

## ABORDAGENS ANALÍTICAS RECENTES EM GEOMORFOLOGIA

ANTONIO CHRISTOFOLLETTI

Departamento de Cartografia e Análise da  
Informação Geográfica  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
UNESP- Campus de Rio Claro

A teoria do ciclo geográfico e as relacionadas com a pedimentação e pediplanação e pediplanação baseiam-se na concepção de que o modelado terrestre evolui, como resultado da influência exercida pelos morfogenéticos, ao longo de uma seqüência de fases. Explicitamente, a partir de 1960, surgiram novas abordagens analíticas baseadas na teoria do equilíbrio dinâmico, na concepção probabilística e na adoção da teoria dos sistemas. A teoria dos sistemas apresenta duas fases, uma ligada com a formulação das ciências biológicas e outra baseada no desenvolvimento observado na Física e na Química. Se as concepções cíclicas foram amplamente desenvolvidas, as demais ainda permanecem em evolução e muitas nuances reinantes nos sistemas morfológicos ainda não foram devidamente analisadas. Nesta contribuição, o objetivo é apresentar panorama guia sobre essas abordagens analíticas recentes.

### **A TEORIA DO EQUILÍBRIO DINÂMICO**

A teoria do equilíbrio dinâmico considera o modelado terrestre como um sistema aberto. A fim de que possam permanecer em funcionamento, necessitam de ininterrupta suplementação de energia e matéria, assim como funcionam a través de constante remoção de tais fornecimentos. Grove Kart Gilbert (1987) foi primeiro a expor uma concepção teoria do desenvolvimento remodelado em termos de equilíbrio dinâmico e recentemente, em várias contribuições, John T. Hack (1957:1960, 1965, 1973, 1975) utilizou-a a fim de interpretar a topografia do vale do Shenandoah, na região apalecheana, levando em consideração as características das redes de drenagem e das vertentes, assim como para explicitar as implicações ligadas com o perfil longitudinal, oscilações eustáticas e reconhecimento de superfícies aplainadas. Em 1965, Howard delineou várias implicações dessa teoria para os estudos geomorfológicos.

Aplicando a concepção do equilíbrio dinâmico às relações espaciais nos sistemas de drenagem, Hack ampliou consideravelmente as ideias de Gilbert e ofereceu nova abordagem á interpretação da paisagem. Essa teoria supõe que em um sistema todos os elementos da topografia estão mutuamente ajustados de modo que se modificam na mesma proporção. As formas e os processos encontram-se em estado de estabilidade e podem ser considerados como independentes do tempo. Ela requer um comportamento balanceado entre forças opostas, de maneira que as influências sejam proporcionalmente iguais e que os efeitos contrários se cancelem a fim de produzir o estado de estabilidade, no qual a energia está continuamente entrando e saindo do sistema.

A argumentação de Hack baseia-se no fato de que as formas de relevo e os depósitos superficiais têm uma complexa, mas íntima, relação com a estrutura geológica. O autor verificou que a declividade dos canais fluviais diminui com o comprimento de rio, de maneira específica conforme o tipo de rocha. Todavia, o valor da declividade do canal é diferente para categorias diversas de material rocoso; por exemplo, na bacia do Shenandoah, os canais nos arenitos endurecidos possuem gradiente de aproximadamente dez vezes o dos canais esculpidos nos folhelhos, nos trechos próximos às cabeceiras. A amplitude topográfica, a distância igual dentro de determinado tipo de rocha, mas difere muito de uma litologia para outra. Do mesmo modo, os perfis das vertentes variam conforme o material litológico. As rochas mais resistentes, e as diferenças topográficas não serão eliminadas. Por essa razão, as principais feições topográficas estão relacionadas com a estrutura geológica e os grandes rios mostram que seus cursos se desviam das áreas de rochas resistentes (Hack, 1975).

