

## **Erosão Hídrica Estrutural – EHE**

### Descrição de processos de modelação geográfica

Nuno de Sousa Neves; Alfredo Gonçalves Ferreira; Ana Cristina Gonçalves; Alexandre Cancela d'Abreu; Isabel A. Ramos; Marco Freire; Nuno Guiomar

Universidade de Évora, Março 2011

Sendo o fenómeno de erosão hídrica do solo resultante de variados factores em contextos de complexidade, decorrente da sua natureza inter-relacionada, considera-se pertinente uma aproximação visando a definição de uma metodologia simples e eficaz, facilmente aplicável ao ordenamento do território.

Podendo a força gravítica, ou melhor dizendo, o trabalho da força gravítica ser considerado o factor primordial em processos de erosão decorrentes do escoamento superficial, a metodologia desenvolvida integrou primeiramente esta dimensão.

Considera-se o estudo dos processos erosivos numa perspectiva global ou de contexto, integrando nos procedimentos metodológicos não a erosão específica local decorrente da inclinação do terreno em cada local ou célula, mas a erosão potencial global cumulativa, em que a erosão em cada célula é influenciada por um conjunto de células e influencia outro conjunto de células.

Outros modelos de previsão de perda de solo recorrem a este princípio, como o WEPP, *Water Erosion Prediction Project* (Flanagan, D. C., ed, 1994), e têm demonstrado bastante aderência à realidade, de acordo com os trabalhos desenvolvidos com base nos dados da Estação Experimental de Erosão de Vale Formoso (Tomás, 1997), sendo limitados pela quantidade de informação de base necessária à sua utilização. Em 2001 foi adaptado ao modelo WEPP a metodologia MIR (*Minimum Information Requirement*) que se baseia fundamentalmente em informação topográfica, de solo e de ocupação do solo associada a um simulador, usando um conjunto mínimo de informação para estimar a perda de solo (Brazier, 2001).

A abordagem agora desenvolvida distingue-se de abordagens mais usualmente aplicadas no nosso país, que assentam na integração de classes de declive com classes de avaliação de erodibilidade do solo definidas pericialmente e de acordo com valores de referência provenientes de diversos autores.

Tendo em conta estas considerações desenvolveu-se um modelo de cálculo do índice topográfico de Erosão Hídrica Estrutural (EHE) que constitui uma métrica da acção do relevo no processo de erosão hídrica integrando diversas variáveis topográficas segundo os princípios da mecânica clássica, adaptados às características do ambiente (*software*) de modelação.

### **Modelo digital de elevações**

A construção de um modelo digital de elevações (MDE) deverá considerar a representação do terreno da forma mais fidedigna possível considerando a frequência das observações altimétricas disponíveis e o objectivo de modelação a que se destina.

Num contexto de análise de processos em que o escoamento constitui um factor primordial é fundamental que o modelo digital de elevações represente o mais correctamente possível o sistema de drenagem e os processos hidrológicos em que a erosão hídrica se insere.

O procedimento de interpolação e geração do modelo digital de elevações escolhido teve em linha de conta a mais adequada adaptação ao processo de modelação que se pretendia desenvolver, bem como aos dados altimétricos disponíveis.

O método escolhido utiliza uma aproximação baseada numa técnica interpolativa iterativa (*iterative finite difference interpolation technique*) (Wahba, 1990) que permite a estimativa de valores numa perspectiva contextual decorrente de um processo multiresolução adaptativo. A partir de bases informativas com frequências de observação altimétrica relativamente baixas é possível estimar de forma mais adequada o comportamento “funcional” do relevo em processos de escoamento.

Sendo definido como parâmetro do modelo a opção “drainage enforcement”, a aproximação interpolativa identifica e remove as depressões do terreno susceptíveis de afectar a modelação do processo de escoamento, criando o que normalmente se designa por um modelo digital de elevações “hidrologicamente correcto”. A drenagem forçada é aplicada iterativamente em resoluções matriciais incrementalmente maiores no processo de criação do MDE.

O processo de interpolação “topo to raster” com drenagem forçada pode considerar a integração de diversas fontes de observação altimétrica (e.g. isolinhas, pontos cotados), bem como outro tipo de entidades destinadas a especificar as condições de interpolação e os resultados finais, tais como “Stream”, “sinks”, Boundary” e “Lake”.

