

CONTRIBUIÇÕES DA MORFOLOGIA MATEMÁTICA PARA A GEOMORFOLOGIA TEÓRICA E QUANTITATIVA¹

Jérôme FOURNIER²

Resumo

A morfometria e a orometria foram criadas pelos geomorfólogos para quantificar as formas de relevo. A orometria tem como objeto de estudo dar uma expressão numérica ao relevo em seus aspectos globais. Essa disciplina se desenvolveu recentemente graças as aplicações da morfologia matemática na geomorfologia. Para os geomorfólogos, a morfologia matemática apresenta grande interesse ao recensar relevos segundo uma dada forma, e os classificando em função de sua densidade, sua superfície ou seu desnivelamento. Para isso, submetemos os Modelos Numéricos de Terreno (MNT) a uma série de transformações matemáticas que criam relevos artificiais. Graças aos métodos aqui apresentados, é possível o reconhecimento automático de formas do relevo. Mais que resultados clássicos de orometria numérica, a morfologia matemática permite projetar cenários de evolução de formas e alimentar a reflexão visando a criação de modelos matemáticos. A morfologia matemática torna-se um instrumento precioso para os trabalhos de geomorfologia dinâmica. A primeira parte do artigo evoca os princípios de base da morfologia matemática. A segunda parte mostra as possibilidades de aplicações na geomorfologia e, finalmente, a terceira parte mostra exemplos de interpretação geomorfológica em alguns resultados significativos.

Palavras-chave: Geomorfologia, Morfologia matemática, Morfometria, Orometria, Modelo Numérico de Terreno.

Abstract

Contributions of *Mathematical Morphology* to Theoretical and Quantitative Geomorphology

Geomorphologists to quantify the forms of the relief created morphometry and orometry. The aim of orometry is to give a numerical expression of the relief in its total aspects. This discipline is developed recently thanks to the applications of mathematical morphology to geomorphology. For geomorphologists, mathematical morphology presents the major interest to count relief of a given form, by classifying them according to their density, their surface or their variation in level. For that, one subjects to Digital Elevation Models (DEM) a series of mathematical transformations that create artificial relief. The development of recognition automatic method of the forms is possible thanks to the methods presented. More than of the traditional results of numerical orometry, mathematical morphology allows to look some evolutions scénarii of the forms and to nourish the reflexion for creation of mathematical models. Mathematical morphology becomes thus an invaluable tool for dynamic geomorphology work. The first part of the paper evokes the bases of mathematical morphology. The second shows the applications possibilities with geomorphology and the third part gives geomorphological interpretation examples for some significant results.

Key words: Geomorphology, Mathematical morphology, Morphometry, Orometry, Digital Elevation Models.

¹ Título original: Apports de la Morphologie Mathématique a la Geomorphologie Theorique et Quantitative. Tradução de Andrea de Castro Panizza

² Pesquisador titular no CNRS (*Centre National de la Recherche Scientifique*) - Conferencista na *Ecole Pratique des Hautes Etudes* e *Muséum National d'Histoire Naturelle* - Professor na *Université de Rennes 1* e *Rennes 2* - Doutor em Geografia física (2000) na *Université de Rennes 2*, França - Pós-Doutor em Geografia física (2001) na *Ecole Pratique des Hautes Etudes* de Paris, França. e-mail: jeromefournier@wanadoo.fr

INTRODUÇÃO

Desde há muito tempo, os geomorfólogos desejaram quantificar numericamente as formas de relevo (BAULIG, 1959). A morfometria propõe exprimir o relevo a partir da *"la mesure de ses caractéristiques et donne à la description une précision qui facilite les comparaisons, d'où peuvent découler des éléments d'explication"* (COQUE, 1993). Entretanto, devemos distinguir a simples mensuração de formas elementares da orometria.

A morfometria é interessante pois ela permite quantificar os dados elementares do relevo. Concerne evidentemente extensões modestas cuja estrutura geológica, a vegetação, os processos e o grau de evolução geomorfológica são relativamente homogêneos. Os principais elementos fundamentais do relevo que foram estudados por esse viés são as vertentes, as redes hidrográficas (PEGUY, 1942, 1958) e algumas formas litorâneas (AUPHAN, 1972).

A orometria tem como objeto de estudo dar uma expressão numérica do relevo em seus aspectos globais e foi descrita em numerosos livros durante o período quantitativista da geografia física (CHORLEY, 1972; COLE & KING, 1970; DOORNKAMP & CUCHLAINE, 1971) e recentemente em obras de geomorfologia teórica, fundamental e quantitativa (HUGGET, 1985; NAUDIN, 1983; SCHEIDEGGER, 1991; SUNAMURA, 1992). Essa disciplina conheceu um desenvolvimento considerável, ligado, em parte à evolução tecnológica da capacidade de cálculo (KIRKBY *et al.*, 1987; MERCIER, 1992) e a uma disciplina das matemáticas: a morfologia matemática. Esta é utilizada de maneira privilegiada pelos cientistas que tratam de imagens (COSTER & CHERMANT, 1989), em particular as imagens de satélite (FLOUZAT, 1988; FLOUZAT & MERCHOUB, 1983). A morfologia matemática foi desenvolvida teoricamente por Serra e apresentada em diferentes publicações (SERRA, 1982 ; CHASSERY & MONTANVERT, 1991).

Para os geomorfólogos, a morfologia matemática apresenta o grande interesse de recensear os relevos de uma dada forma, e os classificar em função de sua densidade, sua superfície ou seu desnivelamento. Para isso, submetemos os Modelos Numéricos de Terreno (MNT) a uma série de transformações matemáticas que criam relevos artificiais ; depois comparamos estes relevos (que são puras criações matemáticas) ao relevo pseudo-real (o MNT). A diferença entre os dois é constituída pelas formas de relevos pseudo-reais, classificadas em função de sua superfície. É útil lembrar que um MNT se define como um arquivo de altitudes conhecidas nas interseções de uma matriz (MASSON d'AUTUME, 1979; WENDLINGER, 1985; YOELI, 1986) e que sua estrutura é idêntica àquela de uma imagem numérica (VIDAL & GUND, 1991).

