testados com as isolinhas originais da sub-bacia (escala 1:10.000); da avaliação da quantidade de áreas planas; e da comparação entre as drenagens geradas com base nos MDEs a partir de dois métodos de direção de fluxo (Deterministic - D8 e Deterministic infinity - D ∞) e a drenagem original.

O trabalho foi iniciado com a preparação de uma base cartográfica e o estabelecimento de um banco de dados georreferenciados. A documentação cartográfica utilizada foi constituída da carta planialtimétrica e da hidrografia geradas por aerofotogrametria em escala 1:10.000, com distância vertical entre curvas de nível igual a 5 m. O software ArcGIS 9.3 da Environmental Systems Research Institute - ESRI (2009), com o conjunto de ferramentas denominado TauDEM 5.0 (Tarboton & Mohammed, 2010), foi utilizado para dar suporte às análises e ao geoprocessamento dos dados existentes, bem como dos dados gerados.

Neste estudo foram avaliados os MDEs gerados por três interpoladores com tamanho de célula (*pixel*) de 5 m: Topogrid, TIN Linear (TIN L) e TIN Natural Neighbor (TIN NN). Para avaliação da consistência hidrológica dos modelos a serem utilizados na modelagem hidrológica na sub-bacia, realizaram-se: a) vetorização dos MDEs com a geração de curvas de nível com metade da equidistância original (5 m), para comparação visual (avaliação qualitativa); b) comparação altimétrica entre os modelos gerados por meio do teste t e da raiz do erro médio quadrático; c) análise da continuidade do escoamento superficial na rede de drenagem, realizada pela avaliação das áreas planas obtidas; e d) comparação entre a drenagem mapeada e a drenagem derivada pelos diferentes MDEs e os métodos de direção de fluxo (D8 e D ∞).

O teste estatístico usado para avaliação da qualidade altimétrica dos modelos foi o teste t de Student (Zwillinger & Kokoska, 2000) a 10 % de significância, em que H₀: não há diferença significativa entre a base planialtimétrica e os modelos Topogrid, TIN L e TIN NN. Foram utilizados 94 pontos amostrais, distribuídos ao longo das curvas de nível de referência em toda a bacia de estudo. Com o mesmo conjunto amostral, o nível de erro ou incerteza contido nos dados foi obtido pela análise de sensibilidade baseada na raiz do erro médio quadrático (REMQ). O REMQ foi calculado pela equação: $REMQ = (\sqrt{(Z_i - Z_t)^2 / n})$, em que Z_i = valor altimétrico do MDE (TIN L; TIN NN; Topogrid); Z_t = valor altimétrico da curva de nível de referência; e n = número de amostras.