Num contexto de aplicação em que é fundamental a concordância entre diferentes fontes de informação, poderá ser utilizada uma base informativa da rede hidrográfica, devidamente orientada e estruturada tabularmente, de forma a condicionar a definição do MDE às linhas de água, assumidas como correctamente definidas espacialmente.

O método escolhido (“topo to raster”) (ArcGIS) integrado no “script” do modelo EHE utiliza os seguintes parâmetros:

Cellsize – 10  
Grid margin – 20  
Drainage option – ENFORCE  
Data option – CONTOUR, POINTELEVATION, STREAM  
Maximum number of iterations (optional) – 40  
Discretization error factor (optional) – 1  
Vertical standard error (optional) – 0

A resolução matricial final do MDE que será processado no cálculo do índice EHE apenas influi no detalhe da definição espacial dos resultados. Assim, poderão ser utilizadas outras resoluções matriciais desde que adequadas à frequência e correcção das observações altimétricas vectoriais a utilizar na sua criação através do método descrito.

No entanto, a validade de um MDE, para o cálculo do índice EHE, não deve ser colocada considerando apenas a sua resolução matricial, mas sobretudo o seu processo de geração e a

adequabilidade da informação altimétrica de base. A utilização de um MDE gerado através de outros processos (e.g. "TIN") e posteriormente convertido para o formato matricial, poderá afectar a validade dos resultados sobretudo em áreas classificadas como planas por ausência ou inadequada frequência de observações altimétricas.

### Escoamento difuso e concentrado

As limitações decorrentes da utilização isolada do modelo de escoamento baseado no algoritmo D8 proposto por Jenson e Domingue (1988) centram-se na exagerada simplificação resultante da escolha de uma direcção preferencial de escoamento considerando as 8 células da vizinhança rectangular 3x3 de cada célula (D8).

Vários autores como Quinn (1988) ou Holger Schäuble (2001) tentaram resolver esta limitação propondo modelos alternativos que consideram a variação do escoamento segundo uma medida de proporcionalidade directa ou ponderada do declive das diferentes alternativas de escoamento (células).

No modelo EHE foi desenvolvida uma aproximação centrada na combinação de duas medidas da intensidade de escoamento decorrente da acumulação de valores de declive segundo duas possibilidades ou modelos alternativos:

- Acumulação concentrada máxima – Resultante da aplicação de uma função de acumulação de escoamento segundo o modelo clássico D8 dos valores do declive;
- Acumulação difusa máxima – Resultante da aplicação de uma função de comprimento de encosta (*downstream*) sobre um MDE invertido. A função de comprimento de encosta calcula o máximo comprimento de encosta drenante, que, no caso de um relevo invertido com a opção "downstream" corresponde à máxima acumulação possível segundo um modelo divergente de escoamento. Foi igualmente calculada concomitantemente a contribuição cumulativa dos valores de declive segundo esta aproximação.

A utilização combinada das duas aproximações permite uma caracterização do processo de escoamento que se considera reflectir de forma mais adequada o potencial máximo de escoamento.

A utilização combinada das duas aproximações de escoamento foi utilizada no cálculo de um conjunto de parâmetros da fórmula geral, descrevendo-se de seguida alguns aspectos desses processos de cálculo.

1 - (**hp**) - Soma ponderada dos valores de altitude drenante para cada ponto, exprimindo a contribuição cumulativa dos valores de altitude relativa de todas as células drenantes para cada local. O cálculo de **hp** é efectuado através de operações de álgebra de mapas que permitem a obtenção de um valor de altitude drenante a partir da expressão:

$$hp = \left( \frac{hdt}{ntc} - hl \right) \cdot 2$$
, em que *hdt* é a acumulação total dos valores de altitude, *ntc* o número total de células drenantes para cada célula e *hl* o valor de altitude local

A parcela  $(\frac{hdt}{ntc} - hl)$  representa o ponto médio do valor de altitude de um vector escoamento integrado. Assim o valor final ou **hp** resulta da sua multiplicação por 2.

