

RECURSOS HÍDRICOS

VERIFICAÇÃO DA LEI DE HACK EM BACIAS EMBUTIDAS NO RIO GRANDE DO SUL

Mel Oliveira Guirro – mel.guirro@gmail.com
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Maurício Andrades Paixão – mauricio.paixao@ufrgs.br
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

João Vicente Zancan Godoy – joao.godoy@ufrgs.br
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Pedro Massochin Medeiros – pedro.medeiros@ufrgs.br
Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Masato Kobiyama – masato.kobiyama@ufrgs.br
Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Mariá Fischborn Baumbach – maribaumbach@yahoo.com.br
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo: A gestão de bacias hidrográficas, a gestão de recursos hídricos e a gestão de desastres naturais devem ser apoiadas pelos estudos científicos. Para auxiliar ao Comitê de bacia do rio Caí (RS), o presente trabalho teve como objetivo verificar a Lei de Hack na bacia do rio Caí, na bacia do arroio Forromeco e na bacia do arroio Jaguar. Elas se caracterizam por serem bacias embutidas. Usando a rede de drenagem do exército, o modelo digital de elevação ASTER e o contorno da bacia oficial da FEPAM, determinou-se o tamanho de bacias em diversos pontos (exutórios) e seus correspondentes comprimentos de rio principal em ambiente de SIG. Com valores obtidos na análise morfométrica, obteve-se os parâmetros e aplicou-se a Lei de Hack para as três bacias. Os resultados obtidos permitem concluir que a Lei de Hack foi válida, não havendo a influência do tamanho da bacia sobre o valor de expoente da Lei. Porém, houve “desvios” pontuais da Lei, devido ao deságue de um grande afluente no rio principal do Caí.

Palavras-chave: Lei de Hack; bacia do rio Caí; bacia do arroio Forromeco; bacia do arroio Jaguar.

1. INTRODUÇÃO

O excesso e a falta de água em relação ao tempo e ao espaço têm sido intensificados cada vez mais. Isto causa fenômenos naturais como inundações, escorregamentos e estiagens, além de ameaçar o saneamento básico. Kobiyama *et al.* (2011) relataram que uma ocorrência de escorregamento causou a suspensão da operação na estação de tratamento de água e consequente racionamento de água no município de Joinville/SC. De qualquer maneira, quando esses fenômenos naturais trazem prejuízos sócio-econômico-ambientais, a sociedade reconhece os desastres naturais (KOBİYAMA *et al.*, 2006).

Nessa circunstância, o governo brasileiro vem implementando a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e a Política Nacional de Saneamento (PNS). Embora este tipo de ação institucional seja necessário, a gestão de recursos hídricos, a gestão de desastres naturais e a gestão de saneamento devem ser tratadas conjuntamente com base na consideração da água como bem essencial para todos. Como a dinâmica da água está sendo governada pelo sistema chamado bacia hidrográfica, surge a importância da gestão de bacias hidrográficas.

No caso da gestão de bacias hidrográficas, os parâmetros hidrológicos e geomorfológicos são elementos fundamentais. Dentre os parâmetros hidrológicos, pode-se citar a chuva, a umidade do solo, a vazão, etc. Dentre os parâmetros geomorfológicos temos o tamanho da bacia, o comprimento do rio, a declividade de encosta, etc. Assim sendo, pode-se dizer que, para as gestões acima mencionadas, é indispensável investigar o comportamento de cada parâmetro e relação e/ou interação entre esses parâmetros.

Entre tais estudos geomorfológicos e hidrológicos, destaca-se Hack (1957), que investigou bacias do Vale de Shenandoah e suas montanhas adjacentes no Estado de Virginia, EUA. Neste estudo geomorfológico, o autor empiricamente estabeleceu a relação entre o tamanho da bacia e o comprimento do rio principal da própria bacia. Esta relação é denominada Lei de Hack e vem sendo discutida amplamente na área de hidrologia e de geomorfologia. Além disso, na área da matemática, Mandelbrot (1983) tratou desta Lei como um dos exemplos típicos da geometria fractal na natureza.

