

## RECONSTRUÇÃO DE TOPOGRAFIA PRÉ-EROSÃO ATRAVÉS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL EM SIG: UMA ABORDAGEM BASEADA EM VALIDAÇÃO

### RECONSTRUCTING PRE-EROSION TOPOGRAPHY USING SPATIAL INTERPOLATION TECHNIQUES: A VALIDATION-BASED GIS APPROACH

*Bergonse, Raffaello, Centro de Estudos Geográficos-IGOT, Universidade de Lisboa, Portugal,  
rafaellobergonse@gmail.com*

*Reis, Eusébio, Centro de Estudos Geográficos-IGOT, Universidade de Lisboa,  
eusebioreis@campus.ul.pt*

#### RESUMO

Apresenta-se uma abordagem inovadora para definir o método de interpolação óptimo na reconstrução da superfície topográfica que antecedeu 90 sistemas de ravinas de dimensões decamétricas a hectométricas. Compararam-se um método linear e 23 parameterizações de três métodos de *spline* quanto à capacidade para reproduzir 50 áreas-amostra não entalhadas no contexto topográfico das formas erosivas em estudo. Os resultados mostram que o melhor *spline* produziu um erro absoluto médio 38% inferior à interpolação linear, acentuando as limitações desta num claro contraste com a sua predominância na literatura. A metodologia proposta é aplicável a qualquer contexto topográfico, permitindo minimizar os erros obtidos, obter melhores estimações de volumes e taxas de erosão, e investigar o papel desempenhado por superfícies topográficas que já não existem no surgimento e desenvolvimento de formas erosivas de grandes dimensões.

#### ABSTRACT

We present an innovative approach towards defining the optimal spatial interpolation method for reconstructing the topographic surface preceding 90 gully systems of decametric to hectometric dimensions. A linear method was tested along with 23 parameterizations of three spline methods as to their capacity to reproduce 50 uneroded sample areas occurring in the same topographic context of the erosive features under study. Results show that the best spline method produced a mean absolute error 38% lower than linear interpolation, underlining the limitations of the latter in marked contrast to its predominance in the literature. The methodology proposed is applicable to any topographic context, allowing to minimize the errors obtained, to achieve better estimations of eroded volumes and erosion rates, and to investigate the role played by topographic surfaces no longer present in the initiation and development of large erosive features.

#### 1. INTRODUÇÃO

Apesar da relação entre topografia e erosão estar amplamente explorada na literatura no que concerne a ravinas incipientes (Bergonse e Reis, 2011: 105), raras vezes se procurou fazê-lo com formas de dimensões decamétricas e superiores. A dificuldade fundamental que se impõe nestes casos advém da expressão que estas formas possuem na cartografia topográfica, exigindo a aplicação de métodos de interpolação espacial com vista a reconstituir a superfície que as antecedeu, sob risco de se caracterizar a topografia da forma, e não aquela que possivelmente promoveu o seu desenvolvimento. O conhecimento adequado da superfície pré-erosão é adicionalmente uma condição para a estimativa dos volumes erodidos pelas formas no passado e (caso seja possível datar a superfície) das suas taxas de evolução.

Dentre os vários autores que procuraram interpolar superfícies pré-erosão, a maioria adoptou métodos de interpolação linear (Alexander et al., 2008; Perroy et al. 2010; Buccolini et al., 2012). De um ponto de vista teórico, os métodos lineares afiguram-se notavelmente desadequados, já que: (1) assumem uma superfície rectilínea entre quaisquer três pontos conhecidos, produzindo subestimações em áreas convexas e sobre-estimações em áreas côncavas onde não haja informação; (2) não produzem resultados acima ou abaixo do domínio dos valores de entrada. Apesar destas limitações, estes métodos não foram ainda contestados, sem dúvida pela impossibilidade de validação colocada pela ausência da superfície original.

