



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## Perfil geomorfológico de maturidade da bacia do rio Paracatu

Omar Pereira Campos (*In Memoriam*), Paulo Pereira Martins Junior<sup>1</sup>, Vitor Vieira Vasconcelos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Ouro Preto, Professor, Autor correspondente: [maerteyn@gmail.com](mailto:maerteyn@gmail.com) <sup>2</sup> Universidade Federal do ABC, Professor, [vitor.v.v@gmail.com](mailto:vitor.v.v@gmail.com)

Artigo submetido em 17/08/2016 e aceite em 01/10/2016

### RESUMO

Apresenta-se uma avaliação da maturidade do perfil geomorfológico da Bacia do Rio Paracatu, afluente do Rio São Francisco. As relações entre comprimento e queda média dos seguimentos de rios para cada ordem pelo método de Strahler são analisados por leis empíricas para comparação com um perfil teórico de máximo equilíbrio. Os resultados demonstram que a Bacia do Rio Paracatu está próxima de seu estágio máximo de maturidade, embora ainda não o tenha alcançado completamente. A partir do estudo aplicado, são tecidas reflexões sobre as possibilidades de investigação de bacias hidrográficas com base em abordagens de entropia, meta-estabilidade, geovulnerabilidade e evolução geomorfológica.

Palavras-chave: Perfil de equilíbrio, entropia, meta-estabilidade, geovulnerabilidade, evolução geomorfológica, Paracatu.

### Geomorphological maturity profile of the Paracatu river basin

### ABSTRACT

An assessment of the maturity of the geomorphological profile of the Paracatu River Basin, a tributary of the São Francisco River, is presented. The relationship between length and average stream fall for each order using the Strahler method is analysed using empirical laws for a comparison to a theoretical profile of maximum equilibrium. The results show that the Paracatu River Basin is close to its maximum stage of maturity, though it has not achieved it completely. Based on this study, reflections are made about the possibilities to study this watershed based on entropy approaches, metastability, geological vulnerability and geomorphological evolution.

Keywords: Equilibrium profile, entropy, metastability, geovulnerability, geomorphological evolution, Paracatu.

### Introdução

Horton (1945) apresenta uma descrição quantitativa da morfologia fluvial e propõe um sistema de ordenação para a rede fluvial que abrange as leis de ordem nos segmentos fluviais, o número de canais e o número de bifurcações, entre outras. A descrição de uma bacia hidrográfica pelas leis empíricas de Horton (1945), interpretadas segundo o critério de ordenação de Strahler (1964)<sup>1</sup>, permite inferir informações interessantes sobre as trocas de matéria e de energia entre os seus cursos d'água.

Em 1962, Leopold e Langbein (1964), introduzem o conceito de entropia na avaliação da morfologia fluvial. Segundo eles, por analogia com

a entropia termodinâmica, postula-se que um sistema geomorfológico (como a rede fluvial) é um sistema aberto em estado de regime permanente. Isso acarreta duas generalizações sobre a distribuição de energia mais provável, que seria um estado intermediário entre dois estados ou tendências: um estado em que a taxa de dispersão de energia é uniformemente distribuída; e um estado onde o sistema executa um trabalho mínimo.

Yang (1971) desenvolveu uma aplicação do conceito de entropia a essas relações mostrando que a bacia atinge, no trajeto para o equilíbrio estático final, um ou mais estados de equilíbrio dinâmico nos quais a queda por sub-bacia é constante e verificou essa propriedade para 14

<sup>1</sup> O critério de Strahler considera como de ordem 1 as correntes singulares; a junção de 2 correntes de ordem 1 produz uma corrente de ordem 2, e assim por diante.

bacias da América do Norte com aproximação suficiente para se estudar a distribuição do potencial hídrico por sub-bacias. Para o sistema fechado, a aplicação da Lei da Entropia à unidade de massa de água leva à conclusão de que a queda média por sub-bacia independe da ordem; para o sistema aberto, conclui-se que a energia potencial por sub-bacia também independe da ordem.