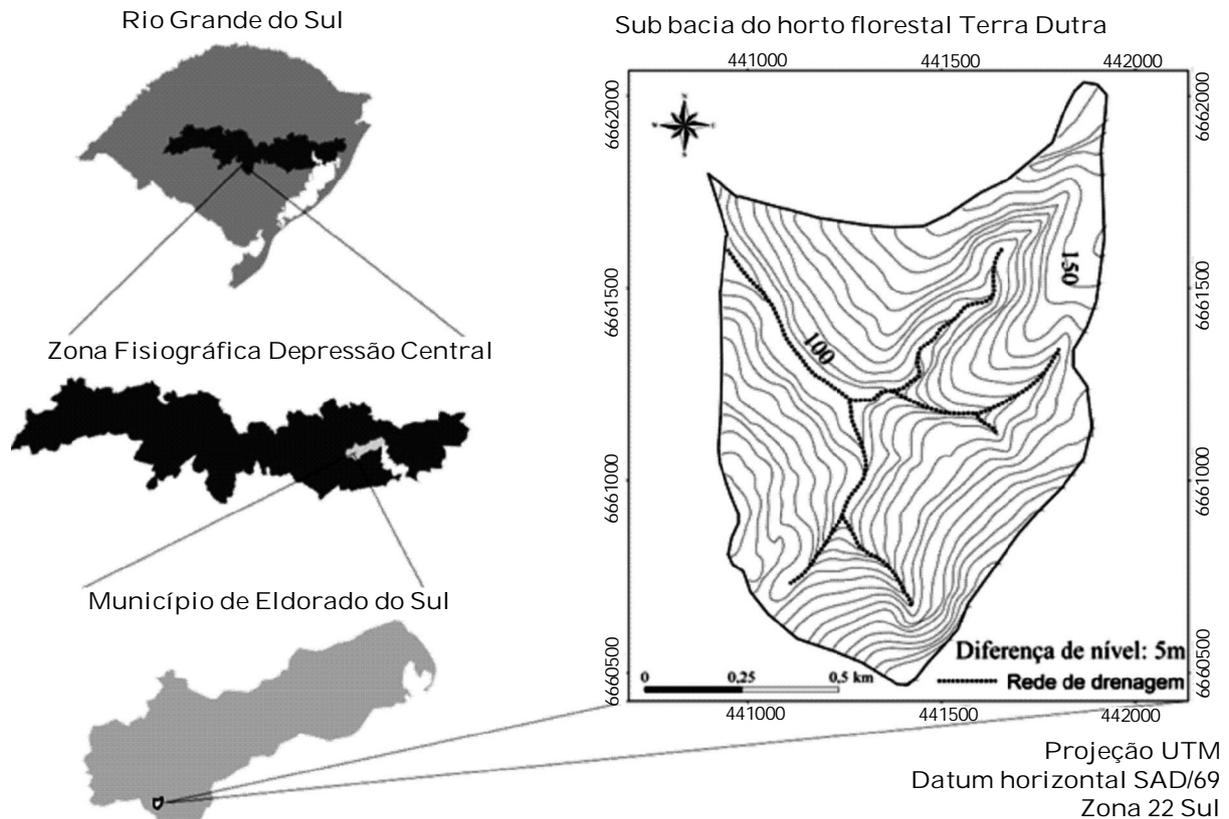


Figura 1. Localização da sub-bacia do horto florestal Terra Dura, município de Eldorado do Sul, RS.

A quantificação das áreas planas foi feita pelo mapa de aspecto, que expressa o ângulo de orientação da vertente em relação ao norte. Na correção das depressões espúrias nos MDEs foi utilizada a função *Pit remove* (ArcGis9.3 TauDEM 5.0) (ESRI, 2009; Tarboton & Mohammed, 2010), que considera as altitudes das células vizinhas para preencher essas áreas.

Análise da direção de fluxo

A estimativa da direção de fluxo foi obtida por dois métodos: Deterministic 8 (D8) (O'Callaghan & Mark, 1984) e Deterministic infinity (D_{∞} ou D infinito) (Tarboton, 1997). No método designado D8, o fluxo de cada célula é atribuído a um dos seus oito vizinhos na direção com declive de encosta mais íngreme. Já no caso do método D_{∞} , o fluxo da água é distribuído proporcionalmente e tomado na encosta de declive mais acentuado, distribuindo-se entre as oito faces geradas pela janela de 3 x 3 que contém a célula analisada no centro. A simulação da rede hidrográfica foi realizada por meio da determinação das áreas de fluxo acumulado definidas exclusivamente com base na direção de fluxo. No fluxo acumulado, cada célula recebe o valor correspondente ao somatório de todas as células cujo escoamento contribuiu para a célula analisada (Jenson & Domingue, 1988), supondo que todas as chuvas se

tornem enxurradas e que não haja interceptação, evapotranspiração ou perda de águas subterrâneas.

Ao definir as direções de escoamento, espera-se que a rede de drenagem resultante localize-se dentro da calha do rio. Cada rede hidrográfica gerada pelos dois métodos de direção de fluxo (D8 e D_{∞}) nos três MDEs avaliados foi comparada com a rede hidrográfica considerada verdadeira, traçada no levantamento planialtimétrico da sub-bacia (escala 1:10.000). Para análise do desempenho dos modelos quanto à rede de drenagem, foi feita a análise de sensibilidade baseada no erro médio, conforme método proposto por Buarque et al. (2009). A estimativa do erro foi obtida admitindo-se uma área entre a linha da rede de drenagem tomada como verdadeira e uma linha correspondente à rede de drenagem obtida a partir das direções de fluxo. Essa área, dividida pelo comprimento do rio, resultou no erro médio - uma largura média de erro entre as duas drenagens que representa fisicamente a distância média entre os traçados das drenagens geradas e verdadeira. As drenagens obtidas foram comparadas considerando-se a largura média de 4 m da rede de drenagem verdadeira, a fim de não superestimar os erros gerados, pois a rede de drenagem estimada pode passar dentro da calha do rio mesmo não coincidindo com o traçado real, conforme destacado por Buarque et al. (2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação dos MDEs

Na análise visual, observa-se que as curvas de nível obtidas pelo modelo Topogrid apresentaram maior semelhança com a base vetorial original da sub-bacia do horto florestal Terra Dura, verificada na precisa sobreposição com as curvas originais e em relação à continuidade das curvas de nível (menos arestas) (Figura 2). Entre si, as isolinhas obtidas a partir dos modelos testados apresentaram poucas diferenças, as quais se localizaram principalmente a montante e a jusante das linhas de drenagem. As diferenças a montante devem ser atribuídas à regularização do escoamento executada pelo método Topogrid, que corrige o MDE para um modelo hidrológicamente consistente. As diferenças a jusante, contudo, são atribuídas à interpretação do modelo TIN, que não gera um bom detalhamento de grandes áreas

(triângulos) formadas entre curvas de nível de mesma altitude.