O presente trabalho vem propor que, apesar desta limitação, é possível comparar métodos de interpolação espacial quantificando a sua capacidade para reproduzir a superfície conhecida em locais não entalhados no mesmo contexto topográfico das formas erosivas em estudo. Esta abordagem tem como único pressuposto que o erro obtido é equivalente ao que seria obtido para a superfície original se esta estivesse ainda *in situ*, i.e. que ambas não diferem significativamente. Foram estabelecidos três objectivos: (1) aplicar uma metodologia para definir o método de interpolação espacial óptimo para um dado contexto topográfico; (2) avaliar criticamente os resultados da interpolação linear, o método mais frequente na literatura; (3) reconstruir a superfície original para um conjunto de 90 sistemas de ravinas de dimensões decamétricas a hectométricas, evoluindo presentemente em duas bacias de estudo.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

As bacias das ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho (138,4 e 12,9 km<sup>2</sup> respectivamente) drenam a margem esquerda do baixo Tejo, tendo as desembocaduras poucos quilómetros a sul e a norte da Chamusca. Do ponto de vista litológico, são compostas por formações clásticas terciárias (areias e argilas com frequentes intercalações cascalhentas) a que se sobrepõem mantos de conglomerados. As vertentes são relativamente declivosas (11° em média na Rib<sup>a</sup> de Ulme), sendo afectadas por numerosas ravinas e complexos de ravinas parcialmente activos, estes últimos possuindo por vezes mais de 20 m de profundidade e estendendo-se por vários hectares.

## 3. METODOLOGIA E RESULTADOS

A interpretação de ortofotografias aéreas (IGP/DGRF, 2004, resolução 0,5m) permitiu delimitar um conjunto de 90 complexos de ravinas, dos quais 75,6% foram validados no campo por observação directa. A metodologia adoptada é esquematizada na Fig.1. Foi utilizado o ArcGIS 9.1. em todos os processos descritos.

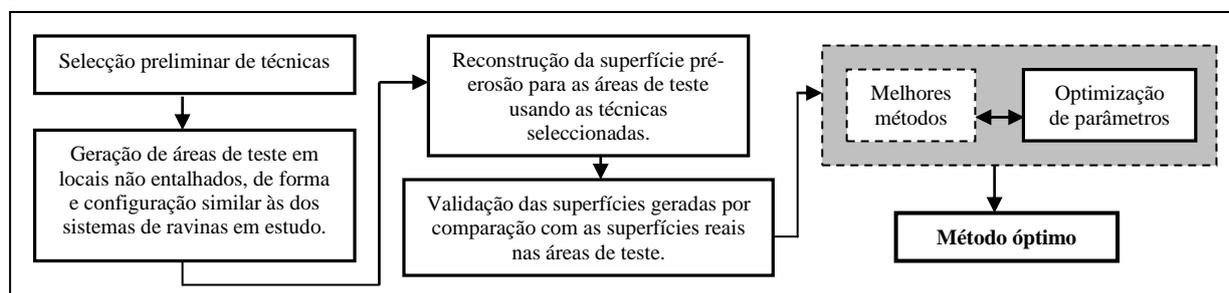


Fig. 1 - Sequência de procedimentos adoptada com vista à definição do método óptimo de interpolação para a área de estudo.

A primeira fase consistiu numa análise comparativa dos diferentes métodos de interpolação espacial existentes (Hengl e Evans, 2009) face ao fim em vista. Esta fase é fundamental na medida em que não existe um método óptimo para todas as situações, todos apresentando vantagens e desvantagens (Weibel e Heller, 1991). Foram assim eliminados os métodos inexactos (em que os valores originais não são mantidos, e.g. interpolação polinomial), e depois os métodos incapazes de gerar curvaturas em

áreas sem dados (*Inverse Distance Weighted* e *Natural Neighbor*) e a Krigagem, pouco adequada à modelação topográfica devido à tendência para produzir valores muito afastados do domínio dos valores originais (i.e. elevada suavização da superfície resultante, ou *smoothing*) (Hengl e Evans, 2009). Finalmente, optou-se por utilizar métodos de *spline*, um tipo de interpolação polinomial no qual o afastamento dos resultados face ao domínio de variação dos *inputs* pode ser controlado, e que assenta em duas condições fundamentais: (1) a superfície resultante passa por todos os pontos de *input*; (2) a sua curvatura é minimizada. Foram testados três tipos de *spline* disponíveis no ArcGIS 9.1 (ESRI): *spline* regularizado, *spline* com tensão e o algoritmo *Topo to Raster* (uma adaptação do método ANUDEM desenvolvido por Hutchinson, 1989). De acordo com os objectivos estabelecidos para o trabalho, foi também usada a interpolação linear, através da construção de um TIN (*Triangulated Irregular Network*), e posterior conversão para *raster*.