O método de Yang (1971) permite análise sobre o estado de maturidade de uma bacia hidrográfica, sob a perspectiva de considerar conjuntamente a energia potencial de relevos e a morfologia de rios. Esse método conduz de um modo transdisciplinar à idéia de entropia, como o estado meta-estável de maior equilíbrio dinâmico no qual o relevo deva se encontrar, ou não, em uma dada bacia ao fim de uma etapa de processo morfogênico.

Nesse arcabouço teórico, duas leis se revelam úteis para descrever tal estado de coisas:

[1] Lei da queda média do curso d'água – “sob condições de equilíbrio dinâmico a razão entre os gradientes médios de dois cursos de diferentes ordens, em uma mesma bacia, é próxima da unidade” e

[2] Lei do dispêndio mínimo de energia – “durante a evolução da bacia em direção à condição de

equilíbrio, um curso d'água natural faz seu percurso de tal modo que a taxa (potência) de uso de energia potencial por unidade de massa de água, ao longo do trajeto, é a mínima”.

A ideia subjacente é de que uma bacia pode estar em estado de equilíbrio, o que significa o estado de maior maturidade para uma determinada fase da conjugação dos fatores de soerguimento crustal e efeito das chuvas, fatores esses que atuam em antagonismo. Para estar em condição de máxima entropia, isto é, funcionando com os mais baixos geopotenciais possíveis para a situação, a bacia deve ter atingido a máxima relação de perda de geopotenciais em todos os seus compartimentos.

O objetivo deste artigo é utilizar o método de Yang (1971) para estudar a maturidade do perfil hidro-geomorfológico da Bacia do Rio Paracatu.

### Material e métodos

A Bacia do Rio Paracatu (Figura 1) possui 45.154 km<sup>2</sup>, sendo a maior bacia dentre os afluentes diretos do Rio São Francisco. Encontra-se quase totalmente dentro do Estado de Minas Gerais (Região Noroeste), com pequenas áreas de topo no Estado de Goiás e no Distrito Federal.