A correção do relevo efetuada pelo modelo Topogrid, observada no detalhe da figura 2, é realizada a partir da combinação de métodos de interpolação local e global (Hutchinson, 1989). Essa associação permite que as mudanças bruscas de declividade na área de drenagem e divisores sejam ajustadas, gerando uma estrutura de drenagem conectada característica de um padrão definido pela força erosiva do fluxo d'água.

Os métodos linear (L) e natural neighbor (NN) apresentaram grande similaridade, pois ambos são associados ao modelo TIN. Contudo, a menor frequência de arestas no método NN destacou melhor a continuidade da superfície na geração das curvas de nível, comparado ao linear (Figura 2). No modelo TIN L, a altura de cada célula é definida a partir do encontro de cada triângulo, onde as curvas de nível derivadas são segmentos de reta paralelos no interior de cada triângulo e formam uniões angulosas, segundo as arestas da triangulação, construindo uma superfície contínua, mas não suave. Já no modelo TIN NN, as arestas foram suavizadas em decorrência de sua maior complexidade, que define a altura pela ponderação da área circular próxima aos vértices de cada triângulo presente ao redor de cada centro de célula formada (ESRI, 2009).

A análise estatística dos modelos em relação à base altimétrica, para todos os modelos testados na sub-bacia do horto florestal Terra Dura, não apresentou diferença estatística significativa em relação à base vetorial original de escala 1:10.000 (Quadro 1). Os erros foram reduzidos para todos os modelos, concordando com Liu et al. (2009) e Chagas et al. (2010), que destacam a elevada confiabilidade de modelos que se originam de bases planialtimétricas precisas. Contudo, a análise do erro revelou um mesmo REMQ para os interpoladores TIN, de 0,247, duas vezes superior ao observado para o Topogrid, de 0,114 (Quadro 1). Esses resultados corroboram o observado por Zeilhofer (2001). Esse autor utilizou cartas topográficas na escala 1:100.000 e constatou menor

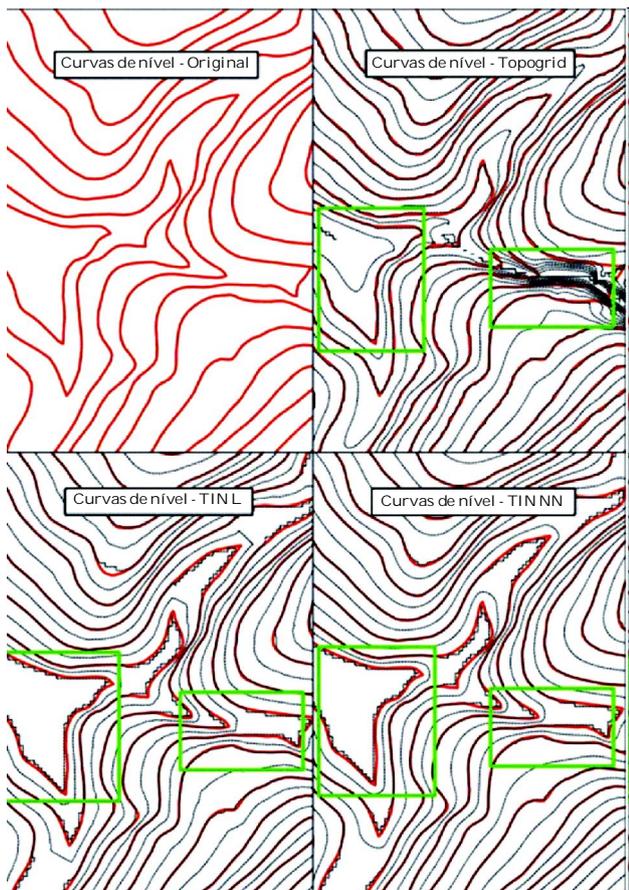


Figura 2. Curvas de nível original e geradas pelos modelos Topogrid, TIN Linear e TIN Natural Neighbor, para a sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS). No destaque (verde), as principais diferenças entre os modelos (preto) e as curvas originais (vermelho): a montante e a jusante das linhas de drenagem e na continuidade das curvas de nível (arestas).