2 – Soma ponderada dos ângulos de inclinação (**ap**), exprimindo em cada local a contribuição cumulativa dos declives de todas as células drenantes para cada local. O cálculo de **ap** é efectuado através de operações de álgebra de mapas e de uma função combinada de escoamento difuso e concentrado.

3 – Declive Força (**DF**). O trabalho da força gravítica num plano inclinado pode ser descrito pelas expressões  $Wfg = mgh$  ou  $Wfg = mg\Delta r \cdot \sin \alpha$  (sendo  $\alpha$  o ângulo com o plano horizontal).

Num contexto de erosão hídrica do solo, sendo **g** constante e **m** e  $\Delta r$  (comprimento da encosta) passíveis de representação proporcional através de uma relação entre **hp** e **ap**, a expressão

$DF = \tan^{-1} \frac{hp}{(\sin(90^\circ - ap)) \cdot 100}$ , constitui uma métrica adimensional proporcional ao trabalho da força gravítica.

Os valores da métrica criada, condicionados ao intervalo (0° - 90°) pela função  $\tan^{-1}$  permitem a obtenção de valores similares aos valores resultantes do cálculo normal do declive em graus.

4 – Erosão hídrica estrutural (**EHE**). Sendo o Declive Força uma métrica independente do atrito e sendo a erosão resultante da dissipação de energia provocada pela interacção da força gravítica, da força de atrito, do impacto hidráulico (decorrente da variação de declive e orientação de encosta) e da erodibilidade do solo, foi concebida uma formulação integradora expressa pela métrica **EHE** – Erosão hídrica estrutural.

A métrica **EHE** associa ao **DF** dois parâmetros multiplicativos resultantes de operações focais ou de vizinhança. A integração dos parâmetros que de seguida se apresentam é efectuada por processos simples de álgebra de mapas.

**TC** – Indicador de potencial de profundidade de solo resultante da avaliação da curvatura do terreno associada a uma métrica de estabilidade desenvolvida a partir do método TREM – “Terrain Ruggedness Evaluation Method”, (Neves *et al.*, 2010).

Este indicador estabelece uma relação entre a concavidade e a estabilidade em termos de favorecimento ao movimento ou deslocação de materiais (inerente à inclinação do terreno), permitindo a introdução de uma componente de estimação da erodibilidade associada ao potencial de profundidade do solo. A estabilidade do terreno, no contexto do indicador **TC**, é expressa sob a forma de uma função do co-seno do declive no local.

A curvatura do terreno assenta numa medida de concavidade cujos valores variam entre 0 (convexo) e 1 (côncavo), sendo o terreno plano representado pelo valor 0,5. Foi desenvolvida uma nova métrica baseada na avaliação focal de vizinhanças de secções circulares (“wedge”), das orientações de encosta associadas ao declive.

Considerando uma vizinhança de secção circular e tendo como referência um terreno perfeitamente côncavo, todas as orientações das células vizinhas deverão confluir para o centro ou célula central em processamento.

A avaliação da confluência da orientação das células vizinhas, medida através do cálculo da

média de uma componente escalar, neste caso uma função transformada de seno e cosseno permite aferir a conformidade com o modelo de referência côncavo, traduzida em valores positivos.

As funções transformadas de seno (tsin) e cosseno (tcos) são:

$$tsin\alpha = \frac{sin\alpha}{|sin\alpha| + |cos\alpha|}$$

$$tcos\alpha = \frac{cos\alpha}{|sin\alpha| + |cos\alpha|}$$

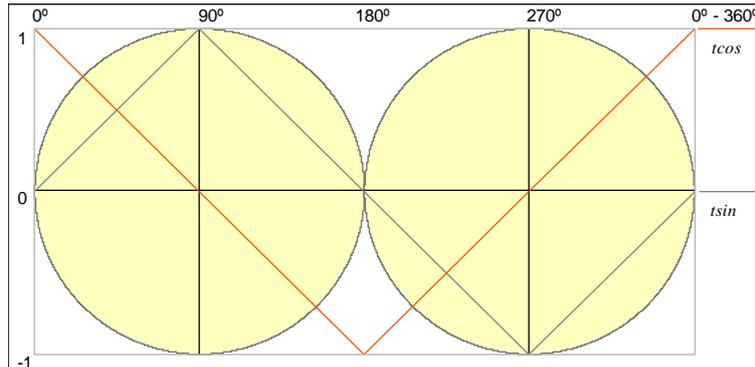


Figura 1 – Gráficos das funções transformadas tsin e tcos (Fonte própria)

A utilização de uma função transformada de seno e cosseno permite que se verifique uma igualdade  $|tsin| + |tcos| = 1$  mantendo o sinal das funções seno e cosseno e possibilitando a avaliação da confluência das orientações.