Estudando as redes fluviais ideais, onde a dissipação de energia seja minimizada através das bacias, Ijjasz-Vasquez *et al.* (1993) e Rigon *et al.* (1996, 1998) demonstraram que o desenvolvimento (evolução) da rede fluvial resulta do alongamento da bacia consistente à Lei. Historicamente, o valor de expoente da Lei tem sido discutido. Aplicando a teoria de percolação, Hunt (2015) demonstrou uma faixa desse valor, e que essa faixa diminui com o aumento do tamanho da bacia. Willemín (2000) relatou a validade ocasional da Lei, demonstrando que as bacias nem sempre se tornam mais alongadas com o aumento do tamanho da bacia. O autor comentou que a sinuosidade possui o papel mais importante na geometria da bacia.

Assim sendo, o objetivo do presente trabalho foi verificar a Lei de Hack em três bacias embutidas no estado do Rio Grande do Sul. Entre estas bacias, a principal é a bacia do rio Caí, composta por 40 municípios, sendo caracterizada por grande importância para a economia gaúcha (COMITÊ CAÍ, 2008). A bacia vem sofrendo com diversos desastres naturais e necessita de gestão adequada. Assim, o presente trabalho justifica sua importância para o Comitê do rio Caí.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área principal do presente estudo é a bacia hidrográfica do rio Caí (5.048,32 km²) e se localiza entre o planalto brasileiro e a depressão central, no nordeste do Rio Grande do Sul. Devido à importância econômica dessa bacia e também à alta frequência de ocorrência de inundações na mesma, a CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) implementou um sistema de monitoramento com 7 estações telemétricas. De acordo com a classificação de Köppen, o clima na bacia do rio Caí é de dois tipos: subtropical (Cfa) e temperado (Cfb) (PEDROLLO *et al.*, 2011). Segundo SEMA (2016), a litologia da bacia inclui: Depósitos Aluvionares, Depósitos Colúvio-aluviais, Depósitos de Barreira Holocênica (turfeiras), Fácies Caxias, Fácies Gramado, Formação Botucatu e Formação Pirambóia.

A bacia do arroio Forromeco (290,88 km²) é uma das sub-bacias do rio Caí, e está localizada nos municípios de Farroupilha, Barão, Carlos Barbosa, São Vendelino, Alto Feliz e Bom Princípio. Sua altitude varia de 60 m até 790 m acima do nível do mar, o que caracteriza uma paisagem declivosa. Tal geomorfologia traz à bacia um forte histórico de desastres hidrológicos na região (GODOY *et al.*, 2015). Um desses desastres ocorreu em 1982, quando uma forte inundação brusca invadiu o centro da cidade de São Vendelino.

Dentro da bacia do arroio Forromeco, a bacia do arroio Jaguar (25 km²), localizada nos municípios de Alto Feliz e São Vendelino, é a que possui maiores declividades, apresentando um típico ambiente montanhoso. A Figura 1 demonstra estas três bacias hidrográficas embutidas no estado de Rio Grande do Sul.

