

Análise do efeito da resolução espacial do modelo digital de elevação na obtenção do limiar topográfico para predição de processos erosivos

Monique de Paula Neves¹
Osni José Pejon¹

¹Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 - Parque Arnold Schimidt
13566-590 - São Carlos - SP, Brasil
moniqueneves@usp.br
pejon@sc.usp.br

Abstract. The morphometric analysis has been applied to determine the threshold that conditions the erosion processes. Several authors propose an inverse relationship between contribution area (A) and mean slope (S). These parameters can be obtained by several methods, among them the geographic information system (GIS), because it facilitates the processing and integration of spatial data. Besides, the acquisition of the parameters depends on the elaboration of a digital elevation model (DEM) with appropriate spatial resolution that guarantees the representation of the geomorphological processes. The present work has for objectives to verify the influence of the spatial resolution of the DEM with 2, 10 and 30 meters, in the determination of the relationship contribution area and mean slope. The area of study is the watershed of the Córrego Alpes and Retiro, located in the municipality of São Pedro, state of São Paulo, with an approximate area of 7 km². The DEM, flow direction and slope were carried out in GIS and allowed to calculate for each erosion feature, the contribution area and mean slope. The data obtained by DEM with spatial resolution of (2m) presented more accurate results and they allowed to define a threshold of trigger of the most representative erosions in agreement with the characteristics of the area in study.

Palavras-chave: morphometric analysis, geoprocessing, DEM, thresholds, análise morfométrica, geoprocessamento, MDE, limiares.

1. Introdução

A dinâmica dos processos erosivos depende de um conjunto de fatores que condicionam a ocorrência do fenômeno, como climáticos, hidrológicos, geológicos, pedológicos e geomorfológicos. Para desenvolver uma avaliação adequada das erosões deve-se considerar as interações existentes entre estes fatores. Desta forma, em muitos trabalhos tem sido adotada a análise morfométrica das feições erosivas, a fim de estabelecer um limiar crítico (*threshold*) que condicione o desencadeamento das erosões. Um dos primeiros autores na literatura a adotar essa relação foram Patton e Schumm (1975), que propuseram uma relação inversa entre área de contribuição (A) *versus* declividade (S). Com base nesta relação diversos trabalhos foram desenvolvidos: Montgomery e Dietrich (1994); Menéndez-Duarte et al. (2007) e Araújo (2011).

Para a obtenção dos parâmetros morfométricos (A e S) tem sido utilizado diversos métodos, como fotografias aéreas, mapas topográficos, trabalhos de campo e sistema de informações geográficas (SIG), conforme citado por Vandaele et al. (1996). Dentre estes métodos destaca-se o uso do SIG que permite realizar o processamento automático e integração de dados espaciais em uma única base de dados.

Além disso, a aquisição destes parâmetros está diretamente relacionada com a elaboração de modelos matemáticos, como o Modelo Digital de Elevação (MDE), que consiste na representação de uma superfície contínua, a partir da interpolação de cotas do terreno. A precisão das informações obtidas a partir do MDE, como área de contribuição e declividade, apresentam forte relação com a sua resolução espacial. Neste sentido, torna-se fundamental que estes modelos sejam elaborados de maneira hidrológicamente consistente e que sua resolução espacial esteja em conformidade com a área em estudo, a fim de representar de maneira fidedigna, os processos a serem analisados.

Quinn et al. (1991), demonstraram que a obtenção do índice topográfico ($a/\tan\beta$), que relaciona índice geomorfológico (a) e ângulo da declividade ($\tan\beta$), essencial para analisar os mecanismos de escoamento em encostas, depende da escala utilizada na elaboração do MDE, uma vez que a representação adequada de seus parâmetros, depende do tamanho de pixel adotado. Os autores destacam também a importância de uma avaliação em campo, a fim de que a representação espacial da superfície esteja em consonância com as reais características da área.

De acordo com Zhang e Montgomery (1994) a predição de processos de escoamento superficial, como a representação das zonas de saturação, em estudos geomorfológicos, depende do tamanho do *grid* a ser utilizado. Isto é importante para que os dados espaciais estejam em conformidade com as características da encosta, favorecendo a representação dos processos do meio físico. Os autores recomendam ainda, que, para a simulação de processos relacionados ao escoamento superficial em vertentes, deve-se adotar pixels com resolução menor que 10 metros.