Quadro 1. Resultado do teste t para avaliação da diferença altimétrica entre a base planialtimétrica e os MDEs Topogrid, TIN linear (L) e TIN natural neighbor (NN)

	Topogrid	TIN L	TIN NN
Amostras	94	94	94
t_{cal}	1,214	-0,831	-0,816
t_{tab}	1,29	1,29	1,29
REMQ	0,114	0,247	0,247

*REMQ: raiz do erro médio quadrático. Se $t_{cal} < t_{tab}$: aceita-se H_0 . H_0 : não há diferença significativa entre a base planialtimétrica e os modelos Topogrid, TIN L e TIN NN.

REMO do Topogrid, de 11,43, comparado ao interpolador TIN, com 13,00, em estudo para avaliar as características fisiográficas da Bacia do Rio Cuiabá. Redivo et al. (2002) também relataram desempenho menos satisfatório do MDE gerado por interpolador TIN, em relação ao Topogrid, para delimitação de bacias hidrográficas.

A presença de áreas planas revelou maiores diferenças entre os modelos (Figura 3). O maior detalhamento do método Topogrid reduziu esses locais a 0,1 %, enquanto os métodos TIN L e TIN NN ficaram com 5,9 e 4,6 %, respectivamente. Os resultados dos modelos TIN são próximos, apesar dos diferentes métodos de interpolação, pois o critério para conexão das amostras é a produção de triângulos bem formados, ou com boa razão de aspecto (Câmara et al., 2001). Esses resultados concordam com o observado por Zeilhofer (2001). Esse autor verificou que a triangulação (TIN) reproduziu, caracteristicamente, as altitudes originais das curvas de nível, enquanto o Topogrid permitiu a modificação das elevações originais conforme as trajetórias da rede de drenagem, garantindo a convergência do relevo. Assim, os algoritmos de triangulação geraram mais áreas planas porque atribuíram o mesmo valor da linha para a área entre duas isolinhas.

Direção de fluxo

Nas figuras 4 e 5, os baixos valores de fluxo acumulado correspondem geralmente a áreas de interflúvios, e valores altos concentram-se nas redes de drenagem. Os métodos de determinação da direção do escoamento testados (D8 e D_{∞}) produziram resultados diferentes, os quais nem sempre concordam com a realidade, principalmente quando aplicados em regiões planas, confirmando observações de Ramos et al. (2003), Nardi et al. (2008) e Buarque et al. (2009), pois dependem do tratamento que cada algoritmo dá a essas regiões. Como o método D8 direciona todo o fluxo para a célula de maior gradiente, observam-se linhas de drenagem retilíneas em todos os modelos testados (Figura 4), ainda mais destacadas nas áreas

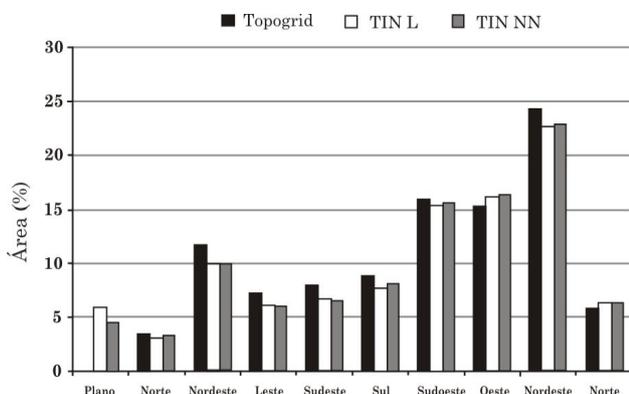


Figura 3. Faces de exposição geradas a partir dos MDEs avaliados.

planas. Verifica-se maior interferência dessas áreas na associação do método D8 com os modelos TIN, quando comparados ao método D_{∞} com o modelo Topogrid (Figuras 4 e 5). De acordo com Zeilhofer (2001), as áreas planas, que representam interrupções e deslocamentos da rede de drenagem e do fluxo superficial acumulado, mostram que o modelo TIN não é apropriado para a elaboração desses parâmetros.

A desvantagem do método D8 surge da determinação do fluxo dentro de apenas uma das oito direções possíveis, separadas por 45° , que se expressa em padrões de fluxo paralelos (ou convergentes) nas direções dos pontos cardeais ou diagonais, não sendo possíveis valores intermediários a esses (Nardi et al., 2008). Em uma topografia complexa, contudo, o fluxo divergente frequentemente pode ocorrer, causando significativo impacto na delimitação da área de contribuição da bacia (Winchell et al., 2008).