Este artigo se estrutura em três partes. A primeira evoca os princípios básicos da morfologia matemática. A segunda mostra algumas aplicações possíveis na geomorfologia e a terceira parte fornece exemplos de interpretação geomorfológica.

FUNDAMENTOS DA MORFOLOGIA MATEMÁTICA

A idéia de base da morfologia matemática é considerar uma imagem como um conjunto de formas que podemos analisar e comparar a um outro objeto geométrico conhecido, chamado de elemento estruturante. A morfologia matemática pode estudar uma imagem de duas maneiras.

Binária. A imagem é constituída de um conjunto de objetos (conjunto de pixels tendo valor 1 a 255, por exemplo) sobre um fundo (conjunto de pixels tendo valor 0, por exemplo) ; as transformações se aplicam, então, ao conjunto x de objetos ou ao fundo x^c , complementar de x .

Níveis de cinza. A imagem é considerada como uma função bi-dimensional em tonalidades de cinza $I(x,y)$; as transformações operam no sub-grafo de $I(x,y)$ que é um conjunto limitado pelo o grafo de I , espaço situado embaixo da superfície representada por:

$$Z = I(x,y)$$

A maior parte das transformações de base foram definidas em morfologia binária depois estendidas às funções bi-dimensionais em níveis de cinza. As duas abordagens são, entretanto, distintas e o usuário deverá adaptar sua estratégia de análise : *morfologia binária* quando se trabalha sobre uma imagem binária ou classificada ; ou *morfologia em níveis de cinza* quando trata-se uma imagem em níveis de cinza (bruta ou não classificada).

A morfologia matemática utiliza operações conjuntistas para transformar uma imagem. Essas transformações são definidas como aplicações do conjunto de partes de \hat{A}^2 , escrita $P(\hat{A}^2)$, em si mesmo. Essas podem ser classificadas em duas categorias.

Transformações conjuntistas clássicas: x e y sendo dois conjuntos de $P(\hat{A}^2)^3$

$$\begin{aligned} x \cup y & \text{ união} \\ x \cap y & \text{ interseção} \\ x^c & \text{ complementação} \end{aligned}$$

Transformações no todo ou nada por um elemento estruturante: x sendo o conjunto de $P(\hat{A}^2)$ estudado, essas transformações consistem em deslocar um elemento estruturante b (disco, triângulo, quadrado, etc.) sobre a imagem de maneira que sua origem (centro) passe por todos os pontos do espaço e por cada lugar (ponto) percorrido. A resposta a uma questão relativa à interseção, à união ou inclusão de b com x dá uma transformação no todo ou nada (1 ou 0) deste ponto (erosão ou dilatação).

Morfologia binária

a) Erosão e dilatação

Seja um conjunto x de $P(\hat{A}^2)$, e b , um elemento estruturante munido de um centro (origem) x ; chamamos *erodido de x por b* , escrito $E^b(x)$ ou $\{x - b\}$, o lugar do centro de x de b tal que b seja incluído no x .

$$X - b = E^b(x) = \{x/b \hat{=} x\}$$

Chamamos *dilatado de x por b* , escrito $D^b(x)$ ou $\{x + b\}$, o lugar do centro de x de b tal que b encontre x .

$$X + b = D^b(x) = \{x/b \supseteq x \neq \}$$

A erosão e a dilatação são operações duais, dilatar um conjunto equivale a erodir seu complementar e vice-versa.

³ Lembrete nº1 : um ponto pertence ao complementar x^c se ele não pertence a x . Lembrete nº2 : a diferença simétrica $x/y = x \hat{=} y - x \cap y$

b) Propriedades da erosão e da dilatação

- Transformações crescentes

$$x \hat{=} y \supset E^b(x) \hat{=} E^b(y) \text{ et } D^b(x) \hat{=} D^b(y)$$

- A erosão é anti-extensiva

$$x \hat{=} E^b(x)$$

- A dilatação é extensiva

$$x \hat{=} D^b(x)$$

c) Abertura e fechamento

A erosão e a dilatação sendo transformações iterativas, possibilitam efetuar sobre um conjunto x uma erosão pelo elemento estruturante b , depois dilatar o conjunto erodido $E^b(x)$ pelo mesmo elemento estruturante b ; essa operação chama-se abertura, ela é escrita $O^b(x)$ ou x^b .⁴

$$O^b(x) = x^b = D^b[E^b(x)] = (x - b) + b$$

Podemos assim definir o fechamento como uma operação dual de abertura: é uma dilatação de um conjunto x por um elemento estruturante b seguido de uma erosão por esse mesmo elemento estruturante b ; é escrita $F^b(x)$ ou x_b .⁵

$$F^b(x) = x_b = E^b[D^b(x)] = (x + b) - b$$

d) Propriedades da abertura e do fechamento

- Operações crescentes

$$x \hat{=} y \supset x^b \hat{=} y^b \text{ et } x_b \hat{=} y_b$$

- A abertura é anti-extensiva

$$x^b \hat{=} x$$

- O fechamento é extensivo

$$x_b \hat{=} x$$

Morfologia em níveis de cinza

a) Erosão e dilatação

As mesmas definições dadas à morfologia binária se aplicam às imagens em níveis de cinza, que são consideradas como funções bi-dimensionais $I(x,y)$ e representam agora o conjunto x das definições precedentes⁶.

⁴ A transformação por abertura faz o papel de um filtro; ela suaviza os contornos, corta os istmos dos objetos e suprime as pequenas formas.

⁵ O fechamento preenche os canais e os buracos nos objetos; após sua transformação, um conjunto fechado é menos rico em detalhes.

⁶ As definições a seguir são dadas no caso monodimensional de uma função $I(x)$ mas podem ser facilmente utilizadas em duas dimensões.

