Volume 6, 2022, e10651
ISSN: 2594-5033
Secão: Artigo original
http://periodicos2.uesb.br/index.php/geo
https://doi.org/10.22481/rg.v6.e2022.e10651

Sistemas geomorfológicos dinâmicos não-lineares: Uma revisão

Nonlinear dynamic geomorphological systems: A review

Sistemas geomorfológicos dinámicos nolineales: Una revisión

Matheus Silveira de Queiroz [1] https://orcid.org/0000-0001-8722-7715

José Alberto Lima de Carvalho [2] https://orcid.org/0000-0002-5154-0029

[1] Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, Amazonas, Brasil, matheussilveiradequeiroz@gmail.com
[2] Universidade Federal do Amazonas - UFAM Manaus, Amazonas, Brasil, albertogeografo@gmail.com

Recebido em: 18/05/2022
Aceito para publicação em: 30/10/2022

Resumo

A ciência da complexidade apresentou uma proposta de ruptura paradigmática no meio científico. Entre outros avanços sua maior contribuição é na compreensão dos sistemas dinâmicos não-lineares, que predominam na natureza, revolucionando assim o conceito e análise dos sistemas físicos. Várias teorias da complexidade podem ser aplicadas à análise do relevo, sob a ótica dos sistemas não-lineares, e este paradigma possui potencial de revolucionar os estudos dos sistemas morfológicos, além de integrar diversos tópicos que antes eram analisados isoladamente. Neste trabalho, apresenta-se os conceitos das Estruturas Dissipativas, Teoria do Caos, Teoria das Catástrofes e Geometria Fractal, buscando correlacionar com análise dos sistemas geomorfológicos dinâmicos não-lineares sustentando-se que essas teorias possuem potencial teórico-metodológico plenamente aplicáveis em estudos de geomorfologia.

Palavras-chave: Estruturas Dissipativas; Teoria do Caos; Teoria das Catástrofes, Geometria Fractal; Sistemas Geomorfológicos Dinâmicos Não-Lineares.

Abstract

The complexity science presented a proposal for a paradigmatic rupture in the scientific environment. Among other advances, his greatest contribution is in the understanding of non-linear dynamic systems, which predominate in nature, thus revolutionizing the concept and analysis of physical systems. Several complexity theories can be applied to relief analysis, from the perspective of non-linear systems, and this paradigm has the potential to revolutionize the studies of morphological systems, in addition to integrating several topics that were previously analyzed in isolation. In this work, the concepts of Dissipative Structures, Chaos Theory, Catastrophe

Theory and Fractal Geometry are presented, seeking to correlate with the analysis of non-linear dynamic geomorphological systems, sustaining that these theories have theoretical-methodological potential fully applicable in studies of geomorphology.

Keywords: Dissipative Structures; Chaos theory; Catastrophe Theory, Fractal Geometry; Nonlinear Dynamic Geomorphological Systems.

Resumen

La ciencia de la complejidad presentó una propuesta de ruptura paradigmática en el entorno científico. Entre otros avances, su mayor aporte está en la comprensión de los sistemas dinámicos no lineales, que predominan en la naturaleza, revolucionando así el concepto y análisis de los sistemas físicos. Varias teorías de la complejidad pueden aplicarse al análisis del relieve, desde la perspectiva de los sistemas no lineales, y este paradigma tiene el potencial de revolucionar los estudios de los sistemas morfológicos, además de integrar varios temas que antes se analizaban de forma aislada. En este trabajo se presentan los conceptos de Estructuras Disipativas, Teoría del Caos, Teoría de Catástrofes y Geometría Fractal, buscando correlacionar con el análisis de sistemas geomorfológicos dinámicos no lineales, sustentando que estas teorías tienen un potencial teórico-metodológico plenamente aplicable en estudios de geomorfología.

Palabras clave: Estructuras Disipativas; Teoría del caos; Teoría de Catástrofes, Geometría Fractal; Sistemas Geomorfológicos Dinámicos No Lineales.

Introdução

A complexidade é um paradigma abrange diversos sistemas, desde os físicos até os sociais, e analisá-los dentro do arcabouço teórico único (MORIN, 1970). Epistemologicamente, os conceitos da complexidade foram desenvolvidos principalmente por físicos e biólogos durante o século XX, demostrando como as certezas científicas simplificadoras do método cartesiano e suas variações, até então, unanimidade na academia, não conseguiam representar com confiabilidade os fenômenos complexos (FREEMAN, 2013).

Apesar dos termos "complexo" e "complexidade" serem amplamente utilizados tanto nas teorias científicas quanto no cotidiano, ainda não há um consenso sobre sua definição. A dificuldade para definir o que é complexo passa pela subjetividade do termo, variando dependendo do interlocutor. Em sistemas físicos e dinâmicos analisados sob a ótica da teoria geral dos sistemas o termo "complexidade" pode ser frequentemente referido ao "grau" em que os elementos dos sistemas interagem em organizações estruturadas (SIVAKUMAR, 2017).

Os estudos que utilizam os conceitos da complexidade (caos, fractais, estruturas dissipativas, catástrofes, dentre outros) para analisar fenômenos não-lineares estão sendo aplicados em diversas áreas da ciência, desde as ciências físicas até as ciências humanas, abrangendo da linguística à geomorfologia (BAAS, 2002). Vários conceitos da complexidade podem ser aplicados à análise do relevo e este paradigma possui potencial de revolucionar os estudos dos sistemas morfológicos, além de integrar diversos conceitos que antes eram analisados isoladamente (PHILLIPS, 1992).

A geomorfologia moderna, em sua base, desenvolveu um exercício de interpretação histórica morfodinâmica, a partir disso foram elaborados de diversos modelos de evolução da paisagem (ver GILBERT, 1877; DAVIS, 1899; STRAHLER, 1950; HACK, 1957, 1960, 1965; DUNNE, 1980; dentre outros). Porém, atualmente, os cientistas da geomorfologia estão aplicando um conjunto de técnicas e métodos transdisciplinares, que envolve os conceitos da complexidade, para melhor entender os processos superficiais da Terra, que é revolucionário e apresenta uma rápida expansão e melhorias, como, por exemplo, as imagens de satélite (MURRAY et al., 2009). Portanto, buscando contribuir para os estudos dos sistemas dinâmicos não-lineares aplicados à geomorfologia este trabalho tem como objetivo analisar conceitos da complexidade voltados para estudos do relevo.