O método D_{∞} , por sua vez, como considera uma distribuição proporcional entre as células de acordo com a declividade, não apresentou os traçados angulares característicos da restrição de caminhos do fluxo. Uma grande vantagem desse método é considerar a forma da superfície divergente, ou seja, o fluxo também se torna divergente, como ressaltado por Bogaart & Troch (2006). Consequentemente, esse método proporcionou o maior detalhamento e melhor definição dos caminhos preferenciais do fluxo que formam a rede de drenagem da sub-bacia (Figura 5), sendo mais preciso, portanto, para utilização em análises hidrológicas.

O cálculo do erro médio entre a drenagem observada e a estimada - realizado a fim de avaliar quantitativamente o desempenho da interação MDE e método de direção de fluxo - constatou menor erro do modelo Topogrid com similaridade dos métodos D8 e D_{∞} (Quadro 2). Ou seja, esse modelo obteve maior detalhamento dos caminhos do escoamento e concordância entre as redes de drenagem (Figura 5). Zeilhofer (2001) também verificou a superioridade do Topogrid em relação ao modelo TIN para aplicações hidrológicas, manifestada principalmente na simulação da rede de drenagem e do fluxo superficial acumulado pelo método D8. O maior erro foi observado com a utilização do método D8 no MDE TIN L (Quadro 2), também constatado na análise visual (Figura 4). Em MDE TIN L e TIN NN, as diferenças ocorreram principalmente devido à influência dos métodos de direção de fluxo.

O método D8 provocou erros quanto à orientação da matriz da rede de drenagem (Figura 6), concordando com Ramos et al. (2007) e Winchell et al. (2008). A inabilidade do método de direção única (D8) em simular a direção de fluxo ao longo da inclinação da encosta também é ressaltada por Nardi et al. (2008), que destacam o melhor desempenho do método de direções múltiplas (D_{∞}), assim como Guntner et al. (2004), Pan et al. (2004), Bogaart & Troch (2006),

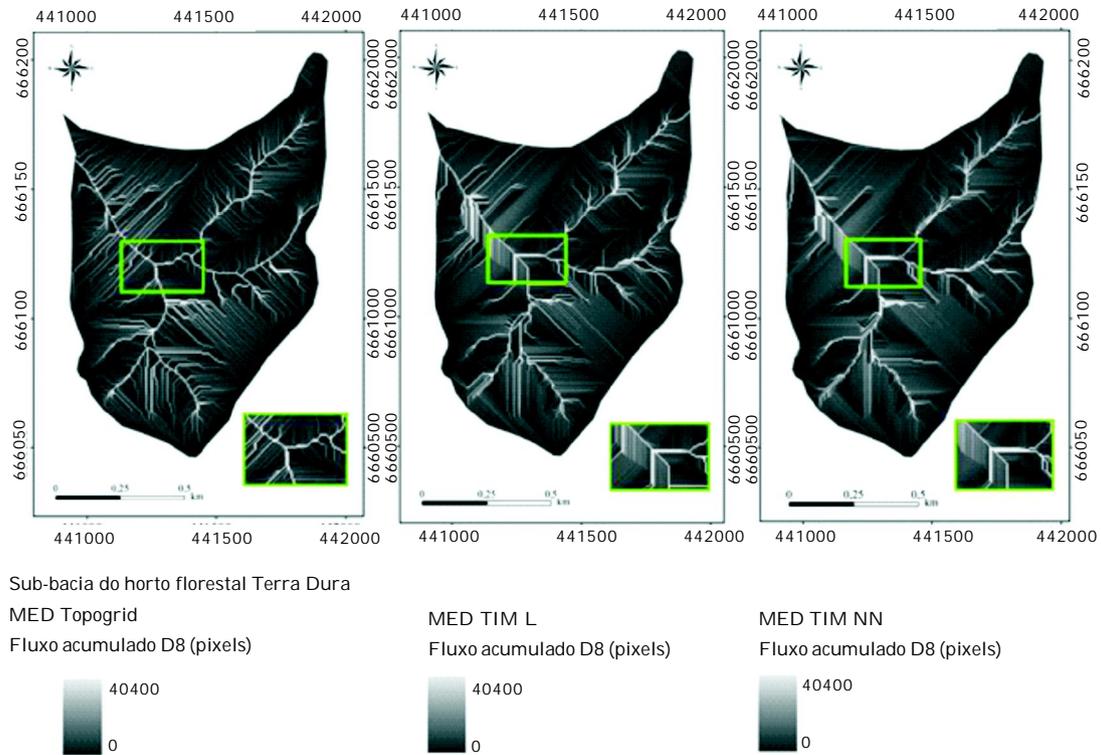


Figura 4. Fluxo acumulado pelo método D8 para os três modelos digitais de elevação testados, na sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS). No destaque (verde), linhas de drenagem formadas em área plana pelos modelos testados.