Seja uma função de cinza $f(x)$ definida em \mathbb{A}^2 . A cada ponto x , associamos o elemento estruturante b . No domínio definido por b ao redor de x , a função $f(x)$ possui um valor superior e um valor inferior. Para construir a função erodida por um elemento estruturante plano, é necessário atribuir a cada ponto do domínio b o valor inferior que possui $f(x)$ nesse domínio.

$$E^b f(x) = f(x) - b = \inf\{f(\mu) : \mu \hat{=} b\}$$

Da mesma maneira, para construir a função dilatada por um elemento estruturante plano, é necessário atribuir a cada ponto do domínio b o valor superior que possui $f(x)$ nesse domínio⁷.

$$D^b f(x) = f(x) + b = \sup\{f(\mu) : \mu \hat{=} b\}$$

b) Abertura e fechamento

A abertura de uma função em níveis de cinza por um elemento estruturante b consiste em efetuar, sucessivamente, uma erosão e depois uma dilatação de $f(x)$.

$$O^b f(x) = f(x)^b = D^b\{E^b[f(x)]\} = [f(x) - b] + b$$

O fechamento de uma função em níveis de cinza por um elemento estruturante b consiste em operar, sucessivamente, uma dilatação e depois uma erosão de $f(x)$ ⁸.

$$F^b f(x) = f(x)^b = E^b\{D^b[f(x)]\} = [f(x) + b] - b$$

A abertura e o fechamento em níveis de cinza possuem as mesmas propriedades que a abertura e o fechamento em morfologia binária. Constituem-se de filtros morfológicos que formam sua estrutura, pois podemos combinar seqüencialmente a abertura e o fechamento para obter novos filtros (os filtros medianos).

Filtros próprios superiores. $g(x) = (FOF)^b f(x)$

Filtros próprios inferiores. $g(x) = (OFO)^b f(x)$

Filtro mediano. $g(x) = M f(x)$

c) Outras transformações morfológicas em níveis de cinza

· Extração de picos

A abertura elimina os picos. Para extraí-lo, é necessário efetuar uma subtração entre a imagem inicial e sua imagem aberta.

$$T f(x) = f(x) - O^b f(x)$$

O fechamento cobre os vales. Para extraí-lo, é necessário efetuar uma subtração entre a imagem fechada e a imagem inicial.

$$T f(x) = F^b f(x) - f(x)$$

· Gradiente morfológico

O gradiente morfológico de f por b obtém-se pela diferença entre a imagem dilatada e a imagem erodida por b .

⁷ Podemos ressaltar que a erosão reduz os picos (máximas locais) da função e alarga os vales (mínimas locais) enquanto a dilatação preenche os vales e espessa os picos.

⁸ A abertura arrasa os picos (aqueles cuja a espessura é inferior à do elemento estruturante) sem modificar os vales, e o fechamento preenche os vales muito estreitos (vales cuja espessura é inferior à do elemento estruturante) sem modificar os picos.

$$G^i(x) = \{D^b_i(x) - E^b_i(x)\}^{1/2}$$

· Transformação *cartola*

A diferença entre a imagem inicial e sua aberta só seleciona os topos, em função de sua espessura e não em função de sua altura ; pois para os topos S tendo uma altura suficiente h, utilizamos essa diferença como valor limiar.

$$S = \{x : I(x) - O^b_i(x) \geq h\}$$

Conservamos assim na imagem somente os picos do tamanho da *cartola* ou maiores⁹.

$$V = \{x : F^b_i(x) - I(x) \geq h\}$$

Realização prática das operações morfológicas

As imagens numéricas são matrizes de pixels (SAUTER *et al.*, 1987). O elemento estruturante é definido em linhas e colunas ; o ponto central do elemento conserva ou muda de valor segundo a verificação ou não de certas condições em sua vizinhança.

a) Erosão

O ponto central do elemento estruturante muda de indício (afetado à classe complementar, por exemplo) se :

pertencer à classe tratada e se existir em sua vizinhança ao menos um ponto que não pertence à classe tratada.

b) Dilatação

O ponto central do elemento estruturante muda de indício se:

não pertencer à classe tratada e se existir em sua vizinhança ao menos um ponto que pertence à classe tratada.

A morfologia matemática é, assim, um instrumento muito eficaz para a análise de imagens. As transformações morfológicas podem ser utilizadas também para extrair características de forma, como por exemplo, o índice de compacidade de um objeto, definido por:

$$IC = \frac{N_a}{N_f}$$

Sendo N: número de pixels pertencentes a *abertura* do objeto e N_f : número de pixels pertencentes ao *fechamento* do objeto. Com efeito, tanto mais a *abertura* e o *fechamento* de um objeto são próximos (IC = 1), mais o objeto é compacto.

APLICAÇÕES À GEOMORFOLOGIA

A *démarche* científica a ser seguida pelos geomorfólogos que querem se iniciar neste método é a seguinte : a primeira análise examina certos procedimentos matemáticos e, em seguida, iniciamos o reconhecimento dos meios para recensear

⁹ Podemos, da mesma maneira, definir uma outra transformação *cartola* para os vales V de uma certa profundidade h pela diferença entre a imagem fechada e a imagem inicial.

