



Complexidade e Estabilidade em Sistemas Geomorfológicos: uma introdução ao tema

Complexity and stability in geomorphic systems: an introduction to the theme

Sérgio Henrique Vannucchi Lemes de Mattos¹, Archimedes Perez Filho²

¹ Mestrando do Programa de Pós Graduação em Geografia, Instituto de Geociências,
Universidade Estadual de Campinas.
sergio@ige.unicamp.br
Fone(19)3213-2513

² Orientador, Professor Titular do Departamento de Geografia, Instituto de Geociências,
Universidade Estadual de Campinas.
archi@ige.unicamp.br
Fone: (19)3788-4550 - 3788-4552

Resumo

O paradigma da complexidade permite a reinterpretação de conceitos clássicos da geomorfologia e a inclusão de novos conceitos provenientes de pesquisas sobre sistemas complexos em várias áreas do conhecimento, agregando-os em um arcabouço teórico comum que garante uma nova abordagem no estudo da evolução dos sistemas geomorfológicos. O objetivo do artigo é mostrar essa complexidade, especialmente no que se refere ao estudo da estabilidade desses sistemas. Inicialmente, são apresentadas as características e propriedades fundamentais dos sistemas complexos e discutidos os diferentes tipos de estabilidade que esses sistemas podem exibir. Os conceitos de estabilidade e equilíbrio são aqui tratados especificamente em relação aos sistemas geomorfológicos complexos e a bacia hidrográfica é usada como exemplo para ilustrar as implicações do paradigma da complexidade para estudo desses sistemas. A noção de estabilidade proposta nesse trabalho, entendida como a capacidade do sistema manter seu padrão de organização mesmo quando submetido a distúrbios ambientais, amplia o significado do conceito conforme normalmente este é empregado na geomorfologia. A estabilidade é uma propriedade do sistema como um todo e o auto-ajuste entre os elementos do sistema é um mecanismo que garante a preservação de sua organização e, portanto, sua estabilidade; porém, o auto-ajuste em si não é a estabilidade. O entendimento de que a organização dos sistemas complexos surge do jogo entre ordem e desordem permite compreender que sua estabilidade é relativa e dinâmica e que a evolução desses sistemas comporta elementos em diferentes estados (equilíbrio, desequilíbrio e não equilíbrio) que convivem e interagem nas várias escalas espaço-temporais. Assim, fenômenos contraditórios que acontecem durante a evolução da paisagem, antes vistos pela geomorfologia como excludentes, podem agora ser integrados em um arcabouço teórico comum, surgido da aplicação do paradigma da complexidade aos estudos dos sistemas geomorfológicos.

Palavras-chave: complexidade, estabilidade, sistemas geomorfológicos

Abstract

Complexity paradigm provides both the reinterpretation of classic geomorphic concepts and the inclusion of new concepts arisen from the studies of complex systems into a unified theoretical study about geomorphic systems evolution, specially when concerns its. First, the fundamental characteristics of complex systems and the types of stability that can exist in these systems are discussed. Then, the concepts of stability and equilibrium in regard to geomorphic systems are debated. Drainage basin is used as an illustrative example to show the implications of complexity paradigm ideas for geomorphology. Concept of stability as defined in this work broaden the meaning of the classical geomorphic concept of stability. Here, stability is see as the ability of systems to preserve his organizational pattern, even if the system is disturbed. Adjustments between system's components is just a mechanism that ensures the conservation of organizational pattern and, consequently, the conservation of his stability; but self-regulation *per se* is not stability. Understanding that the organization of complex systems occurs

by the interplay between order and disorder principles which permits the comprehension that stability is relative and dynamic. Moreover, it also permits to comprehend the evolution of geomorphic systems as a mosaic of landforms in different states (in equilibrium, disequilibrium, and nonequilibrium), coexisting and interacting in several spatial and temporal scales. In this way, contradictory phenomena in landscape evolution, before seen as excludents, now can be interpreted into a common framework provide by the application of complexity theory in studies of the geomorphic systems.

Key words: complexity, stability, geomorphic systems

Introdução

A complexidade é um paradigma que permite abordar os vários sistemas complexos existentes, desde os sistemas físicos até os sociais, a partir de um arcabouço teórico único (Morin, 1977). Embora muitos conceitos e perspectivas empregados amplamente na geomorfologia se enquadrem no paradigma da complexidade, esse ainda apresenta o potencial de revolucionar o estudo dos sistemas geomorfológicos ao integrar idéias e conceitos que antes eram vistos pelos geomorfólogos como excludentes e que, por isso, dificultavam o entendimento dos mecanismos envolvidos na evolução da paisagem (Phillips, 1992b).

Esse trabalho apresenta inicialmente uma breve exposição a respeito das principais características que permitem identificar um sistema como complexo e discute o conceito de estabilidade nesse tipo de sistema. Com base nessas reflexões, debate-se as noções de equilíbrio e estabilidade nos sistemas geomorfológicos conforme normalmente são utilizadas na geomorfologia e sugere-se as adequações necessárias para incorporá-las à abordagem complexa. Finaliza-se o artigo usando a bacia hidrográfica como exemplo de sistema geomorfológico complexo que permite ilustrar a aplicação das idéias apresentadas.