Sistemas Dinâmicos Não-Lineares

Pode-se atribuir as primeiras noções de sistemas dinâmicos a Poincaré, que desenvolveu teoremas sobre estabilidade, instabilidade, pontos estáveis e conceitos em geral sobre tipos e soluções para sistemas dinâmicos, porém um sistema dinâmico não se compõe apenas de derivadas, mas de relações entre essas derivadas o que gerou o conceito de modelagem matemática no século XIX para explicar diversos fenômenos da natureza (BASTO; CARMO, 2013).

As teorias e modelos auto organizadores lidam com sistemas altamente complexos e envolvem milhares de reações químicas independentes. Para trabalhar com esses novos sistemas foi necessária uma atualização dos conceitos matemáticos para formar um arcabouço teórico-conceitual coerente com a enorme complexidade. Essa nova matemática de relações e padrões que é mais qualitativa que quantitativa é constantemente chamada de "a nova matemática da complexidade", ou, tecnicamente, de "teoria dos sistemas dinâmicos", "dinâmica dos sistemas", "dinâmica complexa" ou "dinâmica não-linear" (CAPRA, 1997).

Conceitos e técnicas matemáticas associadas a teoria dos sistemas dinâmicos não-lineares são utilizadas em praticamente todas as disciplinas científicas e, principalmente, durante a segunda metade do século XX, vêm sendo cada vez mais difundidas não apenas na comunidade acadêmica, como, também, no âmbito popular. Culling (1986) define sistemas dinâmicos pela correlação entre M, μ, ϕ: onde M é uma variedade, que é um espaço topológico, ou seja, um conjunto de elementos arbitrários no qual propriedades, como a continuidade, podem ser definidas, μ é uma medida e ϕ é um grupo de transformações de um parâmetro.

Em sistemas dinâmicos não-lineares a relação de causa e efeito não é proporcional e determinada, ou seja, é vaga e difícil de classificar. Esses sistemas podem ser caracterizados por períodos de interações não-lineares e lineares entre as variáveis do sistema. Logo, o sistema pode apresentar um comportamento linear durante algum período, porém as relações entre as variáveis podem mudar, resultando em mudanças estruturais e comportamentais dramáticas no sistema (SIVAKUMAR, 2017).

Os estudos indicam três tipos de comportamento temporal para sistemas não-lineares que podem ocorrer intermitentemente ao longo da “vida” do sistema: o primeiro é a estabilidade (equilíbrio matemático ou ponto fixo); o segundo é oscilação entre pontos matemáticos de maneira estável; e o terceiro é aparentemente aleatório, sem padrão (com comportamento não periódico) onde a incerteza domina e a previsibilidade é interrompida (THIÉTART; FORGUES, 1995; SIVAKUMAR, 2017). As teorias do Caos, Geometria Fractal, Teoria das Catástrofes, Estruturas Dissipativas, podem ser analisadas de acordo com a teoria dos sistemas dinâmicos não-lineares (THORNES, 1981, 1983, 1985; GRAF, 1988; HUGGETT, 1980, 1985, 1988; PHILLIPS, 1992). Segundo Capra (1997) o salto de qualidade na discussão de sistemas complexos não-lineares se deu com a apresentação da teoria de "Estrutura Dissipativa" de Ilya Prigogine.

Estruturas Dissipativas

A teoria das estruturas dissipativas, desenvolvida pelo russo Ilya Prigogine, por certo foi a principal teoria sobre sistemas auto organizados. Para isto, o autor se baseou nos princípios da segunda lei da termodinâmica (que trata de entropia) e provavelmente uma das primeiras ciências da complexidade (não-linearidade), desenvolvendo uma nova termodinâmica não-linear para descrever fenômenos de auto-organização afastados do equilíbrio (CAPRA, 1997).

Uma das principais características das estruturas dissipativas é a noção de equilíbrio e não equilíbrio. O estado de equilíbrio termodinâmico é caracterizado, simplificadamente, pela temperatura uniforme em todo o sistema e a evolução do sistema para este estado perpassa por diversos processos irreversíveis, de forma que quando o sistema atinge o equilíbrio esses processos desaparecem. Portanto, pode-se afirmar que um sistema em um estado de não equilíbrio é caracterizado por processos irreversíveis que que conduzem o sistema para o equilíbrio (PRIGOGINE; STENGERES, 1991; KONDEPUDI; PRIGOGINE, 1997)

A ideia de Prigogine indica um processo de auto-organização em sistemas longe do estado de equilíbrio (CAPRA, 1997). Os sistemas, influenciados pela dinâmica de fluxo e matéria, podem ser levados para longe do equilíbrio termodinâmico em um regime não-linear. Na natureza os sistemas longe do equilíbrio são onipresentes, sendo, por exemplo, a terra um sistema aberto que é sujeito ao fluxo de energia do sol, "esse influxo de energia fornece a força motriz para a manutenção da vida e é, em última análise, responsável por manter uma atmosfera fora do equilíbrio termodinâmico" (KONDEPUDI; PRIGOGINE, 1997, p. 409). Em uma escala menor, cada célula vive através do fluxo de energia e matéria.

Sistemas longe do equilíbrio perdem sua estabilidade e podem evoluir para diferentes estados, "os processos irreversíveis e as condições de contorno não especificam exclusivamente o estado de não-equilíbrio para o qual o sistema irá evoluir; impulsionado por flutuações internas ou outras pequenas influências, o sistema deixa o estado instável e evolui para um dos muitos novos estados possíveis" (KONDEPUDI; PRIGOGINE, 1997, p. 409), e esses novos estados podem ser extremamente organizados. Uma vez que a manutenção desses sistemas não-lineares longe do equilíbrio organizados é devido a processos dissipativos (forças não conservativas atribuídas ao princípio de transformação de energia e não de perda), esses sistemas são denominados de estruturas dissipativas (PRIGOGINE, 1967).