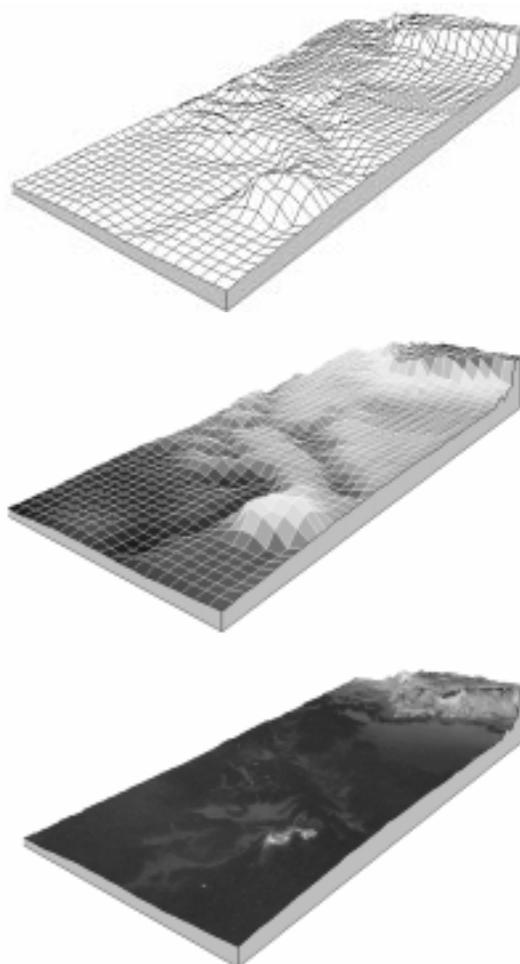
os relevos reais e classificá-los em função de critérios precisos, são eles : superfície, entalhe e distribuição. Enfim, estudamos a interpretação dos resultados do ponto de vista da geomorfologia.

Os operadores matemáticos

Um Modelo Numérico de Terreno (MNT) é uma matriz de pixels (DUPERET, 1989), cada um sendo definido em x, em y e em z (x e y são as coordenadas geográficas e z é a altitude) (fig. 1).

$$\text{MNT} = \{(x,y,z)\}$$

Figura 1: - Modelo Numérico de Terreno : Superfície antes do tratamento de morfologia matemática, coberta por uma fotografia aérea



Os operadores matemáticos estudam cada pixel, um após os outros, comparando-os aos seus vizinhos, procurando uma informação entre eles (altura máxima, mínima, etc.) e substituem o valor z do pixel central por essa informação. O número e a disposição de seus vizinhos podem variar e chamam-se *elemento estruturante* ou *vizinhança* (b).

a) Elemento estruturante (b)

b é uma superfície definida em pixel. Abaixo, um exemplo de um elemento estruturante 3#3 quadrado.

```
xxx
xox
xxx
```

Nesse caso, o pixel estudado é o central, o , e seu valor (seu "z") será comparado aos valores dos pixels x , dispostos ao seu entorno. Podemos falar de vizinhança de 1($b = 1$), pois examinamos 1 pixel em cada direção no entorno do pixel estudado.

Eis um exemplo de elemento estruturante 5#5 não quadrado.

```
xxx
xxxxx
xxoxx
xxxxx
xxx
```

O pixel o é comparado a um maior número de vizinhos (vizinhança de 2($b = 2$)) e a forma do elemento estruturante, próxima de um círculo, trata todas as direções geográficas sem privilegiar as diagonais.

A forma do elemento estruturante é um dado fundamental. Neste ponto do estudo, podemos entender que um elemento redondo vai procurar a informação em todas as direções do espaço, enquanto um elemento linear vai privilegiar uma direção, aquela que lhe é perpendicular. As análises de redes de fraturas, de drenagem, de ravinamento podem, então, ser orientadas (CHOROWICZ, 1989 ; SAUTER, 1988 ; SCANVIC, 1992).

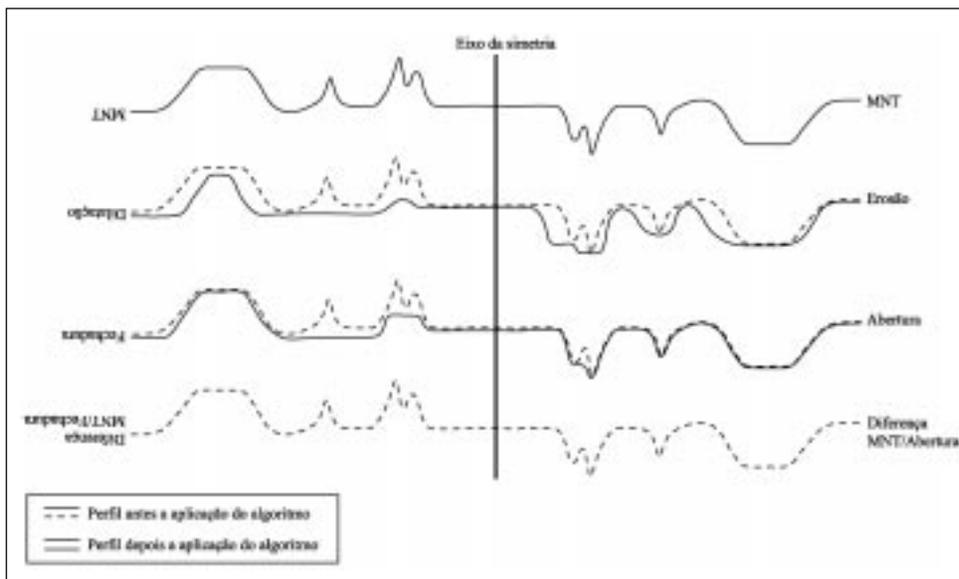
Da mesma maneira, o tamanho do elemento estruturante é um dado importante. Como conhecemos o passo de digitalização do MNT, conhecemos a superfície do pixel ; o tamanho do elemento estruturante corresponde, então, a uma superfície precisa sobre o terreno, no interior da qual procuramos uma informação particular. Procurar os topos vizinhos de uma montanha em uma vizinhança de 2 ou de 2000 km, é um problema de geomorfologia estrutural em duas escalas distintas. Assim, é necessário escolher a escala adaptada a *démarche* temática abordada.

Nos exemplos que se seguem, o elemento estruturante é sempre um quadrado 3#3, então $b = 1$. Os exemplos foram levantados em meio marinho (especialidade do autor), e por isso falaremos de profundidade em lugar de altitude (fig. 2).

b) Erosão matemática

Esta operação é puramente matemática e não visa simular um processo natural, apesar de que, excepcionalmente, em casos muito precisos no espaço e no tempo, poderia fazê-lo bem. No caso da erosão, a informação procurada na vizinhança é a profundidade máxima. Assim, o z do pixel central, no quadrado 3#3, é substituído pela profundidade máxima encontrada entre os 8 vizinhos. Isso vem a criar um MNT não real com aumento e aprofundamento de todos os buracos.