O presente artigo tem por **objetivo** verificar a influência da resolução espacial do modelo digital de elevação (MDE) na determinação da relação declividade média (S) *versus* área de contribuição (A), que condiciona o limiar de desencadeamento de processos erosivos. Para tanto, foram utilizados três modelos digitais de elevação com resolução de 2, 10 e 30 metros e pontos de feições erosivas, adaptadas do trabalho de Araújo (2011).

2. Área de estudo e métodos de trabalho

2.1 Área de estudo

A área em estudo abrange as sub-bacias dos Córregos Água dos Alpes e Retiro, localizadas no município de São Pedro, na região centro-oeste do estado de São Paulo, nas

coordenadas UTM 196000 - 200000mE e 7496000 - 7502000mN, na zona 23S e possuem uma área aproximada de 7km² (Figura 1).

Conforme constatado por Gomes (2002) a região apresenta alta susceptibilidade à formação de erosões, desde sulco à voçoroca, em decorrência das características geológicas e do relevo. As erosões estão associadas principalmente aos materiais transportados e aos terrenos inclinados (declividade superior a 10%), localizados próximos às redes de drenagem. A Figura 2 apresenta uma área da bacia em estudo, com concentração de feições erosivas.



Figura 1. Localização da área em estudo.

Quanto as características gerais da área em estudo, o clima predominante segundo a classificação de Köppen é o Cwa (clima sub-tropical úmido) com inverno seco e verão quente (ARAÚJO, 2011). No que tange as formações geológicas, predomina o afloramento de rochas sedimentares da Formação Pirambóia (PEJON, 1992), que se caracterizam pela presença de arenitos. Quanto aos materiais inconsolidados, segundo Gomes (2002), há ocorrência de materiais transportados e residuais associados à Formação Pirambóia, e sedimentos aluvionares (Figura 2). De acordo com IPT (1981), a geomorfologia da área está inserida na Depressão Periférica Paulista.

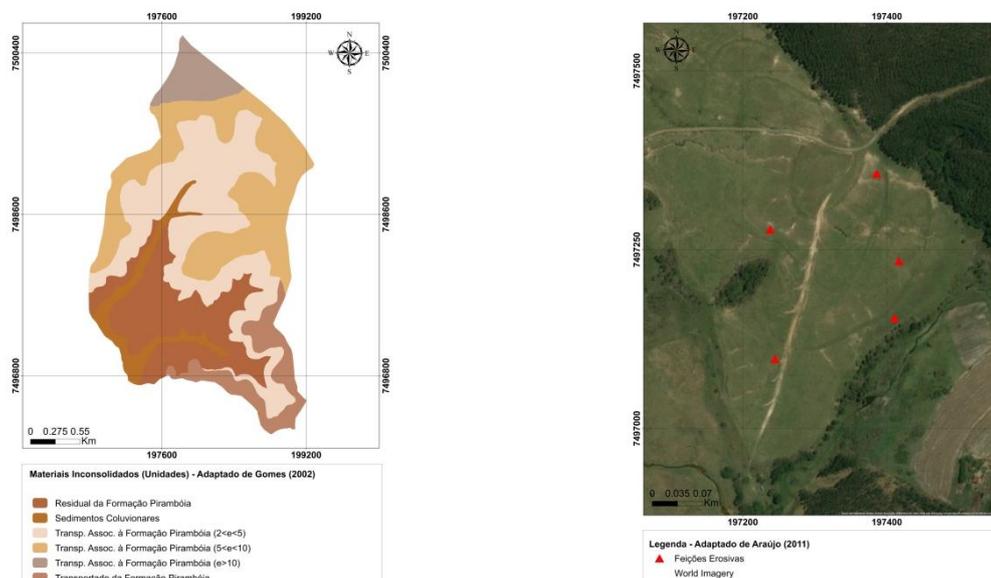


Figura 2. Mapa de materiais inconsolidados e pontos de feições erosivas.

2.2 Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais: folhas topográficas do IGC (1:10.000); mapas geológico-geotécnicos (GOMES, 2002 e ARAÚJO, 2011); e os softwares ArcGIS 10.3 e TauDEM 5.0. A Figura 3 apresenta a sistemática de trabalho.