Caracterização dos sistemas complexos

Um sistema pode ser definido como um todo organizado composto de elementos que se inter-relacionam. A idéia de sistema só ganha sentido se forem considerados conjuntamente esses três conceitos: todo, partes e interrelação. A simples interação entre elementos não forma um sistema se não forem capaz de criar algo que funcione como um todo integrado. Por outro lado, não é possível compreender totalmente esse todo se não entendermos quais são suas partes e como elas se inter-relacionam.

Os sistemas complexos apresentam algumas peculiaridades que permitem distingui-los de outros sistemas. Entre essas características, aquelas de maior interesse para o contexto desse trabalho são:

- *não-linearidade e realimentação*: os elementos que compõem um sistema complexo interagem de maneira não-linear, o que leva à

criação de laços de realimentação negativos e positivos que controlam os estados do sistema. Como não há apenas relações de causa-efeito entre os elementos, a resposta do sistema a uma dada perturbação do ambiente é, via de regra, desproporcional à magnitude dessa perturbação: a existência de mecanismos de retroalimentação negativa garante uma minimização dos efeitos provocados por essa perturbação, enquanto circuitos de realimentação positiva levam à ampliação desses efeitos (exemplos dos dois tipos mecanismos de realimentação em sistemas geomorfológicos são apresentados por Chirstofoletti (1980:5-6). A não linearidade e os mecanismos de retroalimentação são duas das principais características que fazem com que os sistemas geomorfológicos apresentem comportamentos complexos (Phillips, 1992a). Os dois conceitos estão também intimamente relacionados às idéias de equilíbrio e estabilidade nos sistemas geomorfológicos complexos, conforme será discutido adiante.

- *o todo é diferente da soma de suas partes*: a interrelação entre os elementos de uma propicia o surgimento de novas características que inexistiriam caso estes elementos fossem considerados isoladamente. São as chamadas propriedades emergentes, das quais deriva o famoso enunciado de que “o todo é superior à soma de suas partes”. Por outro lado, restrições são impostas aos elementos para garantir a organização do sistema: nem todas as potencialidades que os elementos poderiam exibir isoladamente são exercidas quando eles estão agrupados e interagindo para formar um sistema; da mesma forma, apenas uma parte de todas as ligações e arranjos possíveis entre os elementos é realizada dentro de um sistema. Essas limitações impostas pela organização do sistema, que, para garantir o funcionamento do todo restringe, as qualidades das partes e as potencialidades presentes no sistema, levam a um enunciado menos conhecido: “o todo é inferior a soma de suas partes” (Morin, 1977). Esses dois conceitos complementares e concomitantes mostram a inadequação de uma abordagem estritamente analítica para se estudar os sistemas complexos. Embora a análise isolada de cada parte constituinte do sistema possa fornecer informações interessantes, o entendimento da estrutura e funcionamento do sistema não é

possível sem que se estude as interações entre os elementos e a organização do sistema como um todo.

- *aninhamento hierárquico*: quando nos referimos aos elementos que compõem um sistema, na verdade não estamos falando de objetos, mas sim de sistemas de um nível hierárquico menor, ou seja, subsistemas. Assim, um sistema é formado por subsistemas, ao mesmo tempo que integra outros sistemas de níveis hierárquicos maiores. Os sistemas complexos se organizam hierarquicamente de uma forma aninhada: há sistemas dentro de sistemas dentro de sistemas... Por conta desse tipo de organização, a questão da escala torna-se fundamental para o estudo da estabilidade nos sistemas complexos: a instabilidade num subsistema pode representar apenas uma pequena flutuação no sistema do qual faz parte; de maneira inversa, um sistema que esteja passando por um período de instabilidade ainda assim pode apresentar “núcleos de resistência”, isto é, subsistemas que conservam sua estabilidade, a despeito da instabilidade num sistema maior ao qual estão integrados. O aninhamento hierárquico dos sistemas é bastante conhecido pelos geomorfólogos: a bacia hidrográfica é um exemplo clássico dessa forma de organização dos sistemas, em que bacias de menor ordem se constituem em sub-bacias hidrográficas das bacias de maior ordem hierárquica.

- *atratores e repulsores*: a evolução de um sistema complexo pode ser graficamente representada no chamado “espaço de fase”, que consiste de um gráfico n-dimensional no qual cada eixo representa uma variável do sistema. Medindo-se essas variáveis ao longo do tempo e colocando os dados nesse gráfico, descreve-se uma trajetória que representa a tendência de evolução do sistema: as regiões do gráfico onde os resultados se concentram representam os atratores do sistema, enquanto que os repulsores são as regiões das quais os sistemas tendem a “fugir” durante sua evolução. A área de influência de um determinado atrator no espaço de fase é denominada bacia ou domínio de atração. Conforme será discutido mais adiante, os atratores podem ser entendidos como aquele estado no qual o sistema se encontra estável (Phillips, 1992b).