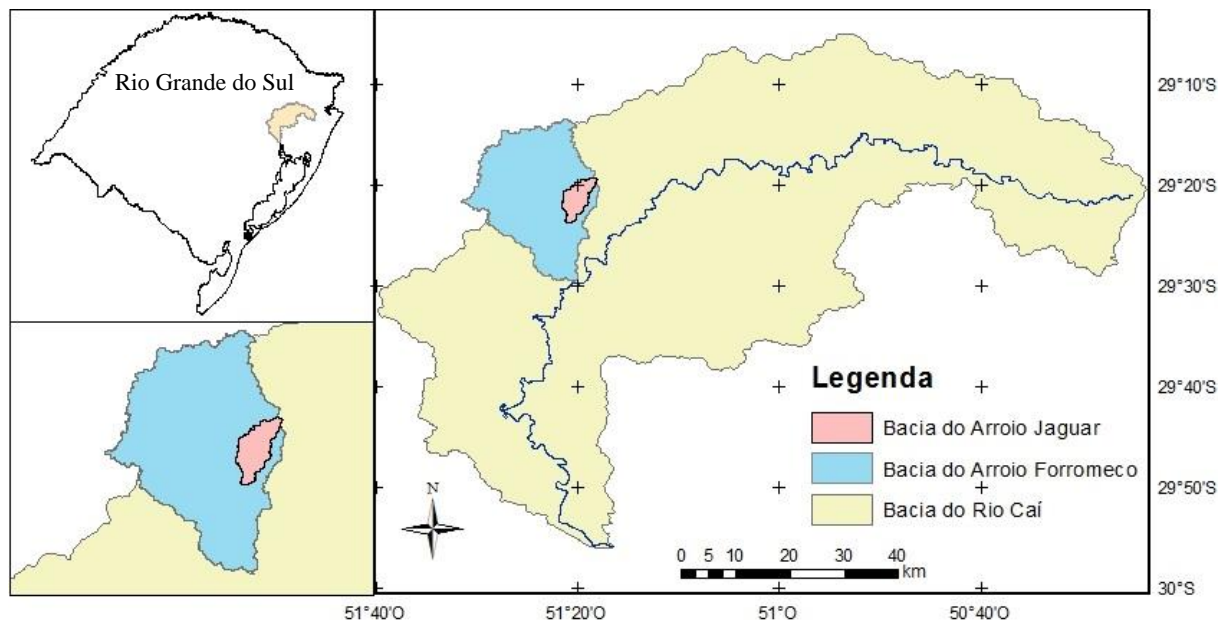


Figura 1 – Área de estudo: Bacias do arroio Jaguar, do arroio Forromeco e do Rio Caí.

2.2. Materiais

Foram utilizadas as redes de drenagens do exército, escala 1:50.000, e o Modelo Digital de Elevação (MDE) ASTER com resolução de 30 metros fornecido pela United States Geological Survey (USGS) disponível em www.usgs.gov. O contorno da bacia do Caí foi

gerado por meio do arquivo da FEPAM (2016). Com a utilização de geoprocessamento pelo *software* ArcGIS, foram corrigidas as deformações do MDE, o que o tornou hidrologicamente consistente. Assim, foi gerado um mapa de rede fluvial. Próximo ao exutório da bacia do rio Caí fez-se necessária fotointerpretação para corrigir a rede fluvial, devido à baixa declividade local.

2.3. Análise da bacia

Hack (1957) propôs a seguinte relação empírica e posteriormente confirmada por outros pesquisadores também de maneira empírica:

$$L = 1,5 \cdot A^{0,6} \quad (1)$$

onde A é a área da bacia (km²); e L é o comprimento do rio principal da bacia (km) do exutório até o local mais alto no divisor da bacia. Leopold *et al.* (1992) generalizaram a Equação (1) para:

$$L = k \cdot A^{0,6} \quad (2)$$

onde k é uma constante. Então, para verificar esta lei, o presente trabalho mediu os valores de A e L nos principais rios de três bacias hidrográficas.

O MDE foi utilizado para delimitação das bacias dos arroios Jaguar e Forromeco e do rio Caí e das sub-bacias. As duas maiores bacias, Caí e Forromeco, foram divididas em 20 sub-bacias enquanto a menor, Jaguar, dividida em 10 em função da combinação entre o comprimento do rio principal e comprimento de cada segmento. O comprimento do rio principal para cada sub-bacia é denotado da seguinte maneira:

$$L_i = \frac{n+1-i}{n} L \quad (3)$$

onde n é o número total de segmentos do rio principal ($n=20$ para Caí e Forromeco e $n=10$ para Jaguar); i se refere ao trecho de rio analisado; L_i é o comprimento do rio principal (km) de cada sub-bacia; e L é o comprimento total do rio principal da bacia (km).