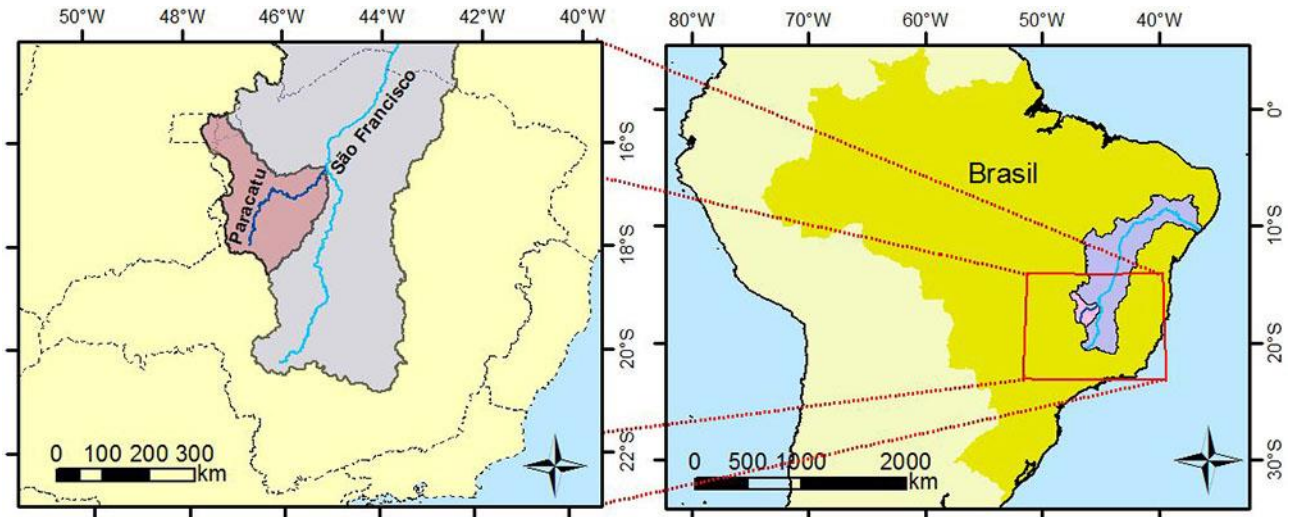


Figura 1. Localização da Bacia do Rio Paracatu

Os dados necessários ao cálculo dos parâmetros das leis empíricas foram levantados em cartas topográficas do IBGE na escala 1:100.000, correspondendo para cada ordem de strhaler, os

seguintes parâmetros: número de correntes ( $N_u$ ), Comprimento médio ( $L_u$ ), Queda Média ( $Y_u$ ) área de drenagem média ( $Ad_u$ ) (Figura 2)

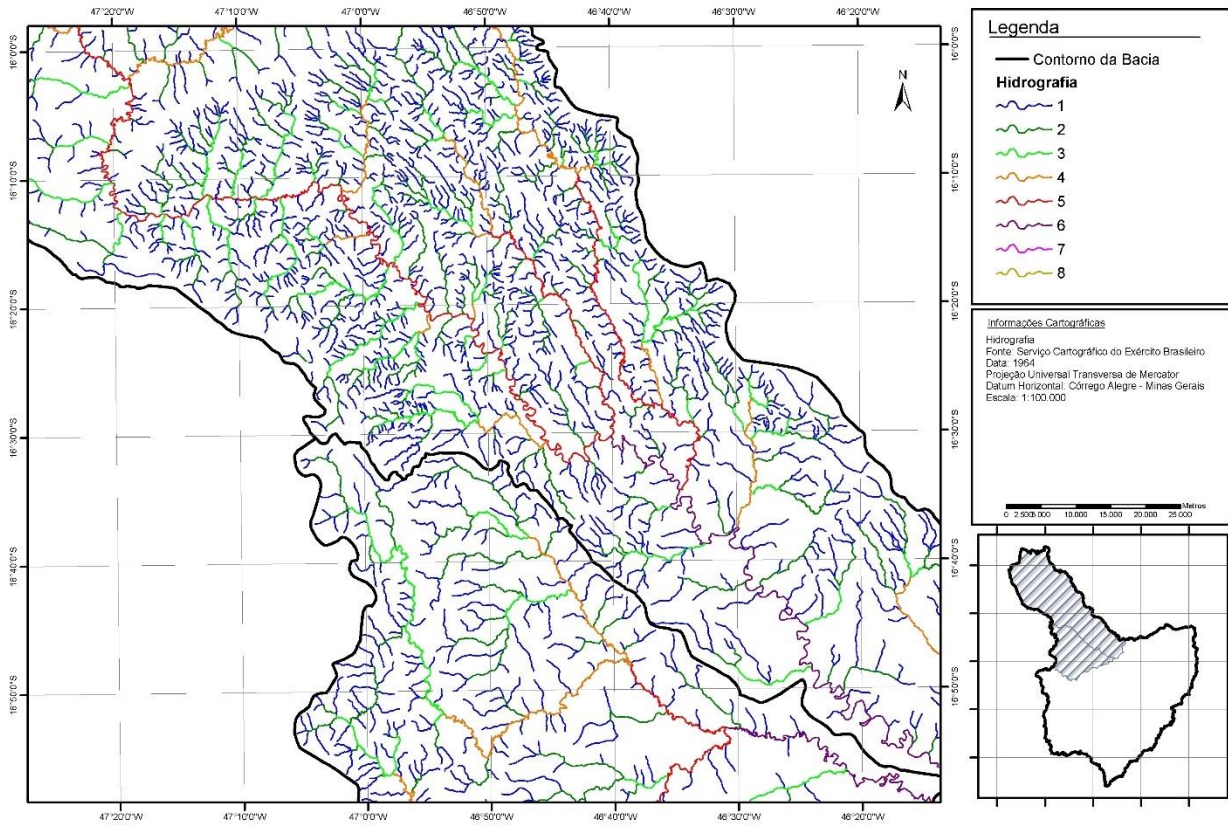


Figura 2. Trecho das sub-bacias de Entre Ribeiros e do Rio Escuro no Vale do Paracatu no qual se vê os cursos d'água classificados segundo diversas ordens, de acordo com o método de Strahler. Bases cartográficas de Martins Junior et a. (2006)