- *sistemas abertos e afastados do equilíbrio termodinâmico*: os sistemas complexos são sistemas abertos, pois estão continuamente trocando energia e matéria com seu ambiente externo. Mas, ao contrário de outros tipos de sistemas abertos, os sistemas complexos conseguem manter-se num estado afastado do equilíbrio termodinâmico (também conhecido como estado de não-equilíbrio): recebem fluxos de energia do ambiente e mesmo assim conseguem se manter com um baixo nível de entropia interna ao longo de sua evolução. A auto-organização deste sistemas (discutida no item seguinte) permite o surgimento de estruturas dissipativas, que expulsam a entropia do interior do sistema ao mesmo tempo em que usam a energia captada de ambiente para aumentar sua organização.

- *auto-organização*: organização é um conceito fundamental para se entender os sistemas complexos e, conseqüentemente sua estabilidade. A

complexos e, conseqüentemente sua estabilidade. A organização do sistema e a dinâmica que garante a estruturação e o funcionamento do sistema como um todo integrado. É ela quem dita como os elementos se dispõem e se inter-relacionam em função do todo. E é da própria interação entre os elementos que, espontaneamente (i.e., sem influências externas ao sistema), essa organização surge. Esta auto-organização aparece a partir do jogo entre ordem e desordem (Morin, 1977).

Por apresentarem todas estas características fundamentais dos sistemas complexos, muitos sistemas geomorfológicos se enquadram dentro dessa categoria de sistemas.

Estabilidade nos sistemas complexos

A estabilidade dos sistemas complexos se expressa de diferentes formas, caracterizando assim diferentes tipos de estabilidade. Como existem tipos de estabilidade, pode-se questionar se faz sentido falar genericamente em estabilidade ou é preferível referir-se especificamente a cada um desses tipos para evitar as freqüentes confusões associadas ao uso do termo. Sem dúvidas, muitas das incongruências de resultados e divergências de conclusões entre aqueles que estudam “a” estabilidade nos sistemas complexos surgem porque, na verdade, eles estão tratando de diferentes tipos de estabilidade (Odenbaugh, 2001). A explicitação pelos pesquisadores sobre a qual tipo de estabilidade eles estão se referindo evitaria as muitas confusões e discordâncias que existem simplesmente pela falta de clareza e inadequação dos termos que são empregados.

✍ Ainda assim, a noção de estabilidade é útil para representar um caráter único dos sistemas complexos, o qual se manifesta de diferentes maneiras. “Estabilidade” é, desse modo, um conceito uno e múltiplo. Nas diversas formas em que se expressa, a estabilidade aponta a capacidade do sistema, mesmo quando submetido a distúrbios, manter seu padrão global de organização, seja no mesmo estado em que se encontra antes da perturbação ou em um outro estado. Embora os distúrbios possam provocar alterações estruturais e funcionais no sistema e ainda que haja constantes alterações em componentes e nos modos como os elementos se inter-relacionam, um sistema que consegue conservar uma certa coerência interna e preservar suas características fundamentais de organização ao longo de sua evolução pode ser considerado estável. A estabilidade significa a manutenção da identidade do sistema (Gondolo, 1999), e essa identidade é dada pelo seu padrão de organização (Capra, 1997). Assim, organização e estabilidade se reforçam mutuamente: o padrão de organização do sistema gera sua estabilidade e essa estabilidade mantém o padrão de organização. No entanto, a estabilidade não deve ser entendida como um estado no qual o sistema permanece estático, fixo, imóvel, como a palavra estabilidade poderia

sugerir (Capra, 1996). Essa estabilidade é relativa e dinâmica: nesse estado, o sistema esta em constante renovação e transformação (Gondolo, 1999). Os canais fluviais meândricos servem como exemplo da estabilidade, conforme definida neste trabalho, e demonstram o dinamismo que caracteriza esse estado: embora os atributos dos meandros de um canal possam mudar constantemente em função de ajustes às flutuações nas entradas, enquanto essa forma de organização do sistema permanecer, pode-se considerar o sistema como estável.

Uma das formas em que a estabilidade se manifesta é a resiliência (por alguns também chamada de elasticidade), definida como a capacidade de um sistema que foi perturbado retornar ao estado em que ele se encontra antes da perturbação ocorrer (Chistofolletti, 1999; Westman, 1978). Assim, noção de estabilidade de resiliência pressupõe que o distúrbio cause uma alteração temporária nos arranjos estruturais e funcionais do sistema, mas que depois de determinado período de tempo esses arranjos (expressos pelas variáveis do sistema) voltem a um condição bem próxima à que se encontravam antes do sistema ser perturbado. Se pensarmos no estado de estabilidade como sendo representado pelo atrator do sistema, a resiliência pode ser entendida como a capacidade do sistema retornar ao seu atrator após ter sua trajetória desviada dele por uma perturbação.

A estabilidade de resistência (também denominada de inércia) pode ser interpretada como a capacidade do sistema permanecer "imune" às perturbações, isto é, sua capacidade do sistema permanecer "imune" às perturbações. Isto é, sua capacidade de manter inalterados seus arranjos estruturais e funcionais frente aos distúrbios ambientais (Christofolletti, 1999; Westman, 1978). Novamente, se for feita a analogia da estabilidade com a idéia de atrator, a resistência representa a capacidade do sistema, quando perturbado, de permanecer com sua trajetória evolutiva praticamente inalterada dentro de seu atrator.