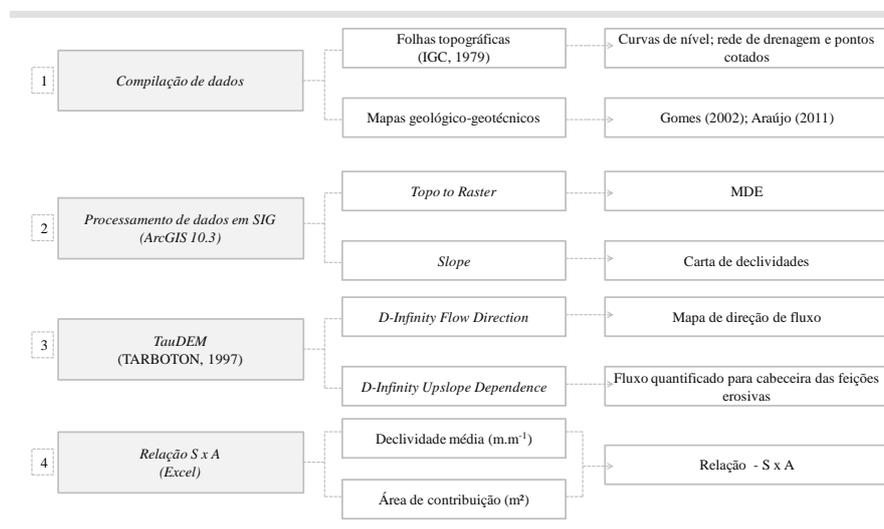


Figura 3. Etapas de trabalho.

2.2.1 Compilação de dados

Esta etapa compreendeu o levantamento de informações existentes da área em estudo: folhas topográficas e mapas geológico-geotécnicos. As folhas topográficas, na escala 1:10.000, foram obtidas do IGC; e os mapas geológico-geotécnicos de Gomes (2002) e Araújo (2011), elaborados em escala de detalhe. As curvas de nível, pontos cotados, rede de drenagem e mapas de inventário de feições erosivas, já haviam sido vetorizados, portanto nesta etapa realizou-se a adequação destes arquivos em ambiente SIG, para a área em estudo. Todos os dados compilados nesta etapa foram organizados em um banco de dados georreferenciados.

2.2.2 Processamento de dados em SIG (ArcGIS 10.3)

- *Modelo Digital de Elevação (MDE)*: a partir das curvas de nível, pontos cotados e rede de drenagem, elaboraram-se os MDE, utilizando a ferramenta “3D Analyst Tools - Raster Interpolation - Topo to Raster”, que realiza a interpolação a partir das isolinhas de altimetria. Foram elaborados modelos com resoluções de 2, 10 e 30 metros. Após a obtenção dos MDE realizaram-se os testes para avaliar sua precisão, inicialmente foi aplicado um filtro para suavizar eventuais “buracos” resultantes da interpolação (*Spatial Analyst Tools - Neighborhood - Filter*), e em seguida foram geradas curvas de nível (*3D Analyst Tools - Raster Surface - Contour*) para validação.

- *Carta de Declividade*: foram elaboradas a partir da ferramenta “3D Analyst Tools - Raster Surface - Slope” que utilizou como parâmetro de entrada os MDE com resoluções de 2, 10 e 30 metros. As classes de declividades foram estabelecidas em valores percentuais.

2.2.3 TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models)

- *Direção de Fluxo (Flow Direction)*: os mapas de direção de fluxo foram elaborados utilizando o algoritmo *D-Infinity*, que considera infinitas possibilidades de direção de fluxo, distribuídas proporcionalmente entre os pixels, para calcular estas direções considera-se a declividade existente entre as facetas triangulares (TARBOTON, 1997).

- *Quantificação do fluxo a partir da cabeceira da erosão (D-Infinity Upslope Dependence):* a partir desta ferramenta é possível determinar a quantidade de pixels que contribuem para um determinado ponto, de acordo com a direção de fluxo, desta forma, pode-se considerar que o fluxo quantificado representa as áreas de contribuição das feições erosivas. Para isto, inicialmente deve-se criar uma matriz regular, onde todos os pixels possuem valor igual a 0, e o pixel de “destino” valor igual a 1, considerou-se como pixel de destino o ponto com a cabeceira das erosões. A Figura 4 apresenta um esquema destes algoritmos.