Figura 2 - Processo de morfologia matemática. A partir de um MNT podemos extrair relevos positivos ou negativos de um determinado tamanho combinando dois algoritmos: erosão e dilatação. Os dois procedimentos são exatamente simétricos e a figura pode ser lida de frente ou verso



c) Dilatação matemática

Essa operação é rigorosamente simétrica à precedente. Consiste em mudar o z de um pixel pela menor profundidade encontrada na vizinhança. Isso vem a criar um MNT não real com aumento e soerguimento das saliências. Essas transformações são limitadas pelos mesmos problemas que no caso precedente.

Essas duas operações matemáticas utilizadas isoladamente, a erosão e a dilatação, possuem pouco interesse geomorfológico. Por tornarem o relevo geométrico não podem servir nem de modelo nem de medida. Em casos raros, onde existe pequena vizinhança e um MNT com passo fino de digitalização, a operação erosão poderia trazer um cenário de evolução mas, atualmente, não existe ainda nenhum exemplo desse tipo na literatura científica.

Essas duas operações são interessantes porque podem ser realizadas uma após a outra e é sua combinação que traz uma verdadeira informação geomorfológica.

d) Abertura matemática

O MNT é inicialmente erodido. Esse novo MNT é, em seguida, dilatado com o mesmo elemento estruturante. As saliências cujas superfícies são inferiores ou iguais à do elemento estruturante desaparecem, independentemente de seu desnivelamento. As maiores saliências ficam intactas. Os buracos não são modificados.

e) Fechamento matemático

Novamente, esta operação é rigorosamente simétrica à precedente. O MNT é inicialmente dilatado e depois erodido pelo mesmo elemento estruturante. Os buracos cujas superfícies são inferiores ou iguais à do elemento estruturante desaparecem, os

buracos maiores permanecem e as saliências não são modificadas. O desnível também não é considerado. Essas duas operações são úteis para recensear certos relevos em função de sua superfície e de sua incisão (buracos ou saliências). É possível, então, realizar sua cartografia.

Inventário e localização dos relevos

Para obter uma cartografia automática dos buracos e das saliências, é necessário diferenciar os MNT abertos (ou os MNT fechados) e o MNT inicial.

MNT - *aberto* = seleção das saliências

fechado - MNT = seleção dos buracos

É importante notar que os relevos recenseados são reais, e são precisamente localizados, em x e y , sobre o MNT. Obtemos assim uma carta de relevos, buracos ou saliências, caracterizados por uma determinada superfície.

a) Mudança de escala

Se a superfície do elemento estruturante aumenta mas sua forma não se altera, as saliências e (ou) os buracos recenseados terão uma superfície maior. Retomando as operações E (Erosão), D (Dilatação), A (Abertura) e F (Fechamento) com um elemento estruturante quadrado 5×5 (seja $b = 2$), podemos identificar os relevos cuja superfície é $25/9$ vezes maior que com um 3×3 .

Trabalhos já realizados mostram, experimentalmente, que é necessário trabalhar com 4 tamanhos de elementos estruturantes (frequentemente 3×3 à 9×9 , seja $1 \leq b \leq 9$) (FOURNIER & REGNAULD 1992). Mas é evidente que segundo as características iniciais do MNT (em particular seu *passo*) outras combinações de tamanhos podem ser pertinentes. Podemos produzir uma carta de Buracos (B) e uma carta de Saliências (S) para cada tamanho de elemento estruturante. Na seqüência do texto, denominaremos essas cartas B1 à B4 e S1 à S4 (buracos recenseados com $b = 1$; $b = 2$; etc.; saliências recenseadas ...).

Na abordagem relacionada à mudança de escala, podemos ressaltar a superposição de formas, umas dentro das outras, ou ao contrário, sua dissociação espacial em função de seu tamanho. Pequenos sulcos inseridos em ravinas e sucessivamente em voçorocas e cânions correspondem a uma morfologia de *badlands* e a uma superposição espacial de B1, B2, B3, B4, etc. (REGNAULD & THOMAS, 1990). Ao contrário, um largo vale glacial de fundo plano, alimentado por um canal torrencial suspenso, se marcará por uma descontinuidade espacial entre B1 e B4.

b) Valor dos desníveis

Cada uma das cartas B1 a B4 e S1 a S4 é uma função de z . Os buracos e as saliências recenseadas possuem uma superfície (função de vizinhança) mas também possuem um desnivelamento, que até aqui ainda não foi considerado. Para conhecê-lo é necessário fazer um histograma de cada B e de cada S. Se temos 8 cartas, teremos 8 histogramas. É necessário considerá-los com cuidadoⁿ, o significado desses desníveis. O elemento estruturante que utilizamos é quadrado. Nas E e D procuramos os z máximos e mínimos em todas as direções. O desnível medido nas cartas B e S é a diferença entre o pixel mais baixo (ou o mais alto) e o MNT inicial, porém não sabemos exatamente sua localização. Sabemos somente que ele está na vizinhança dada mas não conhecemos em qual direção.

Os histogramas das cartas B e S mostram desníveis reais que não são orientados no espaço. É uma informação sobre a inclinação máxima da vizinhança mas não devemos confundir-lo com um histograma de carta de inclinação nem de

carta de exposição. Através de uma outra forma do elemento estruturante (linear) podemos obter as informações sobre a orientação das inclinações.

INTERPRETAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS

As interpretações geomorfológicas são múltiplas e cada usuário pode interpretar seus resultados em função de seu terreno e das temáticas por ele desenvolvidas. Várias pesquisas foram desenvolvidas pelo autor, notadamente na França (FOURNIER, 1992 ; FOURNIER *et al.*, 1997), em Portugal (REGNAULD & THOMAS, 1991 ; REGNAULD *et al.*, 1994, 1995) e na Indonésia (REGNAULD *et al.*, 1992). Em cada caso, a geomorfologia obtém um novo conhecimento da utilização da morfologia matemática, mas esta não poderia substituir os estudos clássicos.