Os sistemas com estabilidade de resistência apresentam um comportamento mais rígido, do tipo "tudo ou nada", em reação aos distúrbios; já os sistemas têm uma maior flexibilidade comportamental, podendo apresentar respostas adaptativas frente às perturbações.

Cabe ainda destacar que as estabilidades de resistência e resiliência não expressam capacidade absolutas dos sistemas: um sistema é resistente ou resiliente dentro de determinada amplitude de variação (Christofolletti, 1999). Os mecanismos de realimentação negativa, os quais garantem esses tipos de estabilidade aos sistemas, são efetivos até um limite crítico. Ultrapassando esse limiar, o sistema não é mais capaz de retornar ao seu estado pré-perturbado (no caso de estabilidade de resiliência) ou de resistir imune às perturbações (se a estabilidade é de resistência).

Quando isso ocorre, o sistema passa por

um novo estágio de evolução (que será discutido mais adiante). Considerando mais uma vez a idéia de atrator, esse limiar crítico, além do qual se perde a capacidade de resiliência ou resistência seria representado pelos limites da bacia de atração, quando uma vez ultrapassados, o atrator deixaria de exercer sua influência e o sistema não conseguiria mais retornar a esse estado (a não ser que durante sua trajetória evolutiva ele volte a passar dentro do domínio de atração desse atrator). A existência de limiares é fundamental para se entender as respostas dos sistemas geomorfológicos às perturbações do ambiente (Phillips, 1992; Renwick, 1992). A sensibilidade da paisagem definida como a relação entre a magnitude de uma mudança e a magnitude de resposta do sistema a essa mudança, esta diretamente relacionada a existência de limiares (Thomas, 2001); quanto menores os limiares de um sistema, maior sua sensibilidade às perturbações e, conseqüentemente, maior probabilidade dele sair de seu estado de estabilidade.

Outra ressalva que deve ser feita é que a capacidade de um sistema se manter em um estado de estabilidade (seja em relação à resiliência ou à resistência) se altera com o passar do tempo. A própria dinâmica de interações do sistema faz com que, durante sua trajetória evolutiva, haja continuamente modificações na forma e tamanho da bacia de atração (Clark et al., 1995). Assim, conforme o sistema vai sucessivamente sofrendo perturbações, há uma tendência de diminuição gradativa no tamanho da bacia de atração, ou seja, o sistema torna-se mais suscetível de sair de seu estado de estabilidade quando perturbado (Scheffer et al., 2001).

Além da resiliência e da resistência, um outro tipo de estabilidade que pode existir nos sistemas complexos é aquela denominada de multiestabilidade ou estabilidade múltipla (Clark et al., 1995). A idéia de multiestabilidade é aplicada no caso dos sistemas que possuem estados alternativos de estabilidade, podendo oscilar entre um e outro ao longo do tempo. Na multiestabilidade, o sistema possui dois ou mais atratores todos representando estados estáveis, porém distintos uns dos outros quando um distúrbio pode ser capaz de deslocar o sistema de uma bacia de atração para outra (Scheffer et al., 2001). No entanto, para o sistema retornar a um estado de estabilidade, a simples volta das condições ambientais existentes antes do momento em que ele foi deslocado para outro atrator pode não ser suficiente.

Essa propriedade dos sistemas complexos com estados alternativos de estabilidade e conhecida como histerese (Westman, 1978), onde a trajetória de ida de um atrator para outro pode diferir da trajetória de volta. Em muitos casos de sistemas com

estabilidade múltipla, o distúrbio que leva à mudança de um estado para outro tem origem dentro do próprio sistema. A existência de estados alternativos de estabilidade tem sido demonstrada, por exemplo, nos desertos de Sahel e do Saara, nos quais as interações entre vegetação e clima levam à alternância entre períodos secos e úmidos (Scheffer et al., 2001).

Depois de apresentados e discutidos esses três tipos de estabilidade (resistência, resiliência e multiestabilidade) resta saber o que acontece a um sistema complexo se um distúrbio fizer com que ele ultrapasse seu limiar de resistência ou de resiliência e não existirem estados alternativos de estabilidade pelos quais o sistema já tenha passado anteriormente.