A teoria do equilíbrio dinâmico demonstra que os aspectos das formas não são estáticos e imutáveis, mas que são mantidos pelo fluxo de matéria e energia. Com o passar do tempo, a massa da paisagem estará sendo removida implicando em alterações progressivas em algumas propriedades geométricas, como no decréscimo do relevo médio, desde que não haja nenhuma compensação tectônica. A existência do princípio do tamanho ótimo e a da lei do crescimento alométrico para os componentes individuais, ou subsistemas, implicam que se a energia disponível dentro do sistema for suficiente para impor o tamanho ótimo naquele sistema, esse tamanho será mantido a través do tempo e não estará sempre susceptível às mudanças sucessivas e sequenciais. A densidade de drenagem e a estruturação das redes de drenagem podem permanecer as mesmas a través de oscilações paleoclimáticas, como na sucessão de fases secas úmidas das áreas intertropicais. Para que haja modificações sensíveis no sistema é preciso que essas oscilações ultrapassem os limites que interferem no equilíbrio interno, ocasionando reajustamento geral. Dessa maneira, é preciso que se reconheça a estabilidade relativa, e o grau de absorção, perante as modificações e alterações oriundas do meio ambiente.

A respeito das implicações ligadas com os movimentos eustáticos, Hack (1975) mostra que os rios são independentes dos seus níveis de base, se acontecer um soerguimento eustático, as áreas de montante provavelmente não serão afetadas. Essa concepção harmoniza-se com a idéia de que os perfis longitudinais e o comportamento geral dos cursos d'água que estão modelando as declividades são determinadas pelas condições provindas de jusante. Considerações a esse respeito foram desenvolvidas por Christofolletti (1971;1981). Por outro lado, essa teoria não descarta a existência dessas superfícies que pode continuar sendo instrumento valioso para a compreensão geral do modelado terrestre, mas retira dessa morfologia o significado de ser etapa do final de ciclo erosivo e sua conotação genética.

A teoria do equilíbrio dinâmico possibilitou a intensificação dos estudos sobre os processos e o desenvolvimento das técnicas de quantificação, assim como

o manejo adequado das relações entre a forma e a dinâmica do modelado terrestre, em várias hierarquias de grandeza espacial.

## **A TEORIA PROBABILÍSTICA DA EVOLUÇÃO DO MODELADO**

Luna B. Leopold e W. B. Langbein (1962) foram os primeiros a estabelecer proposições relacionadas com a teoria probabilística para a abordagem evolutiva das paisagens como um todo, empregando analogias simples com a termo dinâmica. A paisagem é constituída de numerosos elementos, interfluenciados por diversos fatores, de modo que se torna quase impossível seguir em detalhe o desenvolvimento de cada constituinte (rios, vertentes. etc) do sistema em consideração. Por outro lado, a escala dos fenômenos atuantes é tão variada, assim como é complexa a inter-relação entre eles, que o conhecimento só pode prosseguir através de considerações sobre as suas propriedades médias, utilizando-se de conceitos probabilísticos.

As paisagens constituem respostas a um complexo de processos, cada um exigindo apropriadas escalas espacial e temporal para serem estudados. Pode-se discernir uma taxonomia das paisagens, inseridas no princípio da hierarquia aninhada entre os diversos graus de grandeza temporo- espacial dos sistemas, em vista de suas especificidades funcionais. Na esculturação das formas de relevo essa complexidade é descrita pelas inúmeras variáveis envolvidas análise dos elementos, havendo interação, interdependência e mecanismos de retro alimentação. O mecanismo de cada processo, assim como delinear de suas conseqüências, pode ser conhecido de maneira determinística. Mas as interações e os mecanismos de retro alimentação fazem com que as combinações entre tais conjuntos de processos ganhem a conotação de aleatoriedade em sua ocorrência. A ajustagem no sistema pode levar ao aparecimento de respostas diferenciadas, todas elas possíveis, embora se postas diferenciadas, todas elas possíveis, embora se possa pensar que as respostas mais comuns se organizem em torno do valor modal. Os exemplos de formas de relevo, oriundos da atuação de determinado sistema morfogenéticos, representam uma população estatística, compatível com a distribuição normal. A tendência central dessa distribuição pode ser descrita ou prevista, mas em nenhum momento é possível especificar as condições exatas para descrever um exemplo individualizado. A noção de probabilidade insere-se como básica na avaliação da magnitude e freqüência dos eventos, e na ajustagem das formas de relevo.