Pesquisa de paleo-formas quaternárias

Os litorais elevados da Bretanha (oeste da França) são principalmente formados por vertentes periglaciais recobertas de formações quaternárias frias (*head* e formações similares) e de depósitos eólicos, arenosos e siltosos. Essas formações foram depositadas sobre uma topografia diferenciada e, às vezes, encobrindo antigos sulcos pequenos que não aparecem na topografia atual.

Na ocasião de fortes tempestades o nível do mar pode ultrapassar 6,4 m acima do nível 0 (*storm surges*). Nessas condições, as formações móveis estão expostas a uma erosão rápida e o recuo pode atingir 2 m em 24 horas. A hipótese inicial estabeleceu que cada saliência poderia abrigar um paleocanal. Procuramos, então, isolar sobre o MNT os relevos em saliência. Uma dilatação com um elemento estruturante bem escolhido pode dar uma indicação de como era a paleo-topografia. Podemos formular hipóteses sobre a localização de sulcos antigos e verificar, em seguida, no terreno.

Nesse caso preciso, o procedimento matemático não trouxe nenhuma informação nova mas permitiu melhor objetivar o trabalho em campo.

Classificação dos relevos

Uma nova via de pesquisa se abre quando a estrutura dos arquivos de MNT é similar a de uma imagem numérica. Várias abordagens são possíveis, como por exemplo, a possibilidade de efetuar tratamentos idênticos aos utilizados no tratamento de imagem e nos métodos estatísticos. É possível, então, combinar diferentes canais (trata-se aqui de MNT com b diferentes) na forma de equidensidades coloridas e de composições coloridas.

A hipótese de trabalho só considera os arquivos "buracos". Com a ajuda da morfologia matemática torna-se fácil (combinando várias imagens com b diferentes) encontrar as formas de superfícies estudadas. Com efeito, se um ponto x da imagem $\hat{I} B4$ e $\hat{I} B1$ ($B4$ sendo um MNT "extração de buracos" com $b = 4$), estamos na presença de um relevo pouco incisivo e com fundo plano. Ao contrário, se um ponto $x \hat{I} B1$ e $x \hat{I} B4$, estamos em presença de um relevo incisivo.

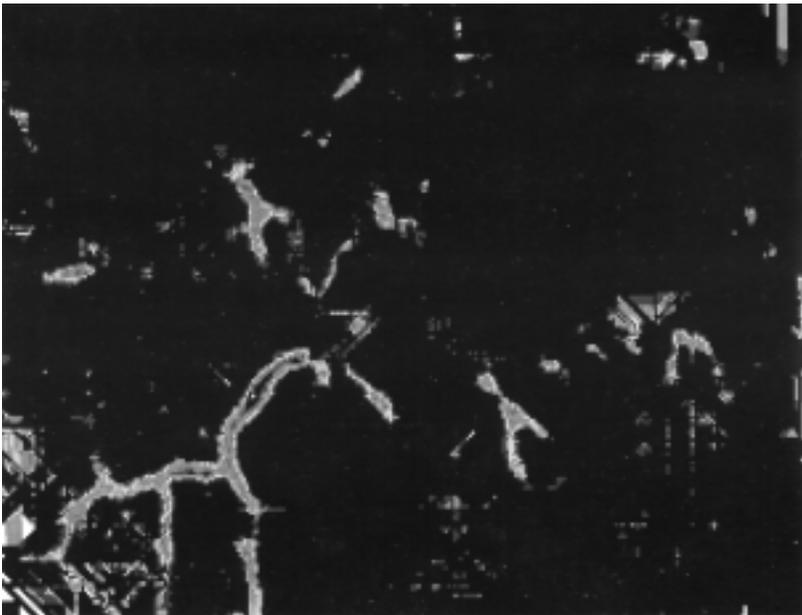
Por conseqüência, parece fácil efetuar uma classificação das formas de incisão do MNT criando 2 arquivos com 4 canais do tipo :

Canal 1 : $x \hat{=} B1$
Canal 2 : $x \hat{=} B1, B2$
Canal 3 : $x \hat{=} B1, B2, B3$
Canal 4 : $x \hat{=} B1, B2, B3, B4$

Canal 1 : $x \hat{=} B4$
Canal 2 : $x \hat{=} B4, B3$
Canal 3 : $x \hat{=} B4, B3, B2$
Canal 4 : $x \hat{=} B4, B3, B2, B1$

A combinação mais interessante é a que reuna os canais B2, S4 e MNT (S4 sendo a imagem "extração das saliências" com $b = 4$ e o MNT sendo o arquivo das altitudes). Essa combinação permite visualizar a rede hidrográfica e os relevos isolados (fig. 3). Inicialmente esse método permite recensear automaticamente as formas e os tamanhos das incisões, em seguida, de estimar o fornecimento potencial de matéria para uma bacia hidrográfica dada e de conhecer o trajeto dos fluxos de matéria. A comparação com o MNT inicial permite conhecer os resíduos do modelo e tentar encontrar uma explicação geomorfológica.

Figura 3 - Resultado do modelo : Tratamento por morfologia matemática de uma zona sub-litorânea na Bretanha Norte. Estimação de relevos "em buraco" e dos trajetos de sedimentos móveis.



Esse tipo de abordagem é eficaz para as inclinações submarinas incisivas e para os cânions. Os cânions são profundamente encaixados e neles existem tributários suspensos. Os "afluentes" (pequenos buracos) vão ser recenseados por B1 e B2,

enquanto o talvegue principal vai ser recenseado por B3 e B4 (grandes buracos). Se um B1 está no interior de B4, isso significa que é um canal interior do talvegue principal. A classificação proporciona, assim, bons resultados.

Itinerários sedimentares no meio submarino

Na inclinação da bacia anterior ao arco das ilhas vulcânicas de Sumatra, o ravinamento é intenso. Os sismógrafos situados nas ravinas registram vários deslizamentos por dia causados por micros sismos. Postulamos que esses deslizamentos deveriam originar-se em uma superfície alta, com uma dimensão importante (aqui chamada de S3), e descer em direção ao buraco do tipo B1.