Prigogine (1980) afirma que os sistemas dissipativos possuem três características que se relacionam: função, expressa nas equações do processo; estrutura espaço-temporal (configuração), que resulta de instabilidades; e as flutuações, que desencadeiam as instabilidades. Segundo Hugget (1988) as equações dos processos dissipativos podem ser descritas por equações de reação (Equação 1), que para sistemas n-dimensionais:

(1)

$$\frac{dx}{dt} = F(x)$$

Onde:

$$x = (x_1, x_2 \dots, x_n)$$

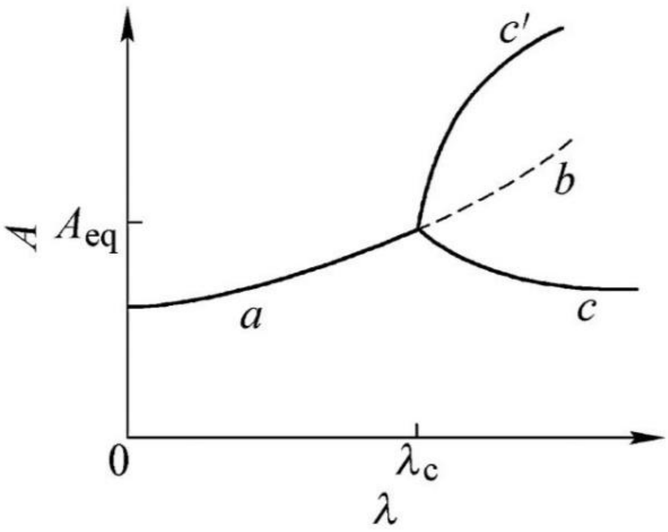
É um vetor de variáveis de estado e:

$$F = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)]$$

É um vetor de funções relacionadas às variáveis de estado. Segundo Hugget (1988, p. 46) "se a difusão for levada em consideração, um termo adicional, $D\left(\frac{\delta^2 x}{\delta r^2}\right)$, deve ser adicionado ao lado direito da equação, onde D é um coeficiente de difusão er é uma coordenada espacial".

Um sistema dissipativo é susceptível a flutuações como um mecanismo de interação não-linear (YAN, 1987). Quando o sistema está longe do equilíbrio começa a perder estabilidade e chega ao estado crítico, pequenas flutuações e perturbações poderão induzir o sistema a um novo estado que pode ser desordenado, mas também pode ter uma ordem condizente com as condições espaço-temporais, sob orientação dos parâmetros de ordem (Diagrama 1) (YIN, 2016). A teoria da bifurcação é um importante fator para entender os sistemas que transitaram para uma estrutura dissipativa (ver c' e c Diagrama 1) (KONDEPUDI; PRIGOGINE, 1997, p. 431). Isto indica que um sistema pode ter uma multiplicidade de caminhos a percorrer quando está longe do equilíbrio.

Diagrama 1- Modelo esquemático de bifurcação e ponto singular



Fonte: YIN, (2016)

A = representa uma função do estado do sistema. λ = Representa a distância do equilíbrio (o grau de desvio do equilíbrio controlado por parâmetros externos). Quando $\lambda = 0$ o estado está em equilíbrio. $\lambda = \lambda_c$ significa o ponto crítico (ponto singular da trajetória de evolução). Fonte: Yin (2016).

Os conceitos e técnicas dos sistemas dinâmicos não-lineares podem ser aplicados em geomorfologia a partir do momento que se considera os sistemas morfológicos como estruturas dissipativas e, razoavelmente, considera-se a complexidade determinista, ou seja, o comportamento caótico decorrente das ações mecânicas e estruturas (não-lineares) relativamente simples. Uma típica manifestação de estruturas dissipativas envolve auto-organização de processos que induzem a uma sequência ordenada de formas (PHILLIPS, 1992).

Culling (1985) afirma que a importância da teoria das estruturas dissipativas para a geomorfologia parte de dois pressupostos: Os sistemas dinâmicos abstratos são arquétipos, ou seja, aquilo que os afetam, também afetam invariavelmente a maneira como todos os sistemas são vistos, isto inclui os sistemas geomorfológicos dinâmicos não-lineares. Em segundo lugar, a maioria dos sistemas geomorfológicos são dissipativos.

Ver os sistemas geomorfológicos como estruturas dissipativas implica que os mesmos estão inclusos na teoria da bifurcação, indicando que o sistema terá elementos probabilísticos e determinísticos (contido nas equações que descrevem as várias transformações que o ocorrem no sistema longe do equilíbrio) e as flutuações que desencadeiam o cruzamento de lineares no sistema serão de origem externa ou interna (SCHUMM, 1973). Logo, qualquer sistema geomorfológico suscetível a bifurcação terá duas noções distintas: um elemento universal e necessário, de natureza previsível e universal (as equações do processo determinístico, por terem um caráter universal tornam-se necessárias) e um elemento de causalidade histórica, que é de natureza imprevisível (HUGGET, 1988). Nota-se, portanto, que todas as análises de sistemas geomorfológicos dinâmicos não-lineares trabalham com os conceitos de estrutura dissipativa.

Um exemplo clássico de estruturas dissipativas (auto-organização e flutuações) em geomorfologia, foi apresentado por Hugget (1988), afirmando que os sistemas de formas de leito de rio, que passam por uma série de alterações morfológicas transitórias durante sua evolução associadas ao regime hidrodinâmico, possuem a característica de manter a ordem longe do equilíbrio e se auto organizar.

Teoria do Caos

A teoria do caos conceituada por Lorenz (1963), começou a ser difundida na ciência a partir de Gleick (1987) e Percival (1989) que discutiram as bases teóricas da teoria. A teoria do caos tem seu início em estudos físicos, principalmente discutindo a dinâmica dos fluídos (HARRISON; BISWAS, 1986; STEWART; TURCOTTE, 1989; TABOR, 1989) e foi amplamente difundida na Meteorologia (NICOLIS; NICOLIS, 1984; FRAEDRICH, 1986; 1987; ESSEX et al., 1987; TSONIS, 1989; LORENZ, 1963; 1964; 1990; dentre outros). O termo caos é utilizado para se referir a situações onde comportamentos complexos aparentemente aleatórios surgem de sistemas determinísticos relativamente simples com sensibilidade às condições iniciais.