Em ordem a definir 50 áreas-amostra não entalhadas para interpolação, foram gerados aleatoriamente 50 pontos, parte dos quais foi depois movida manualmente para não ocupar fundos de vale planos nem as cabeceiras das bacias, onde não ocorrem formas. A estes pontos foram sobrepostas alternadamente cópias dos polígonos correspondentes às formas com áreas acima de, respectivamente, 33% e 66% da distribuição, depois reorientadas ao longo do sentido de maior declive da vertente. Pretendeu-se assim conferir às áreas experimentais a interpolar configuração e dimensões próximas das dos complexos de ravinas em estudo, por oposição a uma configuração artificial (e.g. círculos).

A topografia real foi representada utilizando curvas de nível 1:10000, convertidas em pontos para servirem de *input* na interpolação. Os 2344 pontos correspondentes às 50 áreas amostrais foram convertidos num novo tema para validação, sendo depois realizado um primeiro conjunto de 13 interpolações (resultados com uma célula de 2 m). Os algoritmos *spline* com tensão e regularizado foram ambos corridos com cinco valores distintos para o parâmetro  $w$  (que define respectivamente o peso da primeira e da terceira derivadas das superfícies resultantes no processo de minimização da curvatura num e noutro método) definidos de acordo com os valores de referência na documentação do *software*. Foram assim adoptados  $w$  de 0/1/4/7 e 10 para o *spline* com tensão e 0,5/ 0,1/ 0,01/0,001 e 0 para o *spline* regularizado. O algoritmo *Topo to Raster* foi corrido com a parameterização estabelecida por defeito, usando separadamente pontos e curvas de nível. Procurou-se assim explorar a sua capacidade distintiva de usar curvas de nível como *input*, em contraste com os restantes métodos, concebidos para dados pontuais).

De forma a comparar os vários métodos, os pontos de validação foram sobrepostos às superfícies interpoladas, e os valores correspondentes nestas últimas extraídos para uma tabela. As diferenças entre estes e os valores reais permitiram calcular o erro absoluto médio (EAM), ou

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sqrt{(rl_i - int_i)^2} \right] / n \quad [1]$$

em que  $rl$  é cada valor real, e  $int$  cada valor interpolado. A análise dos valores mostrou que, do conjunto testado, o método óptimo foi o *Topo to Raster* usando curvas de nível (EAM=0,752 m), seguido do *Spline* regularizado com  $w = 0,01$  (0,767 m). Por oposição, a interpolação linear produziu um EAM de 1,214 m.

Após a análise dos resultados, seleccionaram-se os dois métodos/parameterizações com menor erro e procurou-se otimizar os seus parâmetros numa segunda fase de interpolações. Seis valores adicionais de  $w$  foram definidos para o *Spline* Regularizado, equidistantes do primeiro e do segundo valores com menor EAM na primeira interpolação (0,01 e 0,1). No caso do *Topo to Raster*, o parâmetro *Roughness penalty* (que exprime o integral da segunda derivada da superfície resultante, usada como medida de rugosidade e minimizado durante a interpolação) foi experimentado com cinco valores entre os extremos referidos na documentação: 0,1/ 0,2/ 0,3/ 0,4 e 0,5. A análise dos resultados revelou um EAM mínimo de 0,758 m para o *Spline* Regularizado com  $w=0,033$ , mostrando que não foi possível reduzir o valor mínimo obtido na primeira interpolação, apenas inferior por 0,006 m. O método de interpolação mais adequado para o contexto topográfico da área de estudo foi assim definido como sendo o *Topo to Raster*, usando curvas de nível como *input* e a parameterização estabelecida por

defeito. De forma a melhor ilustrar a superfície resultante, foram geradas automaticamente curvas de nível equidistantes de 5 m, contrastadas com a topografia original (Fig.2).

Numa perspectiva geral, os 24 resultados obtidos mostraram uma grande variabilidade entre o EAM mínimo (0,752 m) e o máximo (3,463 m), sendo de notar a ocorrência de contrastes importantes entre parameterizações diferentes para o mesmo método (e.g. 0,887 m obtido com o *spline* de tensão com  $w=1$ , face aos 3,463 m obtidos com  $w=0$ ).