Segundo teorias, modelos e experimentos sobre sistemas em diferentes áreas do conhecimento, essa superação do limiar de estabilidade levará o sistema a um estado de instabilidade momentânea. Se em tal estado de instabilidade não for prejudicada totalmente sua capacidade de auto-organização do sistema, haverá um processo de readaptação organizacional em relação às novas condições ambientais (refletindo-se em arranjos estruturais e funcionais) e este poderá atingir um novo estado de estabilidade que ainda não havia experimentado ao longo de sua evolução (ou seja, encontrará um novo atrator). O desencadeamento dessa evolução “estabilidade/ instabilidade/ nova estabilidade” ocorre pela ampliação dos efeitos de determinado distúrbio pelos mecanismos de retroalimentação positiva do sistema. O aumento da instabilidade em determinados subsistemas, gerado pela ampliação do distúrbio, força o sistema a compensá-lo com o aumento da estabilidade nos seus níveis mais elevados de organização (Trofimov & Phillips, 1992). Desse modo, a organização e evolução dos sistemas complexos depende não apenas da ordem, mas também da desordem trazida pelos distúrbios: a desordem não tem apenas um papel destruidor, mas é também fonte de criação ao propiciar a evolução do sistema para um novo estado de estabilidade. Assim, segundo o paradigma da complexidade, a organização de um sistema surge da interação entre ordem e desordem (Morin, 1977).

Dos quatro tipos de estabilidade: resistência, resiliência, multiestabilidade e estabilidade/ instabilidade/ nova estabilidade - somente os dois primeiros são mutuamente exclusivos, isto é dificilmente os sistemas complexos desenvolvem essas capacidades ao mesmo tempo (Odum, 1986). Fora isso, todas as combinações são possíveis: um sistema pode ser resiliente e apresentar estados alternativos de estabilidade; um sistema pode ser resistente, mas ser atingido por um distúrbio que o obrigue a se readaptar e encontrar um novo estado estável, etc.

A discussão sobre estabilidade nos sistemas complexos tem recebido recentemente muitas contribuições e inovações da nova teoria da criticidade auto-organizada. Segundo essa teoria, alguns sistemas complexos tender a evoluir para um estado crítico de estabilidade, isto é “às margens” de

seu limiar de estabilidade. Nesse estado, não há dependência de escala e uma perturbação de qualquer magnitude pode romper sua estabilidade. No entanto, como são necessários mais estudos sobre essa teoria pelos autores deste artigo, assim as consequências dessa teoria para a noção de estabilidade nos sistemas complexos não serão debatidas aqui. Maiores detalhes sobre essa teoria podem ser encontrados em Chistofolletti (1999) e uma aplicação da teoria à geomorfologia é apresentada por Hegarten & Neugebauer (1998).

Estabilidade e equilíbrio nos sistemas geomorfológicos complexos

Na geomorfologia, o termo estabilidade é empregado geralmente para se referir a componentes específicos da paisagem (e.g., estabilidade de encostas) e não tanto para caracterizar um estado do sistema como um todo. No sentido do termo estabilidade, conforme definido nesse artigo, tendo como base o paradigma da complexidade, a noção da geomorfologia que mais se aproxima desse conceito é a do equilíbrio. Ao tentar aplicar o paradigma da complexidade à geomorfologia, objetivo deste trabalho, o uso do termo equilíbrio, consagrado na geomorfologia, pode trazer confusões com a noção vinda da termodinâmica de que os sistemas complexos se mantêm em um estado de não-equilíbrio termodinâmico: esses sistemas poderiam estar na contraditória situação de, ao mesmo tempo, estarem em equilíbrio (no sentido de estabilidade) e afastados do equilíbrio (no sentido termodinâmico). Essas inconsistências entre os usos do termo equilíbrio na geomorfologia com o conceito de equilíbrio da termodinâmica e da matemática foi o que levou Montgomery a propor sua substituição pelo termo “estabilidade dinâmica” (Montgomery, 1989 *apud* Phillips, 1992 a). Porém, como o termo equilíbrio tem longa tradição na geomorfologia, nessa discussão sobre a aplicação do paradigma da complexidade da geomorfologia continuaremos a usar “equilíbrio” ao invés do termo estabilidade, que seria mais adequado para nossos fins.

A noção de equilíbrio embora largamente usada em geomorfologia, quase nunca é claramente definida por aqueles que a utilizam (Phillips, 1992 b). Ela se difundiu com a teoria do equilíbrio dinâmico, proposta como uma alternativa ao modelo davisiano para explicar a evolução do relevo (Marques, 1998). Esse equilíbrio seria representado por um equacionamento das entradas e saídas de energia e matéria no sistema, garantido por um contínuo auto-ajuste entre os elementos do sistema geomorfológico. Entendendo os sistemas geomorfológicos como sistemas “processos-respostas”, as alterações nas entradas e/ou processos seriam proporcionalmente compensadas por ajustes nas formas do sistema,

de tal modo que ele se manteria em um estado de contínua auto-regulação (“steady state”) independente do tempo (Chistofolletti, 1979). Assim, a estabilidade nos sistemas geomorfológicos seria representada por esse estado de auto-ajuste, mantido pela existência de laços de realimentação (Chistofolletti, 1999).

Principalmente devido às contribuições para a geomorfologia da abordagem sistêmica e da teoria dos sistemas dinâmicos complexos, recentemente tem-se discutido a adequação em se estudar os sistemas geomorfológicos somente pelas perspectivas do equilíbrio (ver, por exemplo, edição especial da revista “Geomorphology”, artigo de Phillips & Renwick, 1992, que se dedica a essa discussão). A questão fundamental que se coloca é se o equilíbrio predominaria na paisagem ou se seria apenas propriedade de alguns de seus elementos, que coexistiram com outros elementos em estados de desequilíbrio e não-equilíbrio. A tendência atual dos geomorfólogos vai em direção à segunda alternativa: compreender a paisagem como um mosaico em que componentes em equilíbrio, desequilíbrio e não equilíbrio convivem e interagem, levando o sistema a comportamentos complexos, inclusive caóticos (Renwick, 1992).