O paradigma do Caos teve implicações profundas na ciência newtoniana dominante (que ainda nos dias de hoje é amplamente difundida) do universo mecanicista, ou seja, todas as vezes que os fenômenos forem replicados os resultados serão previsíveis (SIVAKUMAR, 2017). A teoria do caos, de acordo com Tsonis e Elsner (1989), foi tamanha para a ciência que os autores consideram a mais importante descoberta do século XX depois da relatividade e da mecânica quântica.

A teoria demonstrou que um comportamento complexo e perpetuamente dinâmico pode ocorrer de interações simples e não-lineares (MURRAY et al., 2009). Os padrões e análises complexas dos sistemas geomorfológicos têm sido frequentemente interpretados em termos de complexidade estocástica. Isto é, acreditou-se que a aparente aleatoriedade dos fenômenos seria explicada com coleta de dados suficiente e um conhecimento extremamente detalhado do fenômeno, desta forma, a aleatoriedade seria explicada utilizando-se componentes determinísticos (PHILLIPS, 1992).

Desde a descoberta do movimento caótico nota-se que os movimentos aleatórios (irregulares) muitas vezes atribuídos a um ruído ou simplesmente descartados tem uma origem determinística interna (de dentro do sistema). Na natureza afirma-se que nenhum sistema está livre de ruídos, logo um sistema caótico que se apresente com ruídos torna-se importante para o entendimento das peculiaridades do sistema. Com a descoberta da dinâmica não-linear os sistemas simples, encontrados em abundância na natureza, não são ricos o suficiente em propriedades para interpretar com certo grau de confiança os dados sobre as paisagens físicas (CULLING, 1986).

A ideia de que os sistemas são previsíveis é falsa e seriam necessários um arcabouço complexo de fórmulas para descrever os sistemas complexos. Inicialmente, a natureza básica desses sistemas (utilizando a teoria do caos) é voltada para a dinâmica dos fluidos, principalmente a turbulência. Porém, considera-se, também, o desenvolvimento da paisagem e ecológico como um todo (MALANSON et al., 1990).

Quando se trata de sistemas geomorfológicos, principalmente a ideia de sistemas fluviais, Thorne (1987) reconhece o potencial da teoria do caos para estudos paleohidrológicos. As condições para a estabilização de formas fluviais é, paleohidrologicamente, bem específica, são necessários diferentes processos que começam simples e vão se tornando complexos e que a partir do princípio da aleatoriedade formam os diferentes sistemas fluviais. Sivakumar (2000; 2009; 2017) e Elshorbagy et al. (2002) estudaram os sistemas hidrológicos (hidrodinâmica) com base na teoria do caos; Solomatine et al. (2000) e Khatibi et al. (2011) analisaram as varrições no nível do mar e Farzin et al. (2012) estudou as alterações e previsões sobre a evaporação da água superficial em um lago usando os princípios do caos. Isto conota que a teoria do caos é aplicável para diferentes sistemas hidrológicos.

Teoria das Catástrofes

A grande maioria dos fenômenos na natureza envolvem descontinuidades e, como parte da matemática da natureza, a teoria das catástrofes lida diretamente com as propriedades dessas descontinuidades (ARNOLD, 1986). Os sistemas tem sua evolução caracterizada por essas descontinuidades, que, em linguagem matemática, podem ser definidas como bifurcações ou catástrofes (PHILLIPS, 1992). A teoria foi introduzida pelo francês René Thom utilizando ideias da dinâmica topológica e teoria da singularidade para modular mudanças morfogênicas na natureza (STEWART, 1981) e tem como objetivo explicar fenômenos descontínuos utilizando modelos matemáticos do tipo contínuo. Usualmente costuma-se afirmar que existem sete catástrofes elementares (Dobra, Cúspide, Rabo de Andorinha, Borboleta, Elíptico Umbílico, Hiperbólico Umbílico, Parabólico Umbílico) qualitativamente diferentes, que são a essência do Teorema de Classificação de Thom. Essas catástrofes podem ser representadas pelas seguintes funções que possuem co-dimensão menor ou igual a 4, de acordo com Gibson (1970), Oliveira (2010) e Basto e Carmo (2013) (Equações 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8):

(2) Dobra (Fold)

$$x_1^3 + x_1 t_1 + (M)$$

(3) Cúspide (Cusp)

$$\pm(x_1^4 + t_2 x_2^2 + t_1 x_1) + (M)$$

(4) Rabo de Andorinha (Swallowtail)

$$\pm x_1^5 + t_3 x_1^3 + t_2 x_2^2 + t_1 x_1 + (M)$$

(5) Borboleta (Butterfly)

$$\pm x_1^6 + t_4 x_1^4 + t_3 x_1^3 + t_2 x_1^2 + t_1 x_1 + (M)$$

(6) Elíptico Umbílico (Elliptic Umbilic)

$$x_1^2 x_2 - x_2^3 + t_3 x_1^2 + t_2 x_2 + t_1 x_1 + (N)$$

(7) Hiperbólico Umbílico (Hyperbolic Umbilic)

$$x_1^2 x_2 + x_2^3 + t_3 x_1^2 + t_2 x_2 + t_1 x_1 + (N)$$

(8) Parabólico Umbílico (Parabolic Umbilic)