Com o objetivo de melhor instalar os *Ocean Bottom Sismometer* (OBS) foi necessário estabelecer uma imagem do fundo precisa para que essa pudesse dar uma indicação da geodinâmica externa e, em seguida, permitir uma análise discriminante dos registros. O tratamento numérico visou realizar um inventário dos itinerários que a dinâmica superficial de materiais poderia utilizar, visou também quantificar o tipo e a continuidade dos fluxos potenciais e de permitir uma avaliação dos sinais recebidos pelos OBS. Esses últimos podem indicar quais itinerários foram ativos durante o período teste.

No meio submarino não é possível utilizar as técnicas habituais de extração de bacia, pois os escoamentos de água não se dão, necessariamente, de montante para jusante mas também inversamente ou paralelamente às isóbatas. Devemos calcular os itinerários de fluxos sem preconceber o sistema de inclinação. O método empregado consiste em simplificar o relevo por algoritmos morfométricos indiferentes à inclinação, depois comparar o relevo simplificado com o MNT inicial. Assim, é possível realizar o inventário de certos tipos de incisões ou de promontórios passíveis de influenciar os fluxos sedimentares. Os algoritmos de tratamento fundam-se sobre as noções matemáticas de erosão e de dilatação explicadas acima. Podemos observar uma ampliação de cristas e um preenchimento dos talvegues em relação ao MNT inicial. Porém, não se trata de uma simulação de acumulação na vertente, pois essa manipulação matemática não corresponde a nenhum processo morfológico real.

A "erosão" caracteriza-se por um recuo das vertentes e um alargamento dos vales, mas não simula um processo geomorfológico de erosão porque não existe um aprofundamento dos talvegues.

A comparação entre "abertura" e o MNT permite identificar as linhas de cristas ou os pontos altos que são susceptíveis, topograficamente, de tornar-se o ponto de partida dos deslizamentos. A carta B1 proporciona o inventário de todos os "poços" de sedimentos que podem concentrar os fluxos de materiais que deslizaram de uma bacia.

Como primeiro resultado, podemos estabelecer uma carta de itinerários de fluxos sedimentares. Essa carta mostra as saliências, fontes hipotéticas de sedimentos, e os buracos, "poços" hipotéticos de sedimentos. Assim, os OBS puderam ser localizados com mais eficiência para registrar somente os micros sismos que acionam os fluxos ativos de sedimentos. O segundo resultado é geodinâmico. Entre as partes, alta e baixa do sistema de vertente, não existem continuidades de fluxos. Pudemos ressaltar descontinuidades e localizar "poços" de sedimentos temporários situados a meia vertente, representando uma estocagem temporária, que atingida por um evento particular e local, pode iniciar o processo de deslizamento.

CONCLUSÃO

As topografias numéricas (MNT) possuem uma utilização polivalente : tratamento de incisões e de inclinações, cálculos de volumes erodidos, etc.

Os neo-canais que ressaltam formas, de tamanho equivalente ao do elemento estruturante, são úteis como os canais de uma imagem de satélite, o que permite a utilização de técnicas de classificação e de tratamento de dados do sensoriamento remoto (RUDANT *et al.*, 1988). O relevo numérico pode, assim, ser classificado e repertoriado. Podemos também quantificar a forma e o tamanho de todos os relevos positivos (saliências) e negativos (buracos). Os módulos de análise espacial dos programas de Sistema de Informação Geográfica (SIG) podem também trabalhar esses tipos de arquivos, particularmente, em topologia (JENSON;& DOMINGUE, 1988).

Uma outra aplicação é o desenvolvimento de métodos de reconhecimento automático das formas de relevo (ADAM de VILLIERS & LEYMANIE, 1984 ; CHOROWICZ *et al.*, 1989), especialmente, no estudo de suas propriedades fractais (RAMSTEIN, 1985 ; REGNAULD *et al.*, 1994).

Além dos resultados clássicos de orometria numérica, a morfologia matemática permite projetar cenários de evolução das formas e alimentar a reflexão, visando a criação de modelos matemáticos. A morfologia matemática torna-se, assim, um instrumento para os trabalhos de geomorfologia dinâmica e quantitativa.

AGADECIMENTO

Andrea de Castro Panizza (Doutoranda em Geografia Física, Universidade de São Paulo) pela tradução do texto, *Pr. Dr. Hervé Regnaud* (Professor de Geomorfologia, Universidade de Rennes 2) pela revisão do manuscrito, *Pascal Gouéry* (Engenheiro de Pesquisa em informática, Universidade de Rennes 2) pela criação da figura 1 e a elaboração do algoritmo informático, *Hélène Gloria* (Técnica de Pesquisa em geomorfologia, Ecole Pratique des Hautes Etudes) pela concepção da figura 2.

REFERÊNCIAS

- ADAM de VILLIERS, C.; LEYMANIE, P. Cartographie automatique des situations topographiques en vue d'une utilisation géologique, **Sci. de la Terre et Inform. Géol.**, n.20, p.333-350, 1984.
- AUPHAN, E. **Morphométrie plane du littoral**, Dinard, Mém. EPHE, 1972.
- BAULIG, H. Morphométrie, **Ann. Géogr.**, n. 369, p. 385-408, 1958
- CHASSERY, J.-M.; MONTANVERT, A. **Géométrie discrète en analyse d'images**. Paris, Hermès, 1991.
- CHORLEY, R. J. **Spatial analysis in geomorphology**, London, Methuen & Co Ltd., 1972.
- CHOROWICZ, J. Utilisation des MNT pour la reconnaissance automatique de certaines formes en géologie et en géomorphologie, **Bull. Soc. Fr. Photogram. Télédétec.**, n.115, p. 5-7, 1989

CHOROWICZ, J. et al. A new technique of recognition of geological and geomorphological pattern in digital terrain models, **Rem. Sens. and Env.**, p. 229-239, 1989

COLE, J.-P. ; KING, C. A. M. **Quantitative Geography. Technics and Theories in Geography**, New-York, John Wiley and Sons, 1970

COQUE, R. **Géomorphologie**, Paris, Armand Colin, 1993.