A teoria probabilística apresenta perspectivas muito amplas, e os modelos elaborados em função dessa abordagem vão sendo ampliados. Em 1964 Scheidegger demonstrou as implicações da mecânica estatística para a Geomorfológica e posteriormente assinalou a analogia da termodinâmica para o estudo dos meandros e para a evolução das paisagens. Em 1966 Scheidegger e Langbein expuseram várias aplicações do conceito de probabilidade nos estudos geomorfológicos, e Langbein e Leopold (1966) utilizaram do conceito de variância mínima no estudo sobre os meandros fluviais. A teoria probabilística abriu possibilidade amplas para a utilização das técnicas de simulação, empregadas na análise dos problemas relacionados com as redes de drenagem e vertentes. Outra nuance analítica está

relacionadas com estudo da distribuição da energia no sistema, focalizando e entropia do sistema.

A teoria do equilíbrio dinâmico e a concepção probabilística sobre a evolução do modelado terrestre surgiram quase simultaneamente, mas torna-se hoje difícil querer explicitar as diferenças básicas entre ambas. As proposições envolvidas nos trabalhos parecem indicar que são facetas nascidas na adoção da teoria de sistema, reativadas e acrescidas por amplo envolvimento com as ciências físicas a respeito da focalização conceitual e analítica. A abordagem do equilíbrio dinâmico surge como concepção teórica mais explícita e coesa, enquanto as contribuições probabilísticas representam mais enriquecimento no tratamento das características dos sistema, possibilitando apreensão adequada do funcionamento complexo e das relações entre os processos e a morfologia.

## **A ADOÇÃO DA TEORIA DE SISTEMAS**

A adoção da teoria de sistemas propiciou renovação conceitual em Geomorfologia, e as suas proposições foram sendo incorporadas nos mais diversos setores de estudos. Embora seja possível detectar sinais mais antigos, as observações mais explícitas ligam-se com as contribuições de Chorley (1962) e Chorley e Kennedy (1971). Ao concatenar as idéias dispersas e oferecer a tipologia dos sistemas, criou-se oportunidade para estudos minuciosos e para as tentativas de ensaios gerais, visando inclusive a elaboração de livros textos. Nesse aspecto, a obra de Chorley, Schumm e Sudgen (1985) representa o trabalho mais satisfatório atualmente disponível. Para avaliação dos sistemas da superfície terrestre, como contribuição valiosa para a Geografia Física, deve-se destacar a contribuição de Huggett (1985).

A abordagem de sistemas em Geomorfológica possibilitou inclusive o discernimento e a compatibilização das etapas adequadas aos procedimentos analíticos correspondem aos diversos níveis de tratamento, assinalando o grau de complexidade a ser estudado, direcionados para o estudo da morfologia, da dinâmica e da integração conjunta do sistema. Ao nível do tratamento morfológico, as análises envolvem estudos sobre as características geométricas das formas de relevo e da distribuição espacial, assinalando aspectos dos padrões em função dos índices topográficos, morfométricos e topológicos. Esse setor recebeu atenção generalizada, estimulada inicialmente pelos trabalhos de R. E. Horton e A. N. Strahler. Na atualidade, um ponto de vanguarda reside no emprego das fractais. Ao lado da morfologia, desenvolveu extraordinariamente o estudo dos processos, procurando compreender a dinâmica e os fluxos de energia e matéria, assim como o comportamento do sistema em seu estado de equilíbrio, mudança e desenvolvimento. Compatibilizando ambas, o terceiro nível integra o relacionamento dos processos, o terceiro nível integra o relacionamento dos processos-respostas, focalizando a expressividade da estrutura (especialidade) em função das forças e processos atuantes. Ao lado dos estudos empíricos ganhou realce as atividades ligadas com a modalização a teorização aplicativo em Geomorfológica. A obra de Scheidegger, e os simpósios recentes organizados por Thorn (1982), Woldenberg (1985) e Ahnert (1987) constituem exemplos ligados a essa temática.