$$\pm(x_1^2 x_2 + x_2^4 + t_4 x_2^2 + t_3 x_1^2 + t_2 x_2 + t_1 x_1 + (N)$$

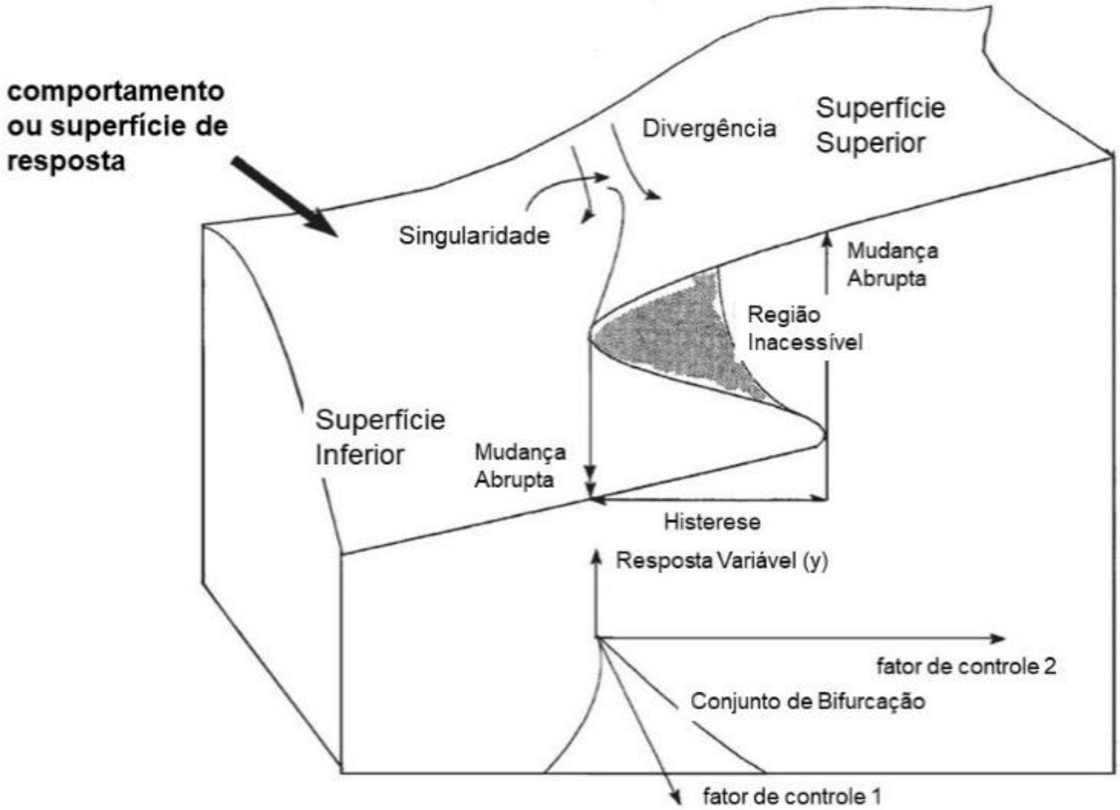
Dentre as sete catástrofes elementares as que mais podem ser observadas no cotidiano são as Dobra e a Cúspide. No caso da catástrofe de Dobra a estabilidade é perdida com a mudança de um parâmetro. Por exemplo, se um sistema está em aparente equilíbrio (porém instável), então uma pequena mudança em um dos parâmetros resulta em perda de estabilidade. Na catástrofe de Cúspide a estabilidade do sistema desaparece, podendo surgir um novo ponto de equilíbrio.

Sistemas não-lineares costumam exibir descontinuidades evolutivas (bifurcação) (ver diagrama 1), essa bifurcação pode indicar a aproximação do sistema para um estado comportamental regular ou a aproximação do mesmo para o estado de caos. Essas descontinuidades podem ser analisadas descritas a partir da teoria da catástrofe (PHILLIPS, 1992).

A catástrofes elementar que parece ser mais apropriada para os estudos em geomorfologia é a de Cúspide, pois é caracterizada por mudanças abruptas e suaves, comportamento divergente e bimodal, histerese e estabilidade de estrutura (GRAF, 1982). Autores como Woodcock e Davis (1978) e Dou e Ghose (2006) apresentam modelos detalhes da catástrofe em Cúspide (Diagrama 2) e a descrevem como uma superfície tridimensional que consiste em variáveis dependentes (uma) e independentes (duas) e sua dinâmica é representada por movimentos verticais de uma variável dependentes como resultados das mundanas das duas dimensões de controle.

Diagrama 2- modelo clássico de catástrofe de cúspide

Geopauta, Vitória da Conquista ISSN: 2594-5033, **V. 6, 2022, e10651**



Fonte: Adaptado de Dou e Ghose (2006).

Segundo Graf (1982) a teoria das catástrofes possui limitações nos estudos geomorfológicos, principalmente quando se fala de estudos fluviais. O autor realizou testes em sistemas arroios e corredeiras em rios de cânions e percebeu a dificuldade de identificar os fatores de controle do sistema, a função de energia e a generalidade da teoria, que não é específica para estudos geomorfológicos. Porém, para estudos de equilíbrio (graded rivers) e da estabilidade de mudanças estruturais no sistema a teoria pode ser vantajosa.

Um exemplo prático e simples da teoria das catástrofes em geomorfologia seria uma um sistema de vertente. Uma determinada rocha no topo da vertente pode exibir um comportamento suave (estável). Podemos supor que sem muita perda do estado estável do sistema em qualquer momento pode ser especificado por *n* variáveis (x_1, x_2, ..., x_n), isto é o caminho da rocha desconsiderando as descontinuidades. Também podemos supor que a vertente está sob o controle de *m* (t_1, t_2, ..., t_n) variáveis independentes, ou seja, que os valores dessas variáveis determinar aqueles de x_i embora não totalmente (fatores como precipitação, por exemplo). Porém, se houver uma mudança em algum dos parâmetros que trazem essa estabilidade a rocha consegue ultrapassar o pico de energia e o patamar de estabilidade cai rapidamente, com isso a rocha seria transportada para o sopé da vertente e criaria um novo ponto de equilíbrio. A teoria das catástrofes indica que uma pequena mudança em um parâmetro pode transformar com cenário estável em instável.

Geometria Fractal

Historicamente, os conceitos de Fractais e dimensão fractais são atribuídos ao matemático Francês Benoit Mandelbrot, quando o autor buscou um termo que descrevesse com completude a geometria que representava as formas reais da natureza (MANDELBROT, 1967, 1975, 1977, 1983). A geometria fractal é uma ferramenta matemática para lidar com sistemas complexos que não possuem escala de comprimento como característica principal, ou seja, tecnicamente um fractal é um objeto que não apresenta variância na sua forma independente da escala de análise, mantendo uma estrutura idêntica à original (FEDER, 1988; ASSIS et al., 2008). Até os dias de hoje não existe uma definição matemática clara para representar todas a amplitude de aplicações dos fractais, porém Turcotte (1997) define quantitativamente um conjunto fractal de acordo com a Equação 8:

(Equação 8):

$$N_i = \frac{C}{r_i^D}$$

Onde: N_i é o número de objetos (fragmentos) com uma dimensão característica r_i. C é uma constante de proporcionalidade. D é a dimensão fractal.