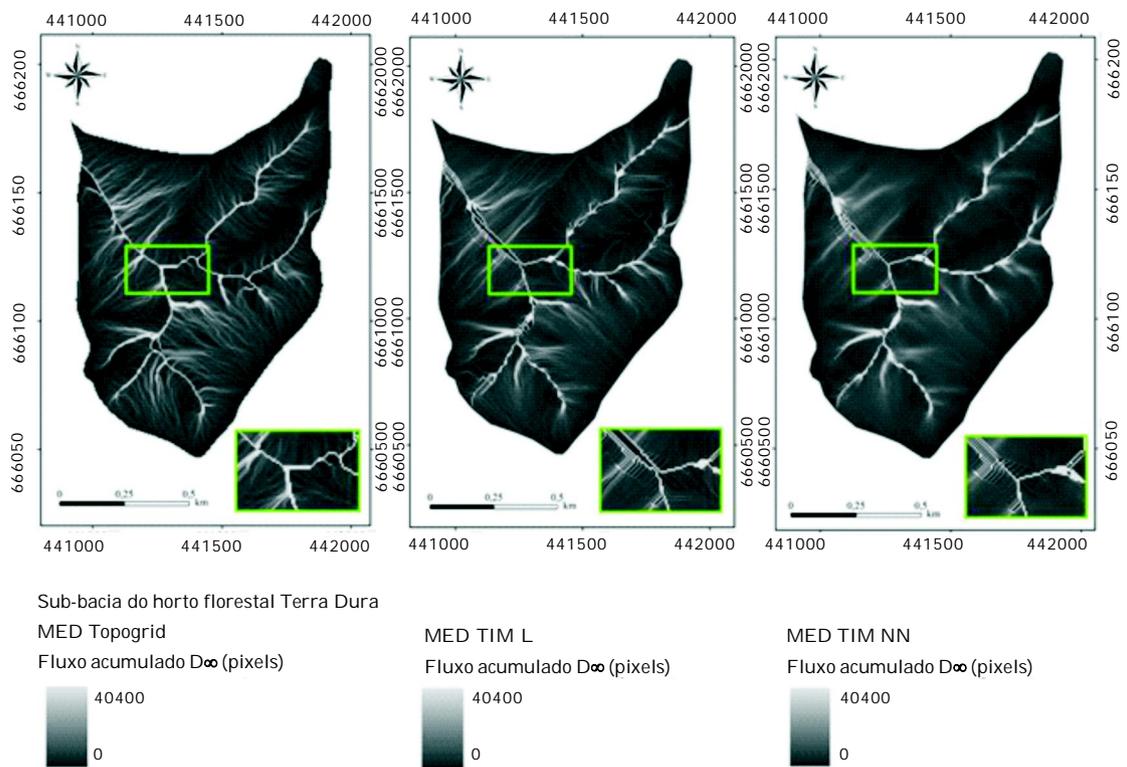


Figura 5. Fluxo acumulado obtido pelo método D ∞ para os três modelos digitais de elevação testados, na sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS). No destaque (verde), linhas de drenagem formadas em área plana pelos modelos testados.

Erskine et al. (2006), Farinasso et al. (2006), Freitas et al. (2007) e Mata et al. (2007), ao analisarem a espacialização dos processos erosivos. Esses resultados foram verificados ainda nos estudos de Desmet & Govers (1996) para modelagem do fator topográfico,

os quais optaram por um método de direção múltipla de fluxo em razão do melhor ajuste nas análises dos processos erosivos.

CONCLUSÕES

1. O modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) escolhido para definir a rede de drenagem subsidiar as análises de suscetibilidade à erosão hídrica na sub-bacia do horto florestal Terra Dura foi o Topogrid. Esse modelo apresentou maior consistência hidrológica, verificada na melhor continuidade das curvas de nível (menos arestas) e no maior detalhamento da área de drenagem e divisores, acarretando menor quantidade de áreas planas.

2. A rede de drenagem estimada para a sub-bacia do horto florestal Terra Dura foi influenciada tanto pelo MDE quanto pelo método de direção de fluxo, podendo apresentar diferenças em relação à realidade. O método D_{∞} associado ao modelo Topogrid proporcionou a identificação mais precisa dos caminhos preferenciais do fluxo e, conseqüentemente, definiu a rede de drenagem com maior precisão.

AGRADECIMENTOS

À CMPC Celulose Riograndense pela logística de campo na implantação, condução e coleta de dados experimentais e ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelas bolsas de estudo.