O *software* CurveExpert Professional foi usado para estimar os valores dos parâmetros utilizados pela Lei de Hack. Sendo assim, a aplicabilidade da Lei foi verificada para as três bacias embutidas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Lei de Hack foi ajustada para as três bacias (Figura 2), sendo a equação (4) para a bacia do rio Caí, a equação (5) para a bacia do arroio Forromeco e a equação (6) para a bacia do arroio Jaguar:

$$L = 0,509 \cdot A^{0,725} \quad (4)$$

$$L = 0,481 \cdot A^{0,722} \quad (5)$$

$$L = 0,905 \cdot A^{0,747} \quad (6)$$

Com base na Figura 2 e nas Equações (4), (5) e (6), pode-se dizer que a Lei está adequada, já que os valores dos expoentes variam pouco em relação a Lei de Hack original, em que o valor do expoente é de 0,6. Observa-se que os três expoentes ficaram por volta de 0,7. Isto implica que este expoente não sofreu influência do tamanho da bacia. Esse resultado diverge do resultado de Rigon *et al.* (1996, 1998), os quais mencionaram a redução do expoente com o aumento da área da bacia.

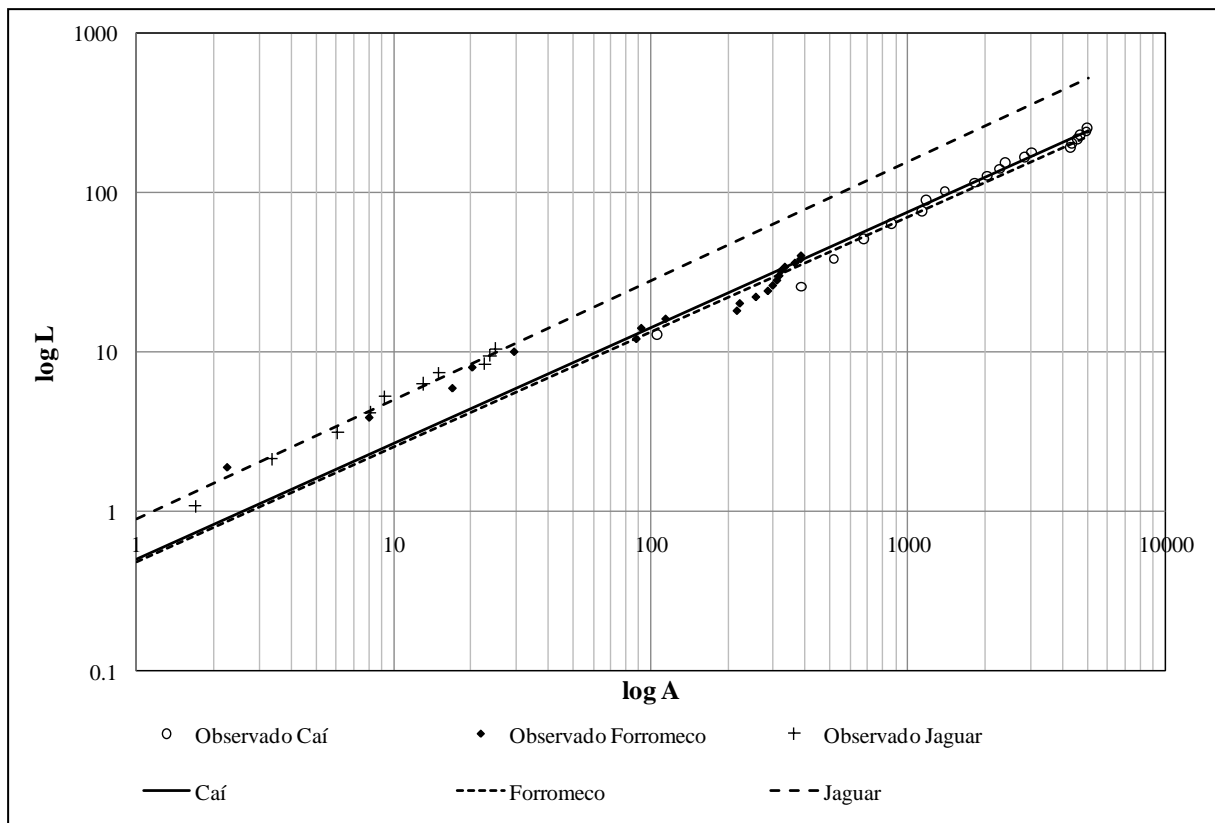


Figura 2 – Lei de Hack para as bacias do Caí, Forromeco e Jaguar

As linhas que apresentam a aplicação da Lei às bacias do rio Caí e do arroio Forromeco possuem grande similaridade, enquanto a linha da bacia do arroio Jaguar se difere principalmente devido ao valor elevado de sua interseção. Porém, todos os expoentes são bem similares, tornando as linhas paralelas. Observa-se que para os pontos iniciais do arroio Forromeco, quando a sub-bacia é pequena, os