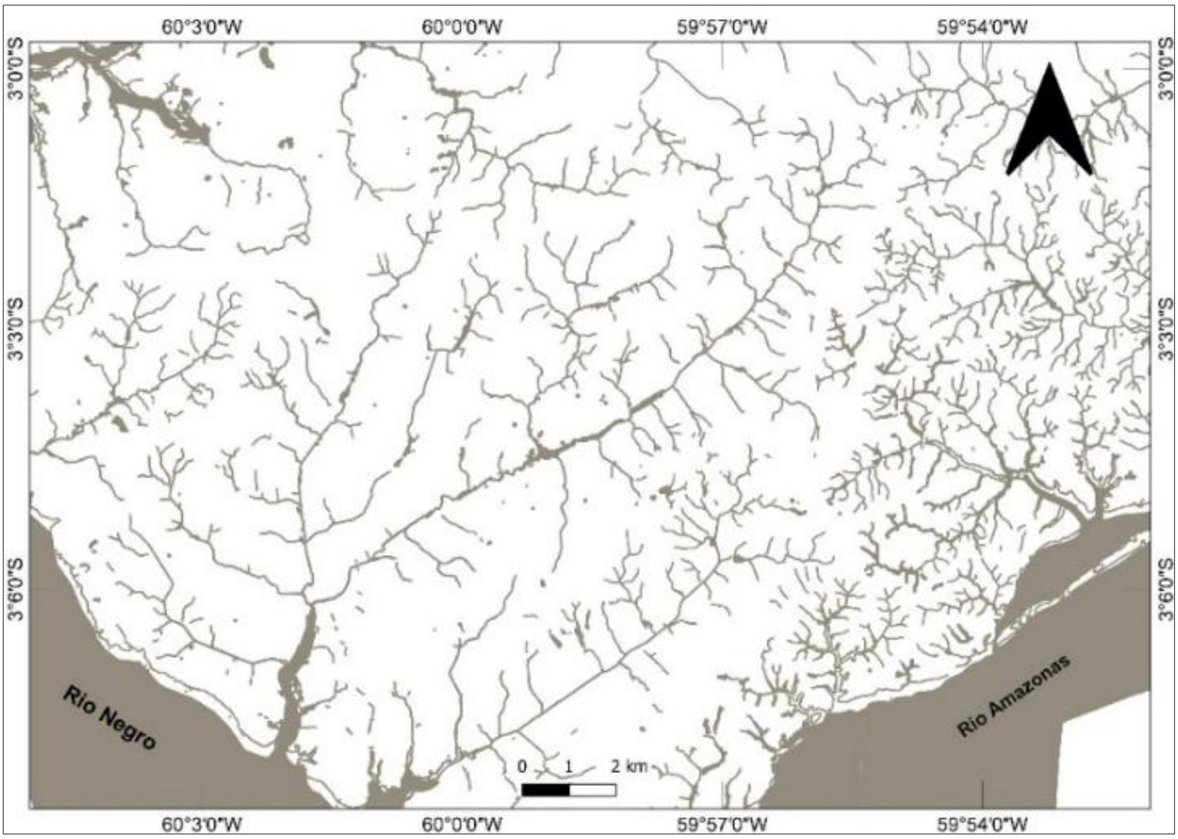
As principais características dos fractais são a auto semelhança, a complexidade infinita e sua dimensão. A auto semelhança "é identificada quando uma porção, de uma figura ou de um contorno, pode ser vista como uma réplica do todo, numa escala menor" (ASSIS et al., 2008, p. 2304). A complexidade infinita indica que o processo de formação de uma figura (definida previamente como fractal) é recursivo, "isto significa que, quando se executa um determinado procedimento, no decorrer da mesma encontra-se como sub-procedimento o próprio procedimento anteriormente executado" (ASSIS et al., 2008, p. 2304).

Por fim, a dimensão, que diferente da Geometria Euclidiana, não possui necessariamente um valor inteiro, ou seja, um determinado ponto possui dimensão zero, uma linha possui dimensão um, uma superfície possui dimensão dois e um volume possui dimensão três. "No caso da dimensão fractal, ela é uma quantidade fracionária, representando o grau de ocupação da estrutura no espaço que a contém" (ASSIS et al., 2008, p. 2304).

Pode-se classificar os fractais em dois tipos principais de estatísticas: fractais auto semelhantes e fractais auto afins, ambas podem ser aplicadas as formas de relevo. Em geomorfologia o uso de fractais foi introduzido por Mandelbrot (1967) analisando o comprimento da costa oeste da Grã-Bretanha. As formas de relevo, que costumam ter sua morfogênese por processos erosivos que as constroem e processos erosivos que as destroem, são exemplos clássicos de fenômenos complexos que podem ser quantificados utilizando conceitos fractais (TURCOTTE, 1997).

Estudos de topografia e batimetria, por exemplo, se relacionam com as fractais auto afins, já uma rede de drenagem pode, também, ser construída retratando as características de auto semelhança formando uma árvore fractal, onde as características em uma escala menor podem ser reproduzidas em uma escala maior (mapa 1).

Mapa 1- Rede de Drenagem da Área Urbana do Munícipio de Manaus, Amazonas, Brasil



Fonte: Os autores, 2022.

Antes da geometria fractal ser estabelecida, Hortor (1945) e Strahler (1957) introduziram os conceitos de ordem fluvial que está diretamente ligada à dimensão fractal, a validade das chamadas leis de Hortor "implica que as redes de drenagem são árvores fractais" (TURCOTTE, 1997, p. 185). Para especificar a geometria de uma árvore fractal são necessárias três quantidades: Relação de Bifurcação (Equação 9), a relação comprimento-ordem (Equação 10) e o ângulo de divergência θ, sendo que essas três quantidades são independentes da ordem fluvial (TURCOTTE, 1997).

(9)

$$R_b = \frac{N_\mu}{N_{\mu+1}}$$

Onde: R_b é a relação de bifurcação. N_μ é Número de Segmentos de Determinada Ordem (HORTON, 1945).