Os valores médios por sub-bacia são ajustados às leis empíricas:

$$\ln N_u = A - B \cdot u$$

$$\ln L_u = C - D \cdot u$$

$$\ln Y_u = G - H \cdot u$$

Usando as equações acima, é possível estabelecer uma relação entre o percurso virtual e a queda por sub-bacia, considerada como um curso d'água único caracterizado pelos valores médios dos respectivos parâmetros.

Somando-se os percursos virtuais, a partir do início da corrente de ordem 1 até o fim da de ordem  $u$ , obtém-se a abscissa do diagrama de queda da bacia toda; somando-se as quedas obtém-se as respectivas ordenadas. Com o mesmo procedimento, obtém-se o diagrama da queda acumulada na bacia, no estado de equilíbrio dinâmico, visto que, segundo o modelo de Yang, a queda total na bacia (da cabeceira da corrente de ordem 1 à foz da corrente  $u$ ), no estado de equilíbrio dinâmico, se distribui igualmente pelas sub-bacias, ou seja, a queda  $Y_u$  não depende do valor de  $u$ . Por fim, com os dados não-ajustados dos parâmetros, pode-se construir o diagrama da queda observada na bacia, sendo  $X_u = \sum_{i=1}^u L_i$  e  $Y_u = \sum_{i=1}^u Y_{i,observ.}$

## Resultados

Os dados fluviomorfológicos médios para a Bacia do Rio Paracatu estão registrados na Tabela 1.

A Figura 3 apresenta os resultados das leis empíricas para os sub-bacias agrupadas em cada ordem de Strahler.

Somando-se os percursos virtuais da Bacia do Rio Paracatu, obtém-se as seguintes ordenadas do diagrama de quedas:

$$X_u = \sum_{i=1}^u X_i = \sum_{i=1}^u e^{6,77 + 0,822 u} = e^{6,77} \sum_{i=1}^u e^{0,822 u}$$

$$Y_u = \sum_{i=1}^u Y_i = \sum_{i=1}^u e^{3,86 + 0,0496 u} = e^{3,86} \sum_{i=1}^u e^{0,0496 u}$$

O diagrama da queda acumulada na bacia, no estado de equilíbrio dinâmico, foi obtido usando a equação de  $X_u$  acima, juntamente com  $Y_u = e^{3,86} \sum_{i=1}^u 1 = 47,5 u$ . O gráfico da Figura 3 mostra as quedas acumuladas em razão do percurso dos cursos de água. Para facilitar a comparação dos resultados deste e de outros estudos, o gráfico de queda acumulada é convertido em perfil longitudinal, tomando-se uma cota de referência, próxima à maior cota observada, e deduzindo dela

sucessivamente as quedas por sub-bacias (Gráfico da Figura 4.B).

Tabela 1. Parâmetros das leis empíricas.