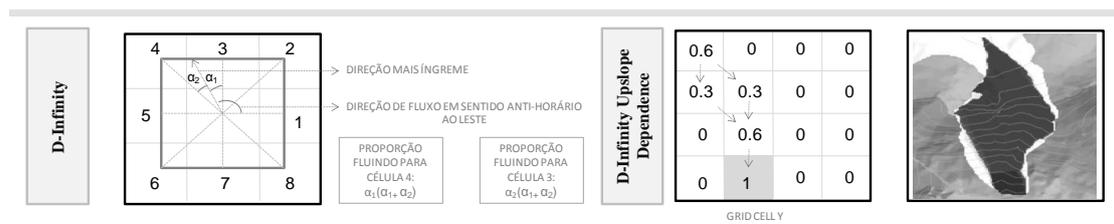


Figura 4. Representação dos algoritmos do TauDEM. Adaptado de TauDEM (2016).

2.2.4 Relação SxA

A declividade média (S) foi obtida a partir da Carta de Declividade, para o qual foi necessário realizar um recorte (*Data Management Tools - Raster - Raster Processing - Clip*), considerando a área de contribuição das feições, sendo os dados que estavam em valores percentuais, convertidos para $m.m^{-1}$. A área de contribuição para cada feição foi obtida a partir do fluxo quantificado (*D-Infinity Upslope Dependence*) onde, primeiramente, os arquivos em formato matricial foram convertidos para “*shapefile*” e as respectivas áreas calculadas a partir da “*Calculator Geometry*” em m^2 . As informações obtidas foram organizadas em planilhas, e os gráficos foram elaborados no Excel.

3. Resultados e Discussão

Neste trabalho foram obtidos os Modelos Digitais de Elevação, Cartas de Declividades, Mapas de Direção de Fluxo e Mapas de Áreas de Contribuição das Feições Erosivas, com resoluções de 2, 10 e 30 metros. As Figuras 4 e 5 apresentam os MDE e as Cartas de Declividades, para um trecho da área em estudo.

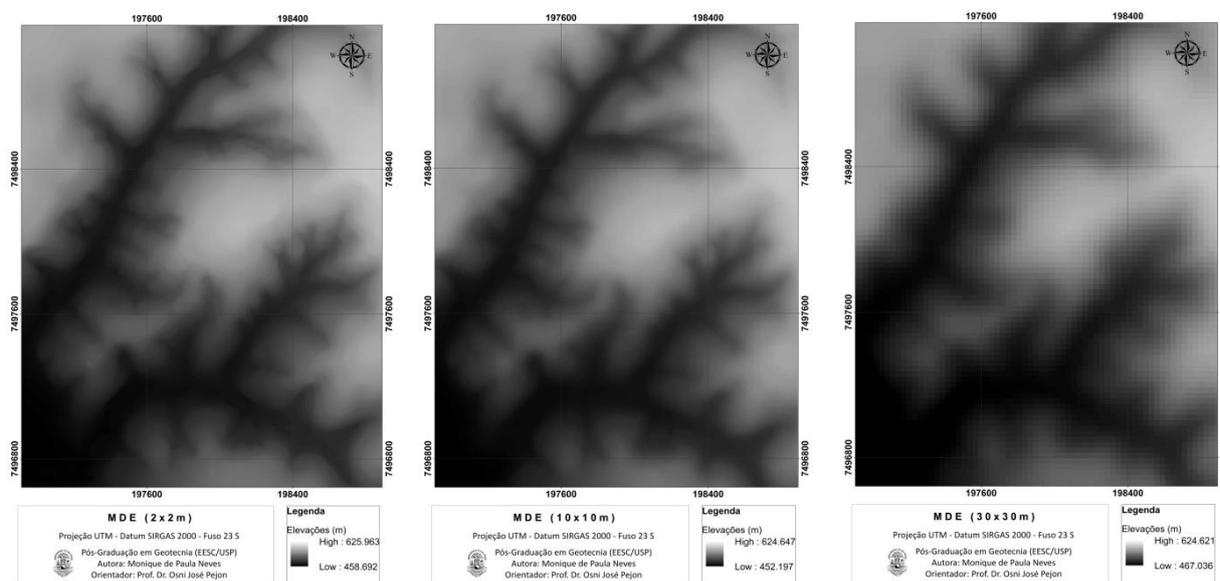


Figura 4. Modelos Digitais de Elevação (MDE) com resoluções de 2, 10 e 30 metros.