A avaliação da confluência das orientações é combinada com os valores de declive permitindo integrar numa única métrica as componentes do plano de curvatura e do perfil de curvatura.

Os valores do cálculo inicial podem variar entre -45 (máxima convexidade) e 45 (máxima concavidade), sendo posteriormente normalizados para permitir a sua variação entre 0 e 1 e a sua integração como factor multiplicativo na fórmula geral.

O desenvolvimento desta métrica parcelar, neste contexto de modelação, permitiu uma padronização dos resultados e os testes efectuados demonstraram uma melhor aderência e fiabilidade comparativamente com as medidas de curvatura mais usualmente utilizadas.

**Rp** – Indicador de atrito resultante da reacção ao peso, expresso como  $\cos \alpha$ . O estabelecimento do indicador de atrito decorre da aplicação directa das leis do movimento, considerando a deslocação de materiais líquidos num processo de escoamento superficial.

A métrica EHE assume a seguinte formulação:

$$EHE = \tan^{-1} \frac{hp}{|\sin \alpha - \alpha_p| \cdot 100} \cdot TC \cdot Rp$$

Esta aproximação integra assim, para toda a área de drenagem, os factores comprimento de encosta, declive e práticas de conservação da Equação Universal de Perda de Solo, a partir dos factores **αp**, **hp**, e **Rp** e, indirectamente, a erodibilidade do solo através do indicador de potencial de profundidade de solo, **TC**.

Esta metodologia tem a vantagem de aproximar a definição de um potencial de erosão decorrente do comportamento de toda a bacia drenante para cada célula expressando claramente as áreas/células produtoras de sedimentos numa expressão proporcional ao trabalho da força gravítica.

A fórmula desenvolvida permite o cálculo de uma métrica expressa em valores que variam entre 0 e 90° independentemente do comprimento de encosta, embora este esteja integrado no cálculo e na relação entre a altura ponderada ( $h_p$ ) e o declive ponderado ( $\alpha_p$ ).

O valor absoluto do comprimento de encosta poderá ainda ser inserido na aplicação da fórmula do índice adimensional EHE como um aproximador efectivo da massa drenante, podendo ser associado a uma ou mais variáveis de transporte (ex. precipitação).

### **Referências:**

Brazier R.E.; Rowan, J.S.; Anthony, S.G.; Quinn P.F. 2001. "MIRSED" towards an MIR approach to modelling hillslope soil erosion at the national scale. *Catena*, 42. 59-79 pp.

Flanagan, D. C., ed. 1994. Water Erosion Prediction Project, Erosion Prediction Model. NSERL, report nº9, USDA-ARS, National Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, USA.

Hutchinson, M. F. 1996. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In *Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, NM, January 21-26, 1996. Santa Barbara, CA:

Jenson S. K., Domingue, J. O. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593–1600.

Neves, N.; Freire, M.; Guiomar, N.; Duarte, L. 2010. Avaliação do Acidentado do Terreno: Desenvolvimento de uma nova métrica focal. In *Proceedings from the Conference, MyESIG 2010*. Oeiras 10-12 February 2010.

Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. & Planchon, O. 1991. 'The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models', *Hydrological Processes*, vol. 5, pp. 59-79.

Schäuble, H., Marinoni, O. & Hinderer, M. 2008. 'A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time', *Computers & Geosciences*, vol. 34, pp. 635-646.

Schäuble, H., Marinoni, O., Hinderer, M. 2008. A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time, *Computers & Geosciences*, vol. 34, pp. 635-646.

Tomás, P.M.P.P. 1997. Modelos de Previsão da Erosão Hídrica em Solos Agrícolas. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Wahba, G. 1990. Spline models for Observational data. Paper presented at CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics. Philadelphia: Soc. Ind. Appl. Maths.