Ordem	Número de correntes - $N_u$	Comprimento médio - $L_u$ (m)	Queda média $Y_u$ (m)	Declividade média $S_u$	Área drenagem média - $A_{d_u}$ (km <sup>2</sup> )
1	5.439	2.518	66,9	0,02603	4,53
2	1.295	3.699	37,6	0,01016	6,59
3	285	9.425	55,8	0,00592	18,02
4	63	23.790	62,4	0,00262	44,57
5	17	63.180	67,6	0,00107	127,06
6	6	82.000	36,7	0,00045	181,83
7	1	363,00	102	0,00028	1270,00

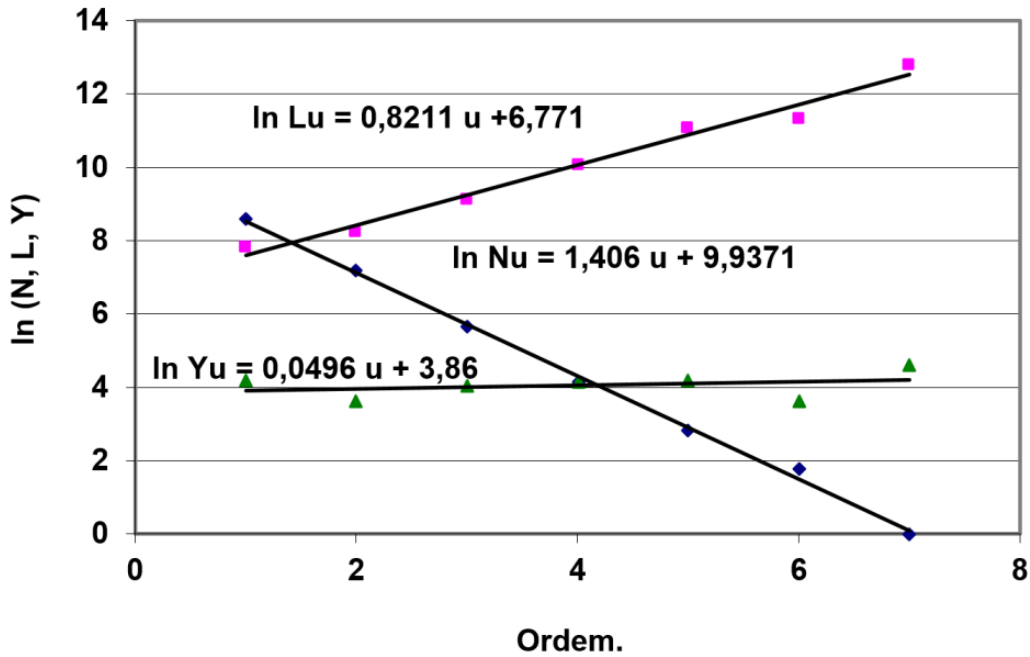


Figura 3. Gráfico com os resultados das leis empíricas para a Bacia do Rio Paracatu

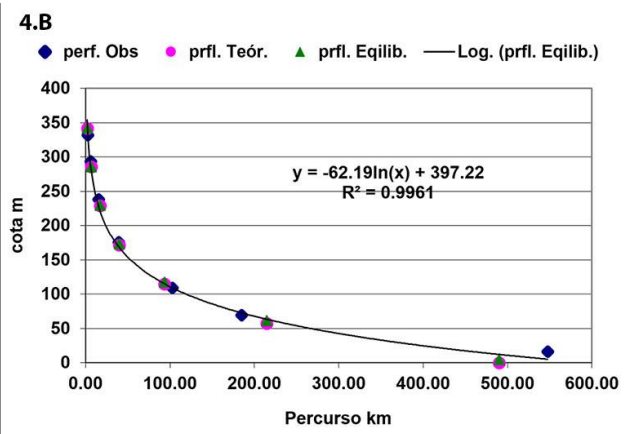
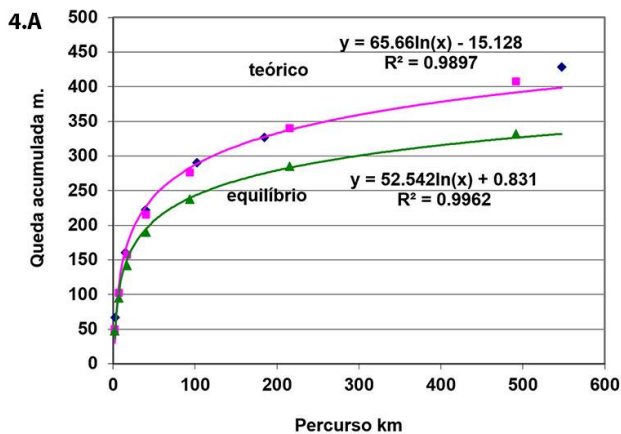


Figura 4. Queda acumulada na bacia do rio Paracatu.