dados obtidos se comportam de forma semelhante ao Jaguar. Quando o comprimento do arroio Forromeco gera bacias de tamanho semelhante às menores sub-bacias do rio Caí, o comportamento dos dados obtidos do Forromeco se assemelha à curva do rio Caí.

Nos dados obtidos constataram-se “desvios” referentes a contribuições de afluentes com área de contribuição acima do esperado pela Lei de Hack. A área de contribuição específica, que é equivalente à largura média da bacia (B) proposta por Horton (1932), no rio Caí se apresenta como 19,23 km²/km. Isto é, a cada quilometro de rio sua área de contribuição acresce em média 19,23 km². A Figura 3 demonstra o ajuste da Lei para a bacia do rio Caí. Há um momento em que, mesmo com o acréscimo de somente 12,9 km de comprimento do rio principal, a área da bacia aumentou quase 1000 km². Se compararmos com a largura média da

bacia em um trecho de 12,9km o acréscimo poderia ser de apenas 248km². Isso se deve ao fato de que um grande afluente do rio desembocou no rio principal, o rio Cadeia (Figura 4).

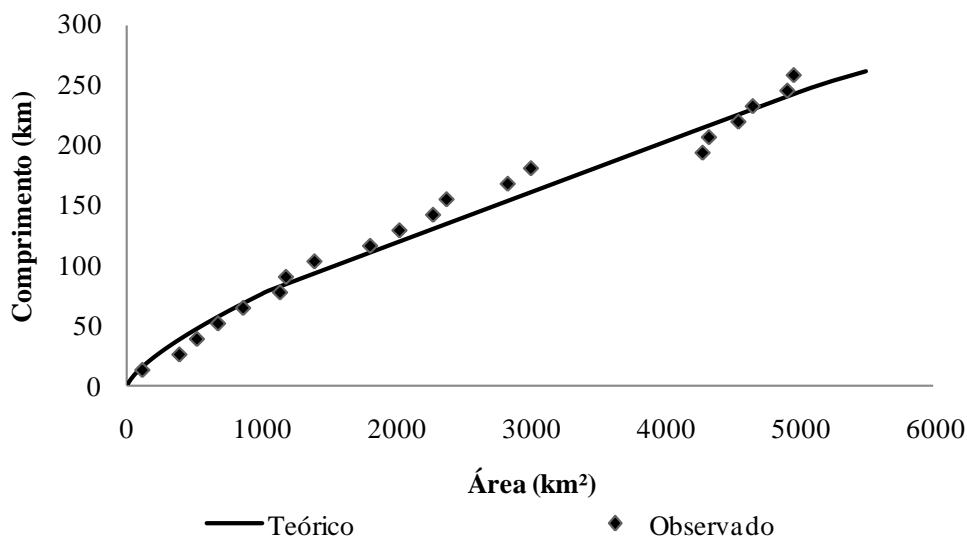


Figura 3 – Lei de Hack para a bacia do rio Caí

O rio Cadeia deságua no trecho que fica entre a 6° e 7° sub-bacia do Caí. Possui 816 km² de área, ou seja, 16,4% da área total da bacia do Caí. Ou ainda, se comparamos a área da bacia do Cadeia com os 248 km² de área esperados pela lei de Hack em um trecho de 12,9 km do Rio Caí, a confluência do rio Cadeia com o Caí representa por si só um acréscimo de 229% na área de contribuição prevista pela da lei de Hack.