A concepção de sistema salienta que o conceito básico reside em considerar a totalidade, mas que se torna válido estudar as interações entre os elementos como as próprias características dos elementos. Como unidade, o sistema apresenta identidade, cuja persistência faz ressaltar sua manutenção em face de distúrbios ocorridos no meio ambiente. Há um grau de absorção a esses distúrbios externos. Por outro lado, quando as alterações externas ultrapassam magnitudes de alto valor, acima dos limiares, os sistemas possuem capacidade para se adaptar e atingir novo estado de equilíbrio, em face das condições imperantes. Todavia, ao delinear o sistema a ser estudado, deve-se estar ciente da grandeza espaço-temporal envolvida, no contexto embutimento hierárquico, O canal fluvial pode ser um sistema, mas se encontra como parcela da rede de drenagem. Este sistema, por sua vez, constitui elemento da bacia hidrográfica. O sopé e os interflúvios integram o sistema das vertentes, que por sua vez é elemento também do sistema bacia hidrográfica.

A adoção da teoria de sistemas em geomorfologia foi inspirada nas contribuições de Ludwig von Bertalanffy, cujos trabalhos fundamentais se relacionaram com o campo da biologia (Bertalanffy, 1950; 1973). Muitas concepções expressam essa similitude, como a lei do crescimento alométrico e a do tamanho ótimo. Embora muitos estudos desenvolveram a aplicação da abordagem de sistemas, pode-se afirmar que essa “onda revolucionária” ainda não atingiu seu ápice. Mesclando contribuições com essa visão biológica dos sistemas, a literatura geomorfológica começa a mostrar sinais aplicar perspectivas oriundas da Física e da Química no tocante aos sistemas dinâmicos no tocante aos sistemas dinâmicos, a fim de compreender mais adequadamente a complexidade da organização espacial dos sistemas do meio físico. Buscam-se as bases nos trabalhos de Prigogine (1947; 1980), Prigogine e Stengers (1984<sup>a</sup> ; 1984b), assim como nos de Haken (1977;1984; 1985), Jantsch (1980) Laszlo (1972; 1983) e Nicolis e Prigogine (1977, por exemplo. A expectativa é a de que dinâmica dos sistemas não lineares é imensamente rica e complexa, envolvendo comportamento periódico e caótico, Huggett (1987), assinala que, conforme Prigogine (1980), os sistemas dissipativos possuem três aspectos interligados: função, que se expressa nas equações de processo; estrutura espaço-temporal (configuração, que resulta das instabilidades, e flutuações, que desencadeiam as instabilidades.

Na Geomorfológica, além da contribuição de Huggett (1987), os trabalhos mais significativos são de W. E. H. Culling. Em 1985 esse autor apresentou a teoria dos sistemas dinâmicos não lineares em sua aplicação para a Geografia Física. Em 1987 expõe a potencialidade das abordagens modernas sobre os sistemas dinâmicos para o pensamento geográfico, tanto para os aspectos físicos quanto humanos. Durante a XIX Assembleia Geral da União Internacional de Geodésia e Geofísica, realizada em agosto de 1987, na cidade de Vancouver, Adrian Scheidegger e Martin Haigh coordenaram Simpósio a respeito da abordagem dos sistemas dinâmicos no estudos dos azares naturais, salientando que essa “abordagem representa uma metodologia para se reconhecer as similaridades funcionais na evolução das singularidades de muitos sistemas”, e que começa a ser desenvolvido no âmbito das geociências (Haigh e Scheidegger, 1988). Não volume Geomorphological

Models, organizado por Ahnert (1987), Haigh (1987) utiliza da teoria dos sistemas para analisar as noções de hierarquia e auto-organização em Geografia, considerando a evolução das estruturas dissipativas. Essa temática também encontra-se inserida na apresentação feita por Richards (1987) a respeito ambiente, processos e formas nos canais fluviais. Em outros artigos, Culling (1988b; 1988c) trata da aplicação das noções de ergodicidade, dimensão e entropia e da análise da variabilidade espacial em paisagens, considerando que a regularidade/irregularidade das paisagens exibe estocasticidade e pode ser estudada como função de um campo gaussiano.

Não se deve esquecer, por último, as tentativas para se aplicar a teoria das catástrofes, com base nos trabalhos de René Rhom (1972; 1975; 1988), no estudo do desenvolvimento e mudanças nos sistemas em Geomorfológica. Ao lado proposição geral de wagstaff (1976), surgem como indicadores as contribuições de Graf (1979), sobre os canais fluviais, e de Ai e Miao (1987), sobre deslizamentos.