LITERATURA CITADA

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Manual de construção da base hidrográfica ottocodificada: fase 1 - construção da base topológica de hidrografia e ottobacias conforme a codificação de bacias hidrográficas de Otto Pfafstetter: Versão 2.0. Brasília, ANA/SGI, 2007. 144p.
- BILASCO, ST.; HORVATH, CS.; SOROCOVSCHI, V.; COCEAN, P. & ONCU, M. Implementation of the USLE model using GIS techniques: Case study the Somesean plateau. *Carpath. J. Earth Environ.*, 4:123-132, 2009.
- BOGAART, P.W. & TROCH, P.A. Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10:925-936, 2006.
- BUARQUE, D.C.; FAN, F.M.; PAZ, A.R. & COLLISCHONN, W. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. *R. Bras. Rec. Hidric.*, 14:91-103, 2009.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M. & D'ALGE, J.C. Introdução à ciência da geoinformação. São José dos Campos, INPE, 2001. 324p.

Quadro 2. Diferenças entre a rede de drenagem estimada e a observada, para os MDEs avaliados

Modelo	Método	Erro	Erro médio
		m ²	m
Topogrid	D8	3.549,3	1,37
Topogrid	D_{∞}	3.410,9	1,31
TIN L	D8	18.958,8	7,31
TIN L	D_{∞}	6.766,57	2,61
TIN NN	D8	13.558,9	5,23
TIN NN	D_{∞}	6.477,6	2,5

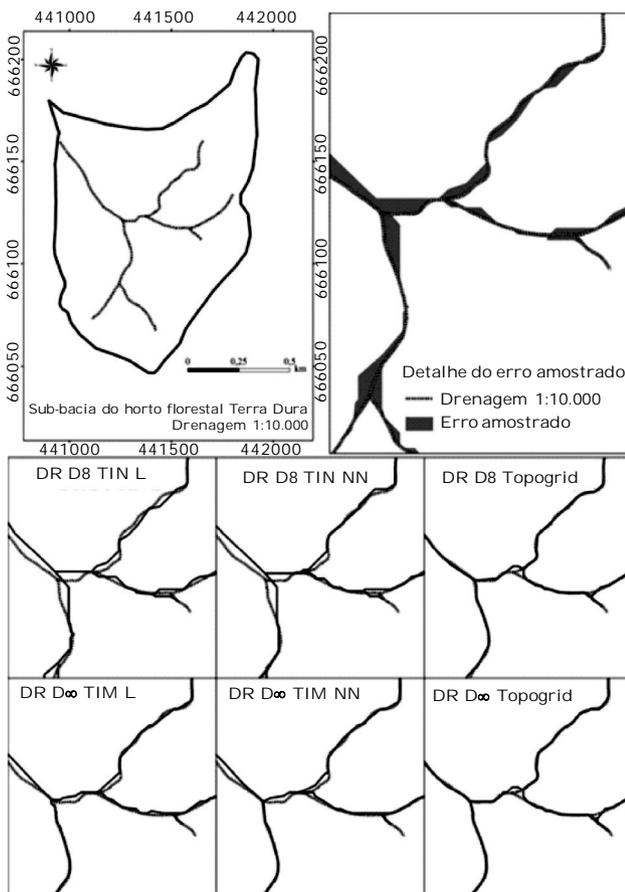


Figura 6. Rede de drenagem verdadeira obtida por levantamento planialtimétrico (linha tracejada) vs rede de drenagem gerada pelos métodos D8 e D_{∞} (linha contínua) nos MDEs avaliados. No detalhe, a área entre as duas linhas utilizadas na estimativa do erro de determinação da rede de drenagem.