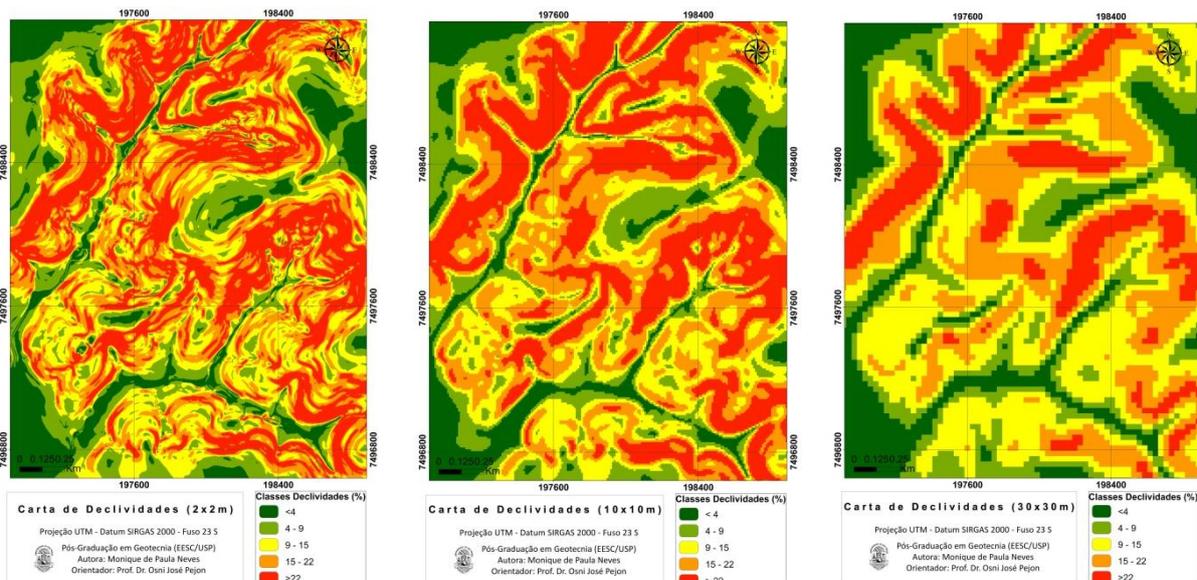


Figura 5. Cartas de Declividades com resoluções de 2, 10 e 30 metros.

Os MDE foram validados e os resultados mostraram-se satisfatórios quanto à sua precisão hidrológica, o que permitiu sua utilização para obtenção dos outros atributos morfométricos. A Figura 6 apresenta o resultado final do processamento referente ao algoritmo *D-Infinity Upslope Dependence*, que determina para cada uma das feições erosivas as áreas de contribuição.

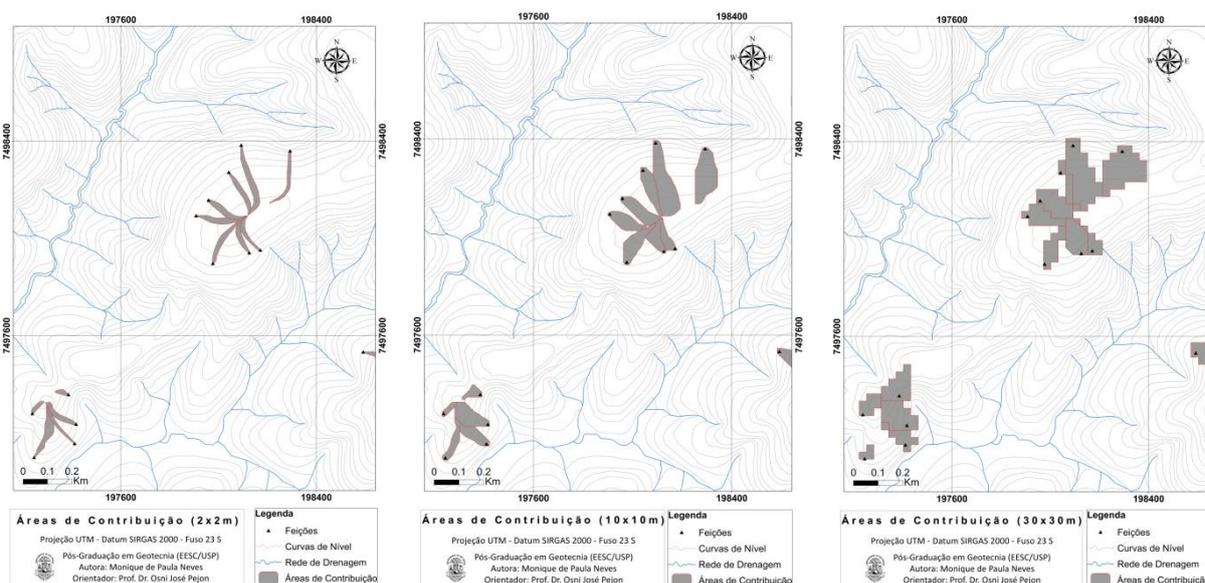


Figura 6. Feições erosivas e áreas de contribuição, elaboradas a partir de dados com resoluções de 2, 10 e 30 metros.