COSTER, M.; CHERMANT, J.-L. **Précis d'analyse d'images**, Paris, Presses du CNRS, 1989.

DOORNKAMP, J.-C.; CUCHLAINE, A. M. K. **Numerical analysis in geomorphology : an introduction**, London, Edward Arnold, 1971.

DUPERET, A. **Contribution des MNT à la géomorphométrie**, Paris, Mém. DEA ENSG/ Université Paris VI, 1989.

FLOUZAT, G. Morphologie mathématique et analyse des images de télédétection, **Photo interprétation**, v.1, n. 5, 1988.

FLOUZAT, G.; MERCHOUB, Y. Modélisation de l'extraction manuelle d'éléments texturaux par la morphologie mathématique, **Photo interprétation**, v.6, n.6, p.59-64, 1983.

FOURNIER, J. **Dynamique d'une côte à falaises**, Rennes, Mém. DEA Université Rennes 2, 1992.

FOURNIER, J.; REGNAULD, H. **Morphologie mathématique, applications à la géomorphologie dynamique**, Rennes, Mém. Lab. Costel, Université de Rennes 2, 1992.

FOURNIER, J.; REGNAULD, H.; GOUERY, P. Submarine geomorphology and submarine landscapes of rocky platforms preceding cliffs en Brittany (France), **Mem. Descr. Carta Geol. D'Italia**, n. 52, p.154-176, 1997.

HUGGET, R. J. **Earth Surface Systems**, Berlin, Springer Verlag, 1985.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, **Photogram. Eng. and Rem. Sens.**, v.11, n.54, p.1593-1600, 1988.

KIRKBY, M. J.; NADEN, P. S.; BURT, T. P.; BUTCHER, D. P. **Computer simulation in physical geography**, New-York, John Wiley and Sons, 1987.

MASSON d'AUTUME (de), M. Construction du modèle numérique d'une surface par approximations successives, **Bull. Soc. Fr. Photogram. Télédétec.**, n.71-72, p.33-44, 1979.

MERCIER, J.-L. **Pratique de Lotus 1-2-3 en géomorphologie**, Paris, Hermès, 1992.

NAUDIN, J.-J. Analyse cartographique : étude numérique des caractéristiques morphologiques des surfaces. Application au domaine sous-marin profond du Golfe de Gascogne, **Mém. IGBA** n.13, Bordeaux, 1993.

PEGUY, C.-P. Principes de morphométrie alpine, **Rev. Géogr. Alp.**, n.18, p.453-482, 1942.

PEGUY, C.-P. Introduction à l'emploi de méthodes statistiques en géographie physique, **Rev. Géogr. Alp.**, n.36, p.1-103, 1958.

RAMSTEIN, G. **Analyse des synthèses d'images utilisant la notion de dimension fractale, application à la télédétection**, Strasbourg, Group. Sci. Télédétec. Spat., Université Louis Pasteur, 1985.

REGNAULD, H., et al. Une image de la mobilité superficielle des fonds au large de Sumatra, **Mappemonde**, n.3, p.37-41, 1992.

REGNAULD, H.; RAMOS-PEREIRA, A.; FOURNIER, J. Approche quantitative de la discontinuité de l'évolution des formes littorales à différentes échelles de temps, exemple du recul de la côte de l'Arrabida (Portugal), **Géomorphologie**, n.1, p.7-27, 1995.

REGNAULD, H.; THOMAS, Y.-F. Analyse numérique de la morphologie du canyon de Nazaré, marge continentale du Portugal, **Finisterra**, v.25, n.50, p.245-260, 1990.

REGNAULD, H.; THOMAS, Y.-F. Mouvements de plaques et systèmes morphogéniques : exemple de la pente continentale portugaise, **Z. für Geomorph. (N.F.)** (Suppl.), n.82, p.147-152, 1991.

REGNAULD, H.; THOMAS, Y.-F.; FOURNIER, J. Some models for coastal evolution and submarine landforms response to sea level rise and non linear evolution. In: **Scaling, multifractals and non linearity in solid earth geophysics**, Hamburg, 1994.

RUDANT, J.-P.; CHOROWICZ, J.; DURANT, P. Problèmes d'interprétation géomorphologique et géologique et modélisation géométrique d'image radar à partir d'un modèle numérique de terrain, **C. R. Acad. Sci.**, v.II, p.15-20, 1988.

SAUTER, D. **Utilisation du traitement d'images en géologie structurale, recherches méthodologiques et applications multiscalaires**, 1988, Tese (Doctorat), Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1988.

SAUTER, D.; de FRAIPONT, P.; SCIUS, H. Traitement d'images sur un MNT : applications en géologie structurale, **Terra Cognita**, v.7, n. 2-3, p.1-381, 1987.

SCANVIC, J.-Y. Télédétection aérospatiale et informations géologiques, **BRGM**, Orléans, n.24, 1992.

SCHEIDEGGER, A. E. **Theoretical Geomorphology**, Berlin, Springer Verlag, 1991.

SERRA, J. **Image analysis and mathematical morphology**, London, Academic Press, 1982.

SUNAMURA, T. **Geomorphology of rocky coasts**, New-York, John Wiley and Sons, 1992.

VIDAL, F.; GUND, V. Un MNT issu d'un logiciel de télédétection, **Mappemonde**, n.2, p.19-21, 1991.

WENDLINGER, T. **Construction, étude et représentation graphique de surfaces déformées par des relevés de points**, 1985, Tese (Doctorat), Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1985.

YOELI, P. Computer executed production of a regular grid of height points from digital contours, **The Am. Cartogr.**, v.13, n.3, p.219-229, 1986.

Recebido em setembro de 2002

Aceito em março de 2003