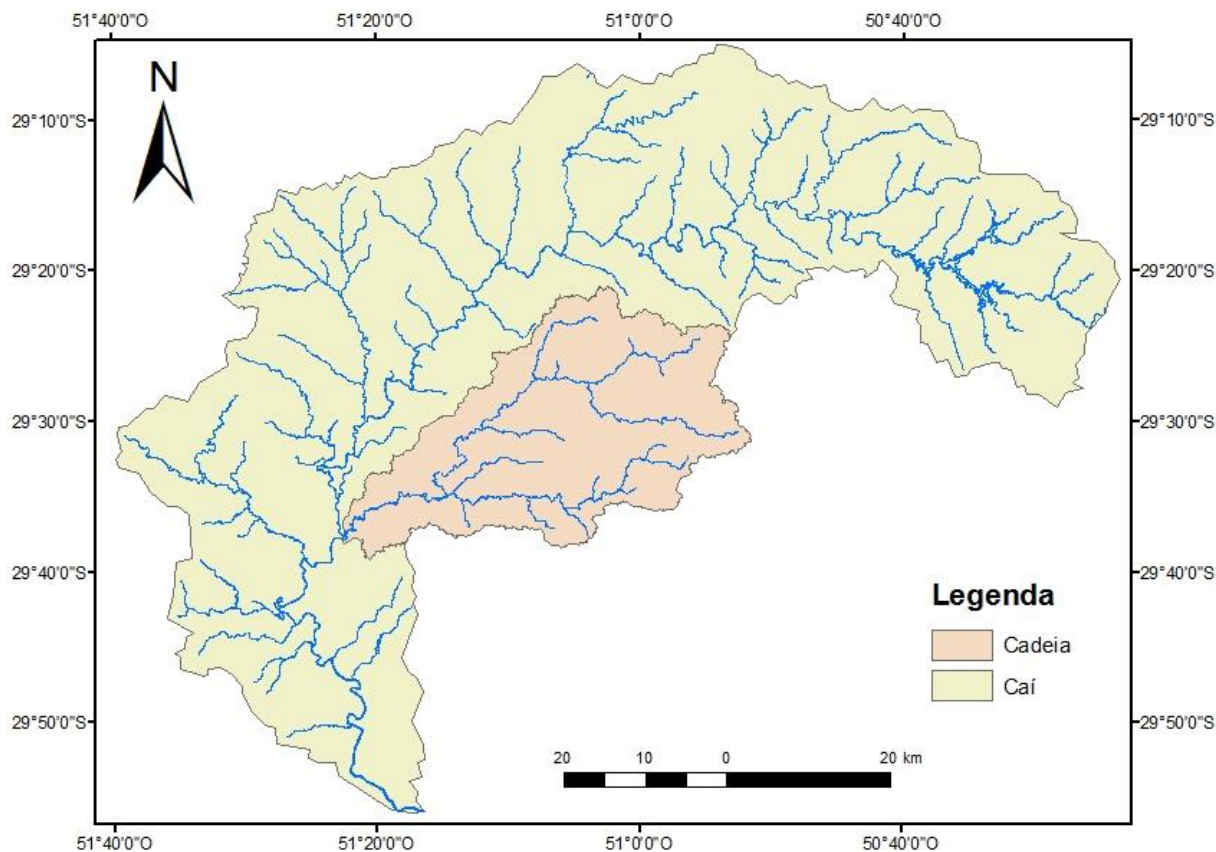


Figura 4 – Bacia do rio Cadeia embutida na bacia do Caí.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para elaborar um estudo básico e científico para a bacia do rio Caí, o presente trabalho aplicou a Lei de Hack tanto para a bacia do rio Caí quanto para mais duas bacias embutidas (bacia do arroio Forromeco e do arroio Jaguar). Verificou-se que a Lei de Hack foi válida para as três bacias. O valor do expoente é aproximadamente de 0,7 e não sofreu a influência do tamanho da bacia. A maior diferença na aplicação da Lei deve-se o valor de interseção, em que a bacia do Jaguar obteve um número mais elevado. A bacia de tamanho intermediário, a do arroio Forromeco, comporta-se ora como a bacia menor e ora como a bacia maior, dependendo do tamanho de suas sub-bacias.