A fim de comparar o efeito da resolução espacial dos modelos digitais de elevação foram determinadas para cada uma das feições erosivas as áreas de contribuição e declividade média, para posteriormente determinar a relação entre estes parâmetros. Para este trabalho, foram selecionados 15 pontos de feições erosivas, sendo 10 para canais profundos, com mais de 1m de profundidade, e 5 para canais rasos, com menos de 1m de profundidade. A Figura 7 apresenta o gráfico e os pontos obtidos com a relação declividade média (*S*) versus área de contribuição (*A*).

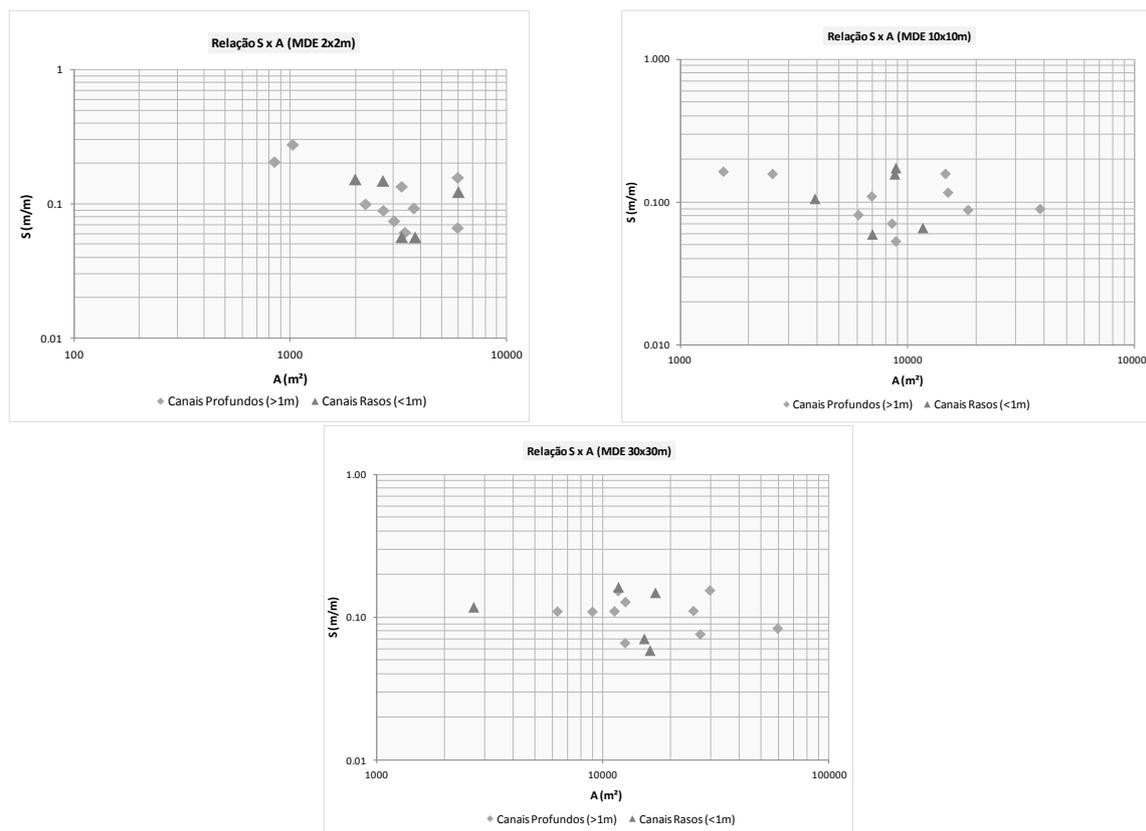


Figura 7. Relação declividade média (S) versus área de contribuição (A), para os dados obtidos com diferentes resoluções.