Na discussão sobre o equilíbrio nos sistemas geomorfológicos, é preciso também atentar para a existência de dois tipos de equilíbrio: aquele que existe em função da inter-relacionam dos elementos e outro relacionado à evolução do sistema como um todo. É o que Renwick (1992) diferencia como um equilíbrio que é uma propriedade funcional do sistema e outro equilíbrio que diz respeito ao comportamento do relevo: ao mesmo tempo em que os elementos da paisagem podem caminhar em direção ao equilíbrio, podem também sofrer mudanças progressivas relevantes se ocorrerem alterações nas entradas do sistema. Ou seja, pode haver um constante auto-ajuste entres os elementos e/ou processos do sistema e destes com as entradas, enquanto o sistema evolui em função de alterações ambientais, resultando em mudanças funcionais e, principalmente, estruturais (i.e., nas formas) no sistema como um todo.

Embora na geomorfologia o termo estabilidade esteja diretamente associado a essa idéia de auto-ajuste, a noção de estabilidade conforme definida neste trabalho é mais abrangente e está ligada ao entendimento da evolução do sistema como um todo e não apenas da interação entre seus elementos. A auto-regulação entre os elementos de um sistema geomorfológico é uma maneira dele preservar seu padrão de organização e se manter estável, mas esse auto-ajuste não é a estabilidade em si. A estabilidade do sistema é a própria capacidade que ele tem de manter sua organização global, ainda que haja constantes alterações nas condições ambientais e renovações e transformações nos elementos componentes do sistema e em suas interações (expressas em mudanças nas formas e/ou processos). Portanto, uma estabilidade é relativa e dinâmica, característica da evolução dos sistemas

geomorfológicos complexos, em que: (1) estados estáveis se alternam, no tempo e no espaço, com estados de instabilidade; (2) ocorre mesmo se houver elementos instáveis e em não- equilíbrio; (3) as alterações/perturbações ambientais não são “ruídos externos” e sim fatores fundamentais na evolução do sistema.

Por último, vale ressaltar a importância das escalas espacial e temporal ao se estudar estabilidade/equilíbrio nos sistemas geomorfológicos entendidos como complexos. Em um mesmo sistema, podem coexistir componentes que se apresentam em diferentes estados em relação ao equilíbrio: há aqueles que estão em equilíbrio; há os que caminham para o equilíbrio, mas que não houve tempo suficiente para atingi-lo (estão em um estado de não-equilíbrio) (Renwick, 1992). Além disso, como os componentes de um sistema podem diferir entre si quanto à sensibilidade às alterações ambientais; uma mesma perturbação pode levar esses elementos a terem diferentes respostas (Thomas, 2000), de modo que os de menor sensibilidade permanecem estáveis, enquanto os mais sensíveis tornam-se instáveis. Essa instabilidade em alguns elementos pode se propagar e tornar o sistema instável (Thomas, 2000), ou então ser compensada com o aumento da organização nos níveis hierárquicos superiores (Trofimov & Phillips, 1992), aumentando a estabilidade do sistema. Por tudo isso, as conclusões sobre a estabilidade ou não de um sistema geomorfológico dependem da escala espacial escolhida: instabilidades em um subsistema podem representar simples flutuações que não alteram o estado de estabilidade do sistema maior no qual esse subsistema está inserido; inversamente, alguns subsistemas podem permanecer estáveis enquanto o sistema passa por um período de instabilidade.

Da mesma forma, a escala temporal considerada, também interfere nas conclusões sobre estabilidade/equilíbrio. Uma das razões é que, durante a evolução dos sistemas geomorfológicos, ajustes às alterações atuais sobrepõem-se aos ajustes que ainda estão ocorrendo no sistema em função de mudanças ambientais passadas (Renwick, 1992). Outra razão é que as respostas do sistema às mudanças ambientais não são imediatas: a estabilidade do sistema quando submetido a um distúrbio depende do “tempo de reação” (intervalo entre uma perturbação e o início da resposta do sistema) e do “tempo de relaxamento” (tempo necessário para o sistema retornar ao equilíbrio) (Chistofolletti, 1999). Se o recorte temporal feito no estudo da evolução de um sistema geomorfológico abranger apenas um intervalo de tempo restrito aos tempos de reação e/ou relaxamento, pode-se chegar à conclusão que o sistema é instável. No entanto, uma escala de tempo maior mostraria que essa instabilidade é momentânea e que representaria um período no

qual o sistema estaria se reajustando para retornar a um estado estável.