A Figura 4.B do perfil da bacia do Paracatu que indica a concordância entre o perfil teórico e o perfil real, indicando que a bacia do Paracatu está em estágio máximo de maturidade ou de entropia

máxima de sua evolução na fase atual de evolução tectônica e climática.

Para comparação, apresenta-se no gráfico da Figura 5 o diagrama de perfis longitudinais para o Rio Santo Antonio (Moreira et al., 2002).



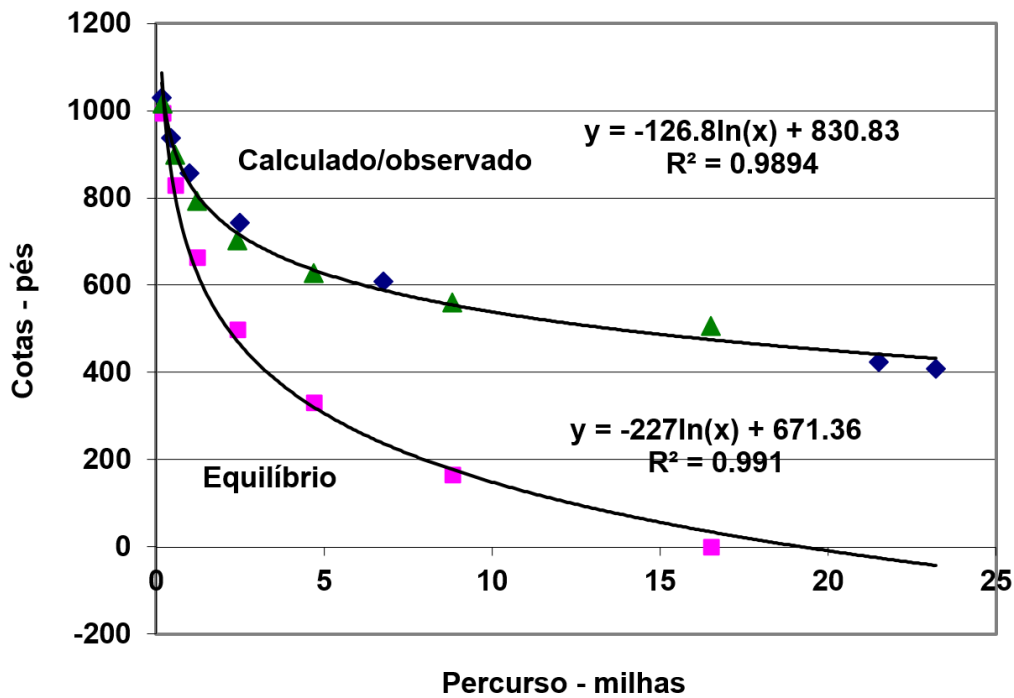


Figura 5. Perfis longitudinais da Bacia do Rio Santo Antônio

### Discussão

Refletindo sobre o exemplo demonstrado para o perfil morfológico da Bacia do Rio Paracatu neste artigo mister se faz definir o que vem a ser estabilidade em relação à geovulnerabilidade, já que tanto esses conceitos como os fenômenos não são de tão simples delimitação, oferecendo, talvez, um desafio para estruturar este tipo de desenvolvimento.

Todo sistema natural é transiente, isto é, não funciona em estado permanente. Não há estacionaridade, portanto, a geovulnerabilidade deve ser definida em função dessas condições transientes.