Observa-se que os parâmetros apresentam relação direta com o tamanho do pixel do MDE. Para os dados obtidos do MDE (2x2m) as áreas de contribuição apresentaram valores entre 848 a 6.024m², e declividade média de 5,62 a 27,48%. Os valores obtidos do MDE (10x10m) são 1.550 a 38.375m² para área de contribuição, e 5,29 a 17,28% para declividade média. E para os dados obtidos do MDE (30x30m) 2.688 a 59.423m² para área de contribuição, e 5,83 a 16,17% para declividade média.

Em relação à determinação da relação SxA, constatou-se que ao propor um limiar para desencadeamento dos processos erosivos a partir dos dados provenientes do MDE (2x2m), é necessária uma área de contribuição menor, o que tende a aumentar de acordo com o tamanho do pixel. Especificamente em relação aos dados obtidos pelo MDE (30x30m), as áreas são muito maiores, e podem não representar adequadamente as características da área. Quanto à declividade média, verifica-se que os dados apresentaram uma variação menos intensa para os valores médios, em função da distribuição espacial dos dados na Carta de Declividades, no entanto estas variações devem ser consideradas, pois a ocorrência dos processos erosivos na área em estudo apresenta forte relação com a declividade local.

Além disso, observa-se na Figura 7 que a distribuição dos pontos obtidos com o MDE (2x2m) e (10x10m) evidenciam a relação inversa entre área de contribuição e declividade média, conforme reportado na literatura, enquanto que no caso do pixel de 30m isto não fica evidente.

Desta forma, verifica-se que para a representação dos limiares de desencadeamento dos processos erosivos, torna-se fundamental a utilização de dados matriciais, mais preciso, com resoluções menores que 10 m, conforme citado por Zhang e Montgomery (1994), uma vez que a representação espacial de fenômenos deve estar em consonância com as características geomorfológicas da área.

4. Conclusões

A área em estudo é altamente susceptível a ocorrência de processos erosivos, desta forma torna-se fundamental o desenvolvimento de estudos que indiquem o limiar de desencadeamento das erosões, o que pode ser realizado a partir da análise morfométrica. A obtenção dos parâmetros área de contribuição e declividade em ambiente SIG pode ser alcançada de maneira automática, favorecendo o desenvolvimento da análise e interpretação de dados. A partir da análise da resolução espacial do modelo digital de elevação pôde-se constatar que, conforme já citado por outros autores, torna-se fundamental a utilização de dados com resolução espacial mais precisa, sendo que para a área em estudo, os dados obtidos com resolução de 2m mostraram-se mais fidedignos, o que torna a análise morfométrica mais representativa para estudo dos processos erosivos.

Agradecimentos

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de mestrado e apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

Araújo, T. P. de. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro/ SP**. 2011. 181p. Dissertação (Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos. 2011.

Gomes, D. M. **Mapeamento geológico-geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na Bacia do Córrego Ribeirão do Meio, região de São Pedro/SP, na escala 1:20.000**. 2002. 242p. Dissertação (Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo - 1:500.000**. USP/IPT: 1981.

Menéndez-Duarte, R.; Marquínez, J.; Fernández-Menéndez, S.; Santos, R. Incised channels and gully erosion in Northern Iberian Peninsula: Controls and geomorphic setting. **Catena**, v. 71, p. 267 - 278, 2007.

Montgomery, D.; Dietrich, W. Landscape dissection and drainage area-slope thresholds. In: Kirkby, M. J (Ed). **Process models and theoretical geomorphology**. Chichester: Wiley, 1994. cap.11, 221-246.

Patton, P. C.; Schumm, S. A. Gully erosion, northwestern Colorado: a threshold phenomenon. **Geology**, p. 88-90, 1975.

Pejon, O. J. **Mapeamento geotécnico regional da folha de piracicaba – SP (Escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos**. 1992. 224p. Tese (Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Carlos. 1992.

Quinn, R.; Beven, K.; Chevallier, P.; Planchon, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological processes**, v. 5, p. 59-79, 1991.

Tarboton, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997.

Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TAUDEM). Disponível em:
<<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/help.html>. Acesso em 31.out.2016.

Vandaele, K.; Poesen, J.; Govers, G.; Wesemael, B. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. **Geomorphology**, v. 16, p. 161 - 173, 1996.

Zhang, W.; Montgomery, D. Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrological simulations. **Water resources research**, v. 30, n. 4, p. 1019-1028, 1994.