### **CONSIDERAÇÃO FINAL**

Ao focalizar as abordagens analítica em Geomorfológica pode-se salientar que as teorias cíclicas ainda não foram substituídas por concepção estruturada e satisfatória em seu conjunto. A concepção do equilíbrio dinâmico, enriquecida com as proposições probabilísticas e dos sistemas dissipativos, ainda Não foi plenamente trabalhado em Geomorfológica, embora muitos precípuos e conceitos já mostraram potencial de uso. As bases estão lançadas e as contribuições dispersas, mas, há ausência de concate nação semelhante ao que William Morris Davis fêz para a sua época.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASNERT, Frank (1987) Geomorphological Models. Catena Verlag, Cremligen (Catena N° 10).

AI N. S. e MIAO, T. D. (1987) A Model of progressive slope failure under the effect of the neotectonic stress field. In Geomorphological Models .(Ahnert, F. editor), p 12-29. Catena Verlag Cremlingen.

BERTALLANFY, L. von. (1950) an outline of the General System Theory. British Journal of Philosophical Science, 1: 134-165.

BERTALLANFY, L. von (1973) Teoria geral dos sistemas. Editora Vozes, Petrópolis.

CHORLEY, J. R. (1962) Geomorphology and general systems theory U. S. Geolo. Survey Prof. paper 500-B (Transcrito em Notícia Geomorfológica, 11 (21): 3-22, 1971).

CHORLEY, J. R. BECKINSALE, R. P. e DUNN, A. J, (1973) The History of the Study of Landforms (Vol 2 The life and work William Morris avis). Methuem & Co., Londres.

CHORLEY, R. J. e KENNEDY, B. A. (1971) Physical Geography: a systems approach. Prentice Hall, Englewood Cliffs.

CHORLEY, R. J., SCHUMM, S. A. e SUDGEN, D. E. (1985) Geomorphology, Methuen & Co., Londres.

CHRISTOFOLETTI Antonio (1977) Considerações sobre o nível de base, rupturas de declive, capturas fluviais e morfogênese do perfil longitudinal. Geografia, 2 (4): 81-102.

CHRISTOFOLETTI, Antonio (1981b) Geomorfológica Fluvial. Editora Edgar Blucher, São Paulo.

CULLING, W. E. H. (1965) Equifinality: chaos, dimensions and patterns. The concept of non-linear dynamical systems theory and their potential for Physical Geography. Geography Discussion Paper N° 19, Graduate School of Geography, London School of Economics, 83pp.

CULLING, W. E. H. (1987) Equifinality: modern approaches to dynamical systems and their potential for geographical thought. Trans. Institute of British Geographers, 12 (1): 57-72.

CULLING, W. E. H. (1988a) A unified theory of particulate flows in geomorphic settings. Earth Surface Processes and Landforms, 13(5): 431-440.

CULLING, W. E. H. (1988b) Dimension and entropy in the soil covered landscape. Earth Surface Processes and Landforms, 13: (7): 619-648.

CULLING, W. E. H. (1988c) A new view of the landscape. Trans of the Institute of British Geographers, 13(3): 345-360.

GILBERT, Grove K. (1877) The Geology of the Henry Mountains U. S. Department of the Interior, Washinton.

GRAF, William K. (1979) Catastrophe theory as a model for change in fluvial systems. In "Adjustments of the Fluvial Systems" (Rhodes, D.D. e Williams, G. p. editores), p13 a 32. George Allen & Unwin, Londres.

HACK, John T. (1957) Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. U. S. Geolo. Survey Prof. Paper, N° 294-B, Washinton.

HACK, John T (1960) Interpretation of erosional topography in humid temperate regions. American Journal of Science, vol. 258-A, pp. 80-97 (tradução in Notícia Geomorfológica, 12 (24: 3-7; 1972).

HACK, John T. (1965) Geomorphology of the Shenandoah Valley, Virginia and Maryland, and origin of the residual ore deposits. U. S. Geol. Survey Prof. paper, N° 484, Washinton.

HACK, John T. (1973) Stream-profile analysis and stream gradient index U. S. Geol. Survey Journal Research, 1(4): 421-429.