Durante determinado período de tempo é possível se fazer uma abstração e admitir que um subsistema esteja estável, ou mais propriamente meta-estável. A meta-estabilidade significa, por sua vez, que os subsistemas possam estar, ou não, funcionando na condição de máxima entropia, isto é, de maior estabilidade para aquele estado atual de sua evolução. Um subsistema está sempre em condição meta-estável sem estar necessariamente em máxima entropia, e assim mesmo estar estabilizado pelo efeito de uma série de elementos dos ecossistemas existentes, que estabilizam a estrutura do sistema.

A estabilidade ocorre quando o balanço total de forças internas do macro-sistema, ou de forças que atuem sobre esse sistema, permite mantê-lo longe do equilíbrio com perdas pouco perceptíveis, tal que, em média, seja possível ocorrer, por exemplo, uma alteração no subsolo que compense as perdas de solos e/ou de nutrientes para fora do

sistema com a formação de neo-solos. Essa formação deveria assim acompanhar par-e-passo o processo de perdas na medida das diferenças dos processos geológicos que estiverem em curso.

Em outro sentido, a meta-estabilidade é também uma função fundamental da presença da vida como agente de estabilidade e como “agente geológico ativo ( $\Rightarrow$ )”, quando construtor de ambientes geológicos, e como “agente passivo ( $\Leftarrow$ )”, quando oferece resistência à produção de entropia sobre o continente como macro-sistema. Deve-se incluir a atmosfera como agente de alta eficiência mecânica ( $\Downarrow\Rightarrow$ ) e de produção de entropia e de novas ordenações.

A vegetação, por sua vez, é a maior responsável pela manutenção de determinado estado-situação, como forma de resistência à evolução em direção à máxima entropia. Sem ela isso significa tender ao arrasamento completo da estrutura de uma bacia hidrográfica e das oscilações de relevo dentro dela, o que vem a ser o estado de total maturidade de uma bacia e do relevo, que por sua vez só pode ser reativado, isto é, ter gerado novos geopotenciais por três tipos eventos:

- soerguimento continental ou epeirogênese (cita-se o amplo soerguimento do final do Cretácio que permitiu as geoformas evoluírem para como se apresentam atualmente),
- variação eustática do nível do mar com diminuição ou mesmo aumento de nível,

- movimentação tectônica compartimentada em uma área em questão, produzindo desníveis ou novos geopotenciais.

A geovulnerabilidade deve ser, então, um indicador de “como eventos podem afastar uma sub-bacia hidrográfica de sua condição de meta-estabilidade para um patamar mais baixo em geopotencial disponível, para um novo estado de meta-estabilidade”.

De modo evidente, em qualquer processo de gestão deve-se considerar que a intervenção antrópica poderá e deverá ser no sentido de se beneficiar do patrimônio natural para os processos produtivos, sem produzir irreversibilidade que leve a bacia para um novo estado meta-estável, e portanto, menos organizado ou com menos potencial do que o então existente.

A *geovulnerabilidade* se reconhece mais facilmente nos *nós-do-sistema*, isto é, em cada *nó* ou *entrecruzamento* ou *interseção* de sistemas, onde o cibernismo possa ser alterado para além do *estado de flutuação inerente e normal ao sistema*, ou seja, o *estado de flutuação* que não leva o sistema para longe de sua condição própria de equilíbrio, ou, no máximo o leve para uma flutuação muito próxima ao equilíbrio.

De um ponto de vista da gestão ambiental tal situação, se verificada, pode indicar quatro questões, a saber:

- a bacia está em equilíbrio, portanto a erosão pode não progredir de modo notável espontaneamente,
- a bacia está em desequilíbrio, portanto existem áreas da mesma, altamente susceptíveis a processos erosivos espontâneos,
- qualquer mudança climática pode alterar as relações de equilíbrio do perfil de maturidade da bacia, em especial se as chuvas aumentarem de intensidade, seja ao longo da totalidade do ano hidrológico ou seja especificamente na estação mais chuvosa,
- a intervenção do homem deve se manter no sentido de não alterar o estado de equilíbrio da bacia, qualquer que seja esse estágio.