Devido ao comportamento dos sistemas geomorfológicos ter essa natureza multi-escalar, os estudos e modelos a respeito da evolução desses sistemas devem considerar, simultaneamente, fenômenos que ocorrem em diferentes escalas espaço-temporais e que, portanto, podem ter efeitos contraditórios. Assim, foge-se de uma visão da evolução centrada somente no equilíbrio e compreende-se que a estabilidade dos sistemas geomorfológicos comporta também instabilidades e não-equilíbrio em seus componentes, como é típico na evolução dos sistemas complexos.

Bacia hidrográfica: um exemplo de sistema geomorfológico complexo

A bacia hidrográfica pode ser considerada como um exemplo de sistema geomorfológico complexo, por apresentar todas as características inerentes a esse tipo de sistema, como destacadas no início do artigo.

A bacia é um sistema aberto aos fluxos de energia e matéria: as entradas do sistema são representadas pela precipitação e forças tectônicas subjacentes e as saídas pela perda de água, sedimentos e materiais solúveis (Coelho Netto, 1998).

O aninhamento hierárquico, outra característica básica dos sistemas complexos, é bastante evidente e conhecido na bacia hidrográfica, onde bacias de menor ordem hierárquica se constituem em sub-bacias de bacias de nível hierárquico superior.

Vista como uma unidade organizada complexa (Morin, 1977), a bacia hidrográfica é formada por subsistemas, de cujas interações resulta a organização do sistema como um todo integrado. A delimitação desses subsistemas varia em função dos objetivos de cada estudo, sob uma perspectiva funcional, a bacia pode ser, por exemplo, subdividida nas zonas de produção, transferência e deposição. (Schumm, 1977), cada qual representando um subsistema. Já em um enfoque mais voltado à estrutura morfológica, os dois subsistemas identificados são vertentes e canais fluviais.

Independente da maneira escolhida para a identificação dos subsistemas, o importante é perceber que a bacia hidrográfica não pode ser entendida pelo estudo isolado de cada um de seus componentes: sua estrutura, funcionamento e organização são decorrentes das inter-relações desses elementos, de modo que o todo resultante não é resultado da soma da estrutura, funcionamento e organização de suas partes. Analisar separadamente os processos que ocorrem nas vertentes e aqueles que acontecem nos canais fluviais não permite compreender como o sistema bacia hidrográfica funciona enquanto unidade organizada complexa.

A existência de interações não-lineares entre os componentes da bacia hidrográfica é um dos fatores que fazem com que esse sistema não se

restringa a ser um simples somatório de suas partes constituintes. Dessas não-linearidades surgem mecanismos de realimentação, os quais estão diretamente envolvidos nos processos de auto-ajuste, estabilidade e evolução da bacia hidrográfica. Um exemplo de mecanismos de realimentação na bacia pode ser visto quando há um aumento no volume de entrada de água no sistema: em decorrência desse aumento de volume, haverá um aumento na velocidade da água no canal fluvial, ocasionando um aumento na taxa de erosão e, conseqüentemente, um alargamento do canal (realimentações positivas); o aumento da largura do canal, por sua vez, causará uma diminuição na velocidade da água (realimentação negativa), levando o sistema a se reajustar às novas condições de fluxo (Christofletti, 1980).

Em relação aos conceitos de equilíbrio e estabilidade, o estudo das bacias hidrográficas em geomorfologia representa uma das áreas em que esses conceitos são mais amplamente empregados e discutidos. Exemplos dos diferentes tipos de estabilidade discutidos nesse artigo podem ser facilmente encontrados na literatura.

Werritty & Leys (2001), por exemplo, mostraram que os rios da Escócia têm comportamentos “robustos”, isto é, foram pouco sensíveis às mudanças ambientais ocorridas nos últimos 300 anos. Esse tipo de comportamento pode ser entendido como uma estabilidade de resistência, em que os sistemas permaneceram relativamente imunes às perturbações, embora os rios tenham se mantido ativos e alterações locais tenham ocorrido.

Já Knox (1972,) estudando a evolução da bacia hidrográfica em função de mudanças no regime de precipitação, dá um exemplo da existência de estados alternativos de estabilidade nesse sistema geomorfológico. A alternância entre clima úmido e clima seco leva o sistema a ter um estado estável distinto para cada situação, ou seja, um atrator para cada tipo de clima, separados por um curto período de instabilidade em que há os reajustes necessários para as condições seguintes.

O trabalho de Osterkamp (1979, *apud* Christofletti, 1999) sobre as relações de ajuste entre largura do canal e débito fluvial é bastante adequado à existência em bacias hidrográficas da estabilidade de resiliência e da evolução estabilidade/instabilidade/nova estabilidade, embora esse não seja o enfoque dado pelo autor. A largura mínima do canal expressa um ajuste ao valor do débito fluvial médio e uma enchente altamente erosiva pode levar a um desajuste momentâneo, passando a prevalecer às condições de canal anastomosado. No entanto, conforme vai havendo deposição de material sedimentar fino, o sistema pode retornar às condições de equilíbrio em que há ajuste entre a largura do canal e o débito fluvial. Esse comportamento pode ser entendido como resiliente, já que o distúrbio (enchente)

causa alterações temporais nos arranjos funcionais e estruturais do sistema, mas depois ele volta para o estado em que se encontrava antes do distúrbio. Porém, a ocorrência de outra enchente ainda no período em que o sistema está se reajustando pode causar o alargamento do canal, pois a vegetação ripária ainda não atingiu a maturidade e não pode proteger as margens da erosão. Nesse caso, a estabilidade é rompida e o sistema tende a caminhar para um novo padrão de organização e, conseqüentemente, a um novo estado estável ajustado às novas condições, caracterizando a evolução estabilidade/instabilidade/nova estabilidade.