Verificam-se “desvios” nos pontos observados para o ajuste da Lei de Hack, onde um pequeno incremento do comprimento do rio principal provocou um grande aumento da área da bacia. Para trabalhos futuros, recomenda-se estudo detalhado desses “desvios”, ou seja, analisar mais pontos onde há o desvio.

Agradecimentos

O presente trabalho teve apoio financeiro dos projetos “Bacia-escola para gestão participativa de desastres naturais e recursos hídricos” pelo MEC/PROEXT 2015 e “Aprender hidrologia para prevenção de desastres naturais” pelo Edital Extensão-UFRGS. Os autores agradecem aos membros do Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS pelas discussões sobre as bacias estudadas.

REFERÊNCIAS

FEPAM **Unidade de Paisagem Natural x Bacias Hidrográficas**. Disponível em <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp> Acesso em 14 abr 2016.

GODOY, J.V.Z.; BAUMBACH, M.F.; MICHEL, G.P.; ZAMBRANO, F.C.; BARRAGÁN, M.L.M.; KOBIYAMA, M. Análise estatística de chuva na região da bacia do arroio Forromeco, RS, Brasil. In XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Brasília: 2015) **Anais**, ABRH, 2015. 8p.

HACK, J.T. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. **USGS. Prof. Paper**, n.294B, p.45-97, 1957.

HORTON, R.E. Drainage basin characteristics. **American Geophysical Union Transaction**, v.13, p.350-361, 1932.

HUNT, A.G. Explanation of the values of Hack's drainage basin, river length scaling exponent. **Nonlinear Processes in Geophysics. Discussions**, v.2, p.1355–1361, 2015.

IJJASZ-VASQUEZ, E.J.; BRAS, R.L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Hack's relation and optimal channel networks: The elongation of river basins as a consequence of energy minimization. **Geophysics Research Letter**, v.20, p.1583-1586, 1993.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI,

G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109p.

KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; GRISON, F.; GIGLIO, J.N. Landslide influence on turbidity and total solids in Cubatão do Norte River, Santa Catarina, Brazil. **Natural Hazards**, v.59, n.2, p.1077-1086, 2011.

LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.G.; MILLER, J.P. **Fluvial processes in geomorphology**. New York: Dover Pub., 1992. 522p.

MANDELBROT, B.B. **The Fractal Geometry of Nature**. New York: W.H. Freeman, 1983. 468p.

PEDROLLO, M.; GERMANO, A.; SOTÉRIO, P.; RODRIGUES, É.; MADUELL, J.C. Alerta hidrológico da bacia do rio Caí: concepção e implantação do sistema. In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Maceió: 2011) **Anais**, ABRH, 2011. 14p.

RIGON, R.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; MARITAN, A.; GIACOMETTI, A.; TARBOTON, D.G.; RINALDO, A. On Hack's law. **Water Resources Research**, v.32, p.3367-3374, 1996.

RIGON, R.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; RINALDO, A. Feasible optimality implies Hack's law. **Water Resources Research**, v.34, p.3181-3189, 1998.

SEMA. RIO GRANDE DO SUL. **Mapa de geologia da bacia do Caí**. Disponível em: <<http://www.smad.rs.gov.br/downloads/mapas/cai/RS-Mapa711-A3-Geologia.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2016.

WILLEMIN, J.H. Hack's law: Sinuosity, convexity, elongation. **Water Resources Research**, v.36, p.3365-31374, 2000.