Finalmente, a condição de não alteração será válida, tanto quanto durarem as condições geotectônicas vigentes e/ou as condições climáticas reinantes cujas forças naturais são obviamente não-controláveis, mas que podem ser minimizadas pela vegetação natural e por projetos

agrícolas implantados com métodos de conservação dos solos e da água.

## Conclusão

A partir de análise da bacia do Paracatu com o método de Yang resulta que os processos com funções opostas de criação (+) e destruição de geopotenciais (-), a saber, o soerguimento crustal regional (+) e o efeito erosivo das chuvas (-) chegaram a um nível, se não de máxima entropia, todavia, bem próximo desse nível.

Os gráficos apresentados mostram boa concordância entre os perfis observados e os perfis teóricos, comprovando a adequação das leis empíricas à descrição da morfologia da Bacia do Rio Paracatu. Entretanto, o perfil teórico mostra-se relativamente afastado do perfil de equilíbrio, o que demonstra não ter sido atingido o regime permanente. Usando o critério da distribuição das quedas por sub-bacias com os dados do gráfico 1 (reta ajustada), calcula-se a razão média entre as quedas sucessivas ( $Y_u/Y_{u+1}$ ) em 0,951 confirmando o estado de desequilíbrio.

Observa-se ainda que o perfil de equilíbrio está acima do perfil teórico, ao contrário do que se observou na Bacia do Rio Santo Antonio (razão 1,166), estudada com a mesma metodologia. Estas duas bacias estão de um lado e do outro do equilíbrio dinâmico que seria atingido por processos diferentes.

## Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq, CAPES, FAPEMIG e FINEP CT-Hidro-2002 pelo financiamento das pesquisas que possibilitaram a realização desse artigo.

## Referências

- Horton, R. E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins, Bull. Geol. Soc. Amer. 56, 275-370.
- Langbein, W.B., Leopold, L. B., 1964. Quasi-equilibrium states in channel morphology. American Journal of Science 262, 782-794.
- Martins Jr., P.P. (Coord.); Carneiro, J.A.; Endo, I.; Vasconcelos, V.V.; Novaes, L.A.d'A.; Ferreira, E.N.; Ferreira, O.C.; Marques, A.F.S.M.; Barbosa, G.L.; Nunes, H.T.; Tolentino, J.A.; Pereira, M.A.S.; Oliveira, M.A.I.; Lopes, J.S.; Carvalho, F.E.C.; de Paulo, R.G.F.; da Franca, R.R.; de Moraes, M.C. 2006. Conservação de Recurso Hídrico no Âmbito da Gestão Ambiental e Agrícola de Bacia Hidrográfica. Belo Horizonte e Ouro Preto: Fundação CETEC e UFOP/ EM/ DEGEO. Projeto CRHA. Relatório Final. Tomo I, 247p.; Tomo II, 529p.;

- Tomo II, 103 p. 58 Notas Técnicas. Financiamento MCT / FINEP / Fundo Setorial CT-Hidro-2002.
- Ferreira, O.C., Martins Jr., P.P. 2005. Perfil de Maturidade da Bacia do rio Paracatu. Considerações sobre a Evolução da Bacia. Belo Horizonte: CETEC e UFOP / Memória Técnica. Nota Técnica – NT-CRHA 33/2005. 13p.
- Moreira, C. V. R; Martins Jr., P. P; Ferreira, O. C. 2002. Aplicação da Termodinâmica para a Avaliação do Equilíbrio de Redes Fluviais – A Bacia do Rio Santo Antonio, Belo Horizonte: CETEC, 2002.
- Strahler, A. N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. Handbook of applied hydrology. New York: McGraw-Hill. 1418p.
- Yang, C. T. 1971. Potential Energy and Stream Morphology, Water Resources Research, 7(2): 311-322.