(10)

$$R_r = \frac{r_{\mu+1}}{r_\mu}$$

Onde: R_r é a relação comprimento-ordem. r_μ é o comprimento médio de determinada ordem (HORTON, 1945).

Empiricamente, a relação de bifurcação e relação de ordem são parâmetros constantes em rios de qualquer bacia hidrográfica, ou seja, a dimensão fractal pode ser dada pela equação 11:

(11)

$$D = \frac{\ln\left(\frac{N_\mu}{N_{\mu+1}}\right)}{\ln\left(\frac{r_{\mu+1}}{r_\mu}\right)}$$

Onde: D é a dimensão fractal. ln é o logaritmo natural (TURCOTTE, 1997).

Considerações Finais

As teorias da complexidade deixam claro que o mundo mecanicista de Descartes e, posteriormente, Newton, não são suficientes para prever fenômenos, principalmente em uma escala temporal média e longa. Portanto, modelos clássicos de evolução da paisagem utilizados em exaustão até os dias de hoje precisam ser revistos e atualizados. Ainda nos dias de hoje é possível notar que as pesquisas relacionadas ao relevo, usando conceitos da complexidade, são iniciais. Porém, as teorias analisadas neste trabalho comprovam que os conceitos da complexidade possuem potencial para revolucionar os estudos sobre sistemas geomorfológicos de acordo com os princípios da não-linearidade.

Referências

ARNOLD, V.I. **Catastrophe Theory.** Heidelberg, Springer, 1986.

ASSIS, T.A.; MIRANDA, J.G.V.; MOTA, F.B.; ANDRADE, R.F.S.; CASTILHO, C.M.C. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, 2304, 2008.

BAAS, A. Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments. **Geomorphology**, v. 48, pp. 309–328, 2002.

BASTO, A. S.; CARMO, F. G. **Teoria da Catástrofe e Aplicações.** Monografia (Universidade Federal do Amapá), Macapá, 2013.

BUNDE A.; HAVLIN S. A Brief Introduction to Fractal Geometry. In: BUNDE A.; HAVLIN S. (eds). **Fractals in Science.** Springer, Berlin, Heidelberg, 1994.

CAPRA, F. **A Teia da Vida.** Cultrix: São Paulo, 1997.

CULLING, W.E.D. **Equifinality:** chaos, dimension and patters. The concepts of non-linear dynamical systems theory and their potential for physical geography. London School of Economics, Geography Discussion Paper, New Series n° 19, 1985.

CULLING, W.E.D. Equifinality: Modern Approaches to Dynamical Systems and Their Potential for Geographical Thought. **Trans. Instr. Br. Geogr.** N.S, v. 12, pp. 67-72, 1986.

DAVIS, W.M. The geographical cycle. **Geographical Journal**, v. 14, pp. 481–504, 1899.

DOU, W.; GHOSE, S. A dynamic nonlinear model of online retail competition using Cusp Catastrophe Theory. **Journal of Business Research**, v. 59, n. 7, pp. 838–848, 2006.

DUNNE, T. Formation and controls of channel networks. **Progress in Physical Geography**, v. 4, pp. 211–239, 1980.

ELSHORBAGY, A.; SIMONOVIC, S.P.; PANU, U.S. Estimation of missing streamflow data using principles of chaos theory**. Journal of Hydrology**, v. 255, pp. 123-133, 2002.

ESSEX, C.; LOOKMAN, T.; NERENBERG, M.A.H. The climate attractor over short timescale. **Nature,** vol. 326, pp. 64-66, 1987.

FARZIN, S.; IFAEI, P.; FARZIN, N.; HASSANZADEH, Y.; AALAMI, M.T. An Investigation on Changes and Prediction of Urmia Lake water Surface Evaporation by Chaos Theory. **Int. J. Environ. Res.,** v. 6, n. 3, pp. 815-824, 2012.

FEDER, J. **Fractals.** New York, Plenum Press, 283 p, 1988.

FRAEDRICH, K. Estimating the dimensions of whether and climate attractor. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Vol. 43, pp. 419-432, 1986.

FRAEDRICH, K. Estimating whether and climate predictability on attractors. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Vol. 44, pp. 722-728, 1987.

FREEMAN, D. Complexity Theory: A New Way to Think. **RBLA,** Belo Horizonte, v. 13, n. 2, p. 369-373, 2013.

GIBSON, C. G. **Singular Points of smooth mappings**. 1. ed. London: Pitman Publishing Limited, 1970.

GILBERT, G.K. **Report on the geology of the Henry Mountains**. Washington, DC: United States Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region, 160 pp, 1877.

GLEICK, J. **Chaos:** Making a New Science. New York: Viking Penguin, 1987.

GRAF, W.L. Catastrophe theory as a model for change in fluvial systems. In: RHODES, D.D.; WILLIAMS, G.P. (Orgs.). **Adjustments of the Fluvial System.** Routledge, IA, pp. 13-32, 1982.

GRAF, W.L. Applications of catastrophe theory in fluvial geomorphology. In: ANDERSON, M.G. (Orgs.). **Modelling Geomorphological Systems**. Wiley, Chichester, pp. 33-48, 1988.

HACK, J.T. Studies of Longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. **U.S Geol. Survey.** Prof. Paper, pp. 45-97, 1957.

HACK, J.T. Interpretation of erosional topography in humid temperate regions. **American Journal of Science**, v. 258A, pp. 80–97, 1960.

HACK, J.T. Geomorphology of the Shenandoach Valley, Virginia and West Virginia, and origin of the residual deposits. **U.S Geol. Survey**. Prof. Paper, n 484, 1965.

HARRISON, R.G.; BISWAS, D.J. Chaos in Light. **Nature,** Vol. 321, pp. 395-401, 1986.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol. Soc. America Bulletin**, pp. 275-370, 1945.

HUGGET, R.J. Dissipative Systems: Implications for Geomorphology. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 13, 4549, 1988.

HUGGETT, R.J. **Systems Analysis in Geography**. Clarendon, Oxford, 1980.

HUGGETT, R.J. **Earth Surface Systems**. Springer, New York, 1985.