- CHAGAS, C.S.; FERNANDES FILHO, E.I.; ROCHA, M.F.; CARVALHO JÚNIOR, W. & SOUZA NETO, N.C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 14:218-226, 2010.
- DESMET, P.J.J. & GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *J. Soil Water Conserv.*, 51:427-433, 1996.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE – ESRI. ArcGIS Professional GIS for the desktop, version 9.3. Redlands, 2009. CD ROM.
- ERSKINE, R.H.T.R.G.; RAMIREZ, J.A. & MACDONALD, L.H. Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. *Water Res. Res.*, 42:9416-9419, 2006.
- FAIRFIELD, J. & LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Res. Res.*, 27:709-717, 1991.
- FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T. & RAMOS, V.M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS equação universal de perdas de solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba PI-MA. *R. Bras. Geomorf.*, 7:73-85, 2006.
- FERRAZ, S.F.B.; MARSON, J.C.; FONTANA, C.R. & LIMA, W.P. Uso de indicadores hidrológicos para classificação de trechos de estradas florestais quanto ao escoamento superficial. *Sci. For.*, 75:39-49, 2007.
- FERREIRA, A.G.; GONÇALVES, A.C. & DIAS, S.S. Avaliação da sustentabilidade dos sistemas florestais em função da erosão. *Silva Lusit.*, 16:55-67, 2008.
- FREITAS, L.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; MARTINS, E.S. & GOMES-LOEBMANN, D. Determinação do potencial de erosão a partir da utilização da EUPS na bacia do Rio Preto. *Espaço Geogr.*, 10:431-452, 2007.
- GÜNTNER, A.; SEIBERT, J. & UHLENBROOK, S. Modeling spatial patterns of saturated areas: An evaluation of different terrain indices. *Water Res. Res.*, 40:5114-5119, 2004.
- HUTCHINSON, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *J. Hydrol.*, 106:211-232, 1989.
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogr. Eng. Rem. Sens.*, 54:1593-1600, 1988.
- LIU, H.; FOHRER, N.; HÖRMANN, G. & KIESEL, J. Suitability of S factor algorithms for soil loss estimation at gently sloped landscapes. *Catena*, 77:248-255, 2009.
- MATA, C.L.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; CARVALHO, A.P.F.; GOMES, R.A.T.; MARTINS, E.S. & GUIMARÃES, R.F. Avaliação multitemporal da susceptibilidade erosiva na bacia do rio Uruçuia (MG) por meio da Equação Universal de Perda de Solos. *R. Bras. Geomorf.*, 8:57-71, 2007.
- NARDI, F.; GRIMALDI, S.; SANTINI, M.; PETROSELLI, A. & UBERTINI, L. Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using digital elevation models: the flat area issue. *Hydrol. Sci. J.*, 53:1176-1193, 2008.
- O'CALLAGHAN, J.F. & MARK, D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Comput. Vision Graph.*, 28:323-344, 1984.
- PAN, F.; PETERS-LIDARD, C.D.; SALE, M.J. & KING, A.W. A comparison of geographical information systems-based algorithms for computing the TOPMODEL topographic index. *Water Res. Res.*, 40:1-11, 2004.
- RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; REDIVO, A.L.; GOMES R.A.T.; CARDOSO, F.B.F. & FERNANDES, N.F. Algorithm development for incorporating soil physical properties of each different soil class in a land-slide prediction model (SHALSTAB). *Solos Rochas*, 30:139-148, 2007.
- RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; REDIVO, A.L.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; FERNANDES, N.F. & GOMES, R.A.T. Avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição. *R. Bras. Geomorf.*, 4:41-49, 2003.
- REDIVO, A.L.; GUIMARÃES, R.F.; RAMOS, V.M.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. & MARTINS, E.S. Comparação entre diferentes interpoladores na delimitação de bacias hidrográficas. *Planaltina, Embrapa Cerrados*, 2002. 20p.
- RIEKE-ZAPP, D.H. & NEARING, M.A. Slope shape effects on erosion: A laboratory study. *Soil Sci. Soc. An. I.*, 69:1.463-1.471, 2005.
- TARBOTON, D.G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in the grid digital elevation models. *Water Res. Res.*, 33:309-319, 1997.
- TARBOTON, D.G. & MOHAMMED, I.N. TauDem 5.0: terrain analysis using digital elevation models. Disponível em: <<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5.0/downloads.html>>. Acesso em: 2 set. de 2010.
- WANG, G.; GERTNER, G.; PARYSON, P. & ANDERSON, A. Spatial prediction and uncertainty assessment of topographic factor for revised universal soil loss equation using digital elevation models. *J. Photogram Remote Sens.*, 56: 66-80, 2001.
- WINCHELL, M.F.; JACKSON, S.H.; WADLEY, A.M. & SRINIVASAN, R. Extension and validation of a geographic information system-based method for calculating the Revised Universal Soil Loss Equation length-slope factor for erosion risk assessments in large watersheds. *J. Soil Water Conserv.*, 63:105-111, 2008.
- ZHANG, Q.; WANG, L. & WU, F. Gis-based assessment of soil erosion at nihe gou catchment agric. *Sci. China*, 7: 746-753, 2008.
- ZEILHOFER, P. Modelação de relevo e obtenção de parâmetros fisiográficos na Bacia do Rio Cuiabá. *R. Bras. Rec. Hídricos*, 6:95-109, 2001.
- ZWILLINGER, D. & KOKOSKA, S. Standard probability and statistics tables and formulary. Boca Raton, Chapman & Hall/CRC, 2000. 554p.