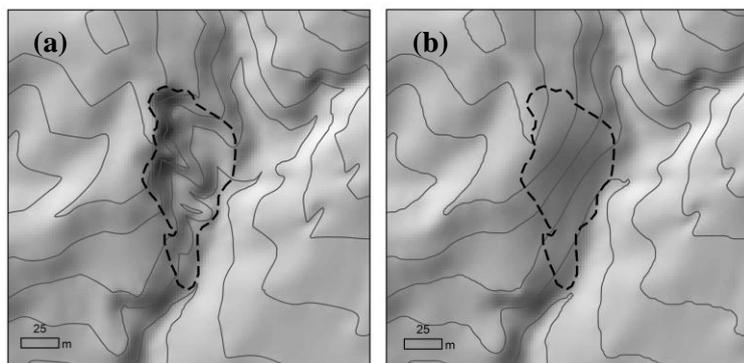


Fig. 2 - Um exemplo da reconstrução da superfície pré-erosão usando o método óptimo para uma das formas em estudo (limites a tracejado). (a) curvas de nível originais; (b) topografia reconstruída com o algoritmo *Topo to Raster*, usando curvas de nível como *input* e *roughness penalty* = 0.

#### 4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Face à topografia da área de estudo, a metodologia adoptada permitiu definir o algoritmo *Topo to Raster* como o mais adequado, separado do *spline* regularizado com  $w=0,033$  por uma diferença no EAM de apenas 0,006 m. Em contraste com os resultados dos *splines*, a interpolação linear produziu o 3.º maior erro de todos (61,4% superior ao mínimo obtido), o que demonstra claramente as limitações deste método. Dada a frequência com que a curvatura ocorre na topografia real, são de esperar limitações semelhantes na maioria dos contextos.

A variabilidade nos erros obtidos reforça a importância da selecção prévia de métodos de interpolação e da comparação de parameterizações com vista a otimizar a interpolação para cada contexto em estudo, já que pequenas mudanças podem resultar em diferenças grandes no erro. A abordagem baseada na validação com áreas amostrais não entalhadas permite comparar métodos, evitando a geração de erros importantes e a sua propagação para jusante na investigação (e.g. cálculo de volumes e taxas ou caracterização morfométrica da topografia obtida). Finalmente, é importante levar em conta que apesar da metodologia, tal como se apresenta genericamente na figura 1, poder ser aplicada a qualquer área de estudo, o *software* utilizado é arbitrário. De igual forma, o número de vezes que a fase de optimização é levada a cabo (i.e. seleccionando os parâmetros com melhores resultados e testando sucessivamente valores próximos a fim de melhorar o resultado) depende dos objectivos e da disponibilidade de tempo e meios de cada autor.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi tornado possível por uma bolsa de doutoramento atribuída ao primeiro autor pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, ref. SFRH/BD/46949/2008.

#### REFERÊNCIAS

Alexander, R.W.; Calvo-Cases, A.; Arnau-Rosalén, E.; Mather, A.E.; Lázaro-Suau, R. (2008) – "Erosion and stabilization sequences in relation to base level changes in the El Cautivo badlands, SE Spain". *Geomorphology* 100: 83-90.

- Bergonse, R.; Reis, E. (2011) - "Formas, processos e padrões na erosão por ravinamento: para um enquadramento teórico coerente". *Finisterra - Revista Portuguesa da Geografia*, Vol. XLVI/92: 99-120
- Buccolini, M.; Coco, L.; Cappadonia, C.; Rotigliano, E. (2012) - "Relationships between a new slope morphometric index and calanchi erosion in northern Sicily, Italy". *Geomorphology* 149-150: 41-48
- Hengl, T.; Evans, I.S. (2009) - "Mathematical and digital models of the land surface". In Hengl, T.; Reuter, H. I. (Eds) - *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier. Pp. 31-63
- Hutchinson, M.F. (1989) - "A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits". *Journal of Hydrology* 106: 211-232.
- Perroy R.L.; Bookhagen, B.; Asner, G.P.; Chadwick, O.A. (2010) – "Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground based LiDAR on Santa Cruz Island, California". *Geomorphology* 118: 288-300.
- Weibel, R.; Heller, M. (1991) - "Digital Terrain Modelling". In Maguire, D.J.; Goodchild, M.F.; Rhind, D.W. (Eds.) - *Geographical Information Systems: Principles and Applications*: 269-297.