Pelos exemplos apresentados, pode-se depreender que nos estudos das bacias hidrográficas já há uma longa tradição no uso de conceitos e abordagens que são comuns ao paradigma da complexidade. Assim, a inclusão na geomorfologia das idéias vindas desse paradigma representam não uma revolução, mas sim uma evolução de conceitos e abordagens, conforme aponta Phillips (1992 b). Contudo, segundo esse mesmo autor, o potencial revolucionário na aplicação do paradigma da complexidade na geomorfologia está no fato de que fenômenos e abordagens antes consideradas excludentes podem ser incorporadas em um arcabouço teórico único, o qual permite a ampliação de nosso entendimento a respeito da evolução dos sistemas geomorfológicos.

No caso específico dos estudos sobre estabilidade nos sistemas geomorfológicos, esse arcabouço teórico comum permite compreender como é possível, na evolução de um único sistema, a coexistência temporal e espacial de estabilidade/instabilidades e equilíbrios/desequilíbrios/não-equilíbrios. Compreende-se que os distúrbios não são “ruídos externos” que atrapalham o funcionamento do sistema; eles fazem parte da dinâmica do sistema e têm papel fundamental ao trazer, às custas de instabilidades momentâneas, a novidade e a inovação na organização do sistema. E essa interação entre ordem e desordem acontece não só na relação do sistema com seu ambiente, mas também no interior do próprio sistema, em que elementos em equilíbrio, desequilíbrio e não equilíbrio convivem e interagem em diferentes escalas espaço- temporais.

Nessa aparente confusão, a estabilidade surge como a capacidade do sistema manter seu padrão de organização, organização esta surgida do jogo entre ordem e desordem, princípios antagônicos e complementares que governam os sistemas complexos.

Referências Bibliográficas

- Capra, F. (1996) O ponto de mutação. Cutrix, 447p.
- Christofolletti, A (1979) Análise de sistemas em geografia. Hucitec, 106p.
- Christofolletti, A. (1980) Geomorfologia. Edgard Blucher, 188p.
- Christofolletti, A (1999) Modelagem de sistemas ambientais. Edgard Blucher, 236p.
- Clark, N; Perez-Tejo, F., Alen, P (1995) The nature of Systems. In Evolutionary dynamics and sustainable development: a systems approach. Edward Elgar, Aldershor: 19-41.
- Coelho Neto, A.L. (1998) Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A J.T. e CUNHA, S.B. (org) Geomorfologia; uma atualização de bases e conceitos. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 3 ed.: 93.148.
- Gondolo, G.C.F. (1999) Desafios de um sistema complexo à gestão ambiental: bacia do Guarapiranga, região metropolitana de São Paulo, Annablume, 162p.
- Hegarten, S., Neugenbauer, H.J. (1998) Self-organized in a landslide model. *Geophysical Research Letter*, 25(6):801-804.
- Marques, J.S. (1998) Ciência geomorfológica. In GUERRA, A J.T. E CUNHA, S.B. (org) Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Bertrand Brasi. Rio de Janeiro, 3 ed.: 23.-50
- Morin, E. (1970) O método I : a natureza da natureza. Europa América, 277p.
- Odenbaugh, J. (2001) Ecological stability, model building and environmental policy: a reply to some of the pessimism. *Philosophy of science*, 68:493-505.
- Odum, E. P. (1986) Ecologia, Guanabara, 434p.
- Phillips, J.D. (1992a). The end of equilibrium? *Geomorphology*, 5(3-5):195-201.
- Phillips, J.D. (1992b). Nonlinear dynamical in geomorphology: revolution or evolution? *Geomorphology*, 5(3-5): 219-229.
- Phillips, J.D. & Renwick, W.H. (ed) (1992) Geomorphic systems. *Geomorphology*, 5(3-5): 195-489.
- Renwick, W.H. (1992). Equilibrium, disequilibrium, and nonequilibrium in the landscape *Geomorphology*, 5 (3-5): 265-276.
- Scheffer, M, et al. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413:591-596.
- Thomas, M. F. (2001). Landscape sensitivity in time and space an introduction. *Catena*, 42: 83-98.
- Trofimov, A.M. & Phillips, J.D. (1992). Theoretical and methodological premises of geomorphological forecasting. *Geomorphology*, 5(3-5):203-211.
- User, M.B. (2001). Landscape Sensitivity: from teory to practice. *Catena*, 42 : 375-383.
- Westman, W. (1978). Measuring inertia and resilience of ecosystems. *Bioscience*, 28 (11): 705-710.
- Werritty, A. & Leys, K.F. (2001). The sensitivity rivers and upland valley floors to recent environmental. *Catena*, 42: 251-273.