KHATIBI, R.; GHORBANI, M.A.; AALAMI, M.T.; KOCAK, K.; MAKARYNSKYY, O.; MAKARYNSKA, D.; AALINEZHAD, M. Dynamics of hourly sea level at Hillarys Boat Harbour, Western Australia: a chaos theory perspective. **Ocean Dynamics**, v. 61, pp. 1797–1807, 2011.

KONDEPUDI, D.; PRIGOGINE, I. **Modern Thermodynamics**: From Heat Engines to Dissipative Structures. John Wiley & Sons Ltd, England, 1997.

LORENZ, E.N. Deterministic nonperiodic flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 20, pp. 130-141, 1963.

LORENZ, E.N. The problem of deducing the climate from the governing equations. **Tellus**, Vol. 16, pp. 1-11, 1964.

LORENZ, E.N. Can Chaos and intransitivity lead to interannual variability? **Tellus**, v. 42, pp. 378-389, 1990.

MALANSON, G.P., BUTLER, D.R., WALSH, S.J. Chaos theory in physical geography. **Physical Geography**, v. 11, pp. 293-304, 1990.

MANDELBROT, B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. **Science**, v. 156, pp. 636–638, 1967.

MANDELBROT, B. **The Fractal Geometry of Nature**. W.H. Freeman and Company, New York, 1983.

MANDELBROT, B.B. **Les Objets Fractals:** Forme, Hasard et Dimension. Paris: Flammarion, 1975.

MANDELBROT, B.B. **Fractals***:* Form, Change, and Dimension. New York: W.H. Freeman, 1977.

MORIN, E. ***O método I:*** a natureza da natureza. Europa América, 1975.

MURRAY, A.B.; LAZARUS, E.; ASHTON, A.; BAAS, A.; COCO, G.; COULTHARD, T.; FONSTAD, M.; HAFF, P.; MCNAMARA, D.; PAOLA, C.; PELLETIER, J.; REINHARDT, L. Geomorphology, complexity, and the emerging science of the Earth's surface. **Geomorphology**, v. 103, pp. 496–505, 2009.

NICOLIS, C; NICOLIS, G. Is there a climatic attractor? **Nature**, vol. 311, pp. 529-532, 1984.

OLIVEIRA, A. R. C. **A classificação das formas binárias aplicada em máquina de catástrofes.** 59f. Dissertação (Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas). Rio Claro, 2010.

PERCIVAL, I. Chaos: A science for the real world. **New Scientist,** v. 124, 42-47, 1989.

PHILLIPS, J.D. Nonlinear dynamical in geomorphology: revolution or evolution? **Geomorphology**, v. 5, n. 3-5, pp. 219-229, 1992.

PRIGOGINE, I. **Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes**. New York: John Wiley, 1967.

PRIGOGINE, I. **From Being to Becoming:** Time and Complexity in the Physical Sciences, Freeman, San Francisco, 272 pp, 1980.

PRIGOGINE, I.; STENGERES, I. **A Nova Aliança**: Metamorfose da Ciência. Brasília; Ed. Da UnB, 1991.

SCHUMM, S. A. (1973). Geomorphic thresholds and complex response of drainage systems. In MORISAWA, M. (Org.). **Fluvial Geomorphology**. State University of New York, pp. 299-310, 1973.

SIVAKUMAR, B. Chaos theory in hydrology: important issues and interpretations. **Journal of Hydrology**, v. 227, pp. 1–20, 2000.

SIVAKUMAR, B. (2009). Nonlinear dynamics and chaos in hydrologic systems: latest developments and a look forward. **Stoch Environ Res Risk Assess**, v. 23, pp. 1027–1036, 2009.

SIVAKUMAR, B. **Chaos in Hydrology**: Bridging Determinism and Stochasticity. Springer, 2017.

SOLOMATINE, D.P.; ROJAS, C.J.; VELICKOV, S.; WÜST, J.C. Chaos theory in predicting surge water levels in the North Sea. **Proc. 4-th International Conference on Hydroinformatics**, Iowa, USA, 2000.

STEWART, C.A.; TURCOTTE, D.L. The route to chaos in thermal convection at infinite Prandtl number. Some trajectories and bifurcations. **Journal of Geophysical Research.** v. 94, pp. 13707-12717, 1989.

STEWART, I. Applications of catastrophe theory to the physical sciences. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 2, n. 2, pp. 245–305, 1981.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans. Am. Geophys. Un**., v. 38, pp. 3-20, 1957.

STRAHLER, A.N. Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis. **American Journal of Science**, v. 248, pp. 673–696, 1950.

TABOR, M. **Chaos and integrability in nonlinear dynamics**: An Introduction. New York: Wiley, 1989.

THIÉTART, R.A.; FORGUES, B. Chaos Theory and Organization. **Organization Science,** v. 6, n. 1, pp.19-31, 1995.

THORNES, J.B. Structural instability and ephemeral channel behavior. *Z.* **Geomorphology**., v. 26, pp. 233-244, 1981.

THORNES, J.B. Evolutionary geomorphology. **Geography**, v. 68, pp. 225-235.

THORNES, J.B. The ecology of erosion. **Geography**, v. 70, pp. 222-235, 1985.

THORNES, J. Models for Paleohydrology in Practice. In: GREGORY, K.J.; LEWIN, J.; THORNES, J.B. **Paleohydrology in Practice.** Chichester [West Sussex], 1987.

TSONIS, A.A. Chaos and unpredictability of whether. **Whether**, v. 44, pp. 258-263, 1989.

TSONIS, A.A.; ELSNER, J.B. Chaos, Stranger attractors, and whether. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 70, pp. 14-23, 1989.

TURCOTTE, D.L. **Fractals and Chaos in Geology and Geophysics**. Cambridge University Press, 1997.

WOODCOCK, A; DAVIS, M. **Catastrophe theory.** New York: E. P. Dutton, 1978.

YAN, Z. (1987). Dissipative Structure Theory and System Evolution. **Fujian People Press, Fuzhou,** pp. 72-78, 1987.

YIN, R. **Theory and Methods of Metallurgical Process Integration**. Metallurgical Industry Press, 2016.

Autor 1 Desenvolvimento teórico-conceitual e aquisição e interpretação de dados
Autor 2 Supervisão, Procedimentos técnicos e análise dos dados.