HACK, John T. (1975) Dynamic equilibrium and landscape evolution. In: Theories of Landform Development (Melhorn, W. N. e Flemal, R. C. editores), pg 87-102. Publications in Geomorphology, New York State University, Binghamton.

HAIGH, M. J. (1987) The holon: hierarch theory theory and landscape research. In: Geomorphological Models (Ahnert, F., organizador), p. 181-192. Cantena Verlag, Braunschweig.

HAIGH, M. J. e SCHWIDEGGER, A. E. (1988) Dynamic system approach to natural hazards: an introduction. Zeits, fur Geomorphologie, Suplemento N° 67, p 1-3, Berlim.

HAKEN, H. (1977) Synergetics: an introduction. Springer Verlag, Berlim.

HAKEN, H. (1984) The science of esturcture: synergetics. Van Nostrand Reinold. New York.

HAKEN, H. (1985) Synergetics an interdisciplinary approach to phenomena af selg-organization. Geoforum, 16 (2): 205-212.

HOWARD, Allan D. (1965) Geomorphological systems equilibrium and dynamics. American Juornal of Science, 263(4): 302-312.

HUGGETT, J. R. (1985) Earth Surface Systems. Springer Verlag, Berlim.

HUGGETT, J. R. (1987) Dissipative Systems: implications for Geomorphology Earth Surface Processes and Landforms, 13 (1): 45-49.

JANTSCH, e. (1980) The Self-Organizing Universe: Scientific and Human Implication of the Emerging Paradigm of Evolution. Pergamon Pres, Londres.

LANGBEIN, W. B. e LEOPOLD, L. B. (1966) River meanders –theory of minimum variance, U. S. Geol. Survey Prof. Paper, 422-L, Washinton.

LASZLO, E. (1972) The systems view of the world G. Braziler Inc., New York.

LASZLO, E. (1983) Systems Science and World Order Pergamon Press, Oxford.

LEOPOLD, L. B. e LANGBEIN, W. B. (1962) The concept of entropy in landscape evolution. U. S. Geol. Survey Prof. Paper, 500-A, Washinton.

NICOLIS, G. e PRIGOGINE, I. (1977) Self-organization in non-equilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations. Wiley & Sons, New York.



PRIGOGINE, I. (1947) Étude thermodynamique des phénomènes irréversibles. Donod, Paris.

PRIGOGINE, I (1980) From Being to Becoming: time and complexity in the Physical Sciences W. H. Freeman, San Francisco.

PRIGOGINE, Ilya e STENGERS, Isabelle. (1984b) A nova Aliança. Editora Universidade de Brasília, Brasília.

PRIGOGINE, Ilya e STENGERS, Isabelle. (1984b) Order out of Chaos: man's new dialogue with nature. Bantam Books, Londres.

RICHARDS, KEITH (1987) Rivers: environment, process and form. In River Channels (Richards, K editor) p, 1-13. Basil Blackwell, Oxford.

SCHEIDEGGER, Adrian E. (1964) Some Implications of statistical mechanics in Geomorphology. Bull. Int. Assoc. Scientific Hydrology, 9: 12-16.

SCHEIDEGGER, Adrian E. (1970). (1970) Theoretical Geomorphology. Springer Verlag, Berlin (2ª edição).

SCHEIDEGGER, Adrian E. e LANGBEIN, W. B. (1966) Probability concepts IN Geomorphology concepts in Geomorphology, U. S. Geol. Survey. Prof. Paper, N° 500-C.

THOM, René (1972) Stabilité structurale et morphogénese, Librairie Armand Colin, Paris.

THOM, René (1975) Structural stability and morphogenesis. W. A. Benjamin, Reading.

THOM, René (1988) Esquisse d'une sémiophysique. Interditions, Paris.

THORN, Colin E. (1982) Space and time in Geomorphology. George Allen & Unwin, Londres.

WAGSTAFF, J. M. (1976) Some Thoughts about Geography and Catastrophe theory, Area, 8: 316-320.

WILSON, A. G. (1981) Catastrophe Theory and Bifurcation. Croom Helm, Londres.

WOLDENBERG, MICHAEL J. (1985) Models in Geomorphology. George Allen & Unwin, Londres.