



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 14, nº 1 (2013)



ANÁLISE MORFOMÉTRICA DE BACIAS DE CABECEIRA COMO FERRAMENTA DE INVESTIGAÇÃO GEOMORFOLÓGICA EM MÉDIA E LARGA-ESCALA ESPACIAL

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF HEADWATERS AS GEOMORPHOLOGICAL RESEARCH TOOL ON MEDIUM AND LARGE-SCALE

Chrystiann Lavarini

Pós-Graduação em Geografia e Análise Ambiental - UFMG - Instituto de Geociências/Campus Pampulha/UFMG, Av. Antônio Carlos, 6.627, Pampulha, Belo Horizonte, MG - CEP 31270-901.

E-mail: lavarini.c@gmail.com

Antônio Pereira Magalhães Júnior

Departamento de Geografia - UFMG - Instituto de Geociências/Campus Pampulha/UFMG, Av. Antônio Carlos, 6.627, Pampulha, Belo Horizonte, MG - CEP 31270-901.

E-mail: magalhaesufmg@yahoo.com.br

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
22/07/2012

Data de Aprovação:
06/07/2013

Palavras-chave:

Modelagem geomorfológica; geoestatística; bacia do Rio das Velhas.

Keywords:

Geomorphological modelling; geostatistics; Rio das Velhas watershed.

Resumo

Apesar das bacias de cabeceira abrangerem grande parte da área das bacias hidrográficas, elas detêm, ainda hoje, uma quantidade de estudos muito inferior aos segmentos fluviais de ordem hierárquica elevada. O papel das zonas de cabeceira na configuração de unidades geomorfológicas como bacias hidrográficas, redes hidrográficas e compartimentos morfológicos pode ser analisado a partir da análise morfométrica. Este trabalho buscou justamente investigar a relevância da análise morfométrica de bacias de cabeceira como ferramenta para a compreensão da configuração de unidades geomorfológicas de média e larga-escala espacial. Para tanto, adotou-se como estudos de caso, as bacias de cabeceira do Ribeirão da Mata e do Córrego Jaguará, pertencentes ao Alto-Médio Curso do Rio das Velhas, em Minas Gerais. Em sua essência, foram analisados os arranjos espaciais, os padrões morfológicos e os fatores condicionantes da gênese e evolução dessas bacias, visando estabelecer relações com a configuração geomorfológica do modelado e da rede hidrográfica. Para este fim, foram amostradas 482 bacias de cabeceira, seguidos de análises morfométricas e estatísticas em ambiente computacional. Os resultados indicam que nas áreas das bacias de cabeceira a variação altimétrica do coletor principal é acentuadamente maior, prevalecendo um gradiente energético elevado e, portanto, um ambiente com maior potencial erosivo em comparação ao padrão menos declivoso e mais próximo do estado de equilíbrio ideal dos cursos fluviais principais. Foram diagnosticadas também fortes influências estruturais na densidade de bacias de cabeceira na paisagem e, por conseguinte, no desenvolvimento das formas de relevo. Ademais, nas porções drenadas sobre o Embasamento Cristalino, e mesmo nos calcissiltitos do Membro Pedro Leopoldo, os valores exibiram uma tendência geral a gradações mais uniformes das cotas altimétricas em função do aumento de área se comparadas aos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Assim, considerando a localização e a morfometria das bacias

de cabeceira é possível estabelecer três compartimentos regionais: (i) as porções elevadas sobre Embasamento Cristalino; (ii) as porções em altitude intermediária, no médio e baixo curso do Ribeirão da Mata, sob o substrato granito-gnássico e os carbonatos do Membro Pedro Leopoldo; e (iii) o modelado flúvio-cárstico do Planalto de Lagoa Santa, desenvolvido sobre o Membro Lagoa Santa. Com efeito, tais resultados demonstram a relevância dos estudos de bacias de cabeceira no Médio Curso do Rio das Velhas, e igualmente aventam a sua utilização como ferramenta metodológica para investigações em média e larga-escala espacial.

Abstract

Despite the headwaters cover most of the catchment areas, even nowadays they hold a much lower number of studies compared to the higher hierarchical order river segments. The role of headwater areas on the configuration of geomorphological units as watersheds, fluvial systems and morphological compartments might be analyzed through the morphometric analysis. This paper aims to investigate the relevance of morphometric analysis of headwaters and pretends to help in the understanding of the configuration in the geomorphological units at medium and large-scale. For this purpose, we have adopted as case studies the headwaters of Ribeirão da Mata and Córrego Jaguará watersheds which belong to the Upper-Middle Course of Rio das Velhas watershed in Minas Gerais state. In essence, we have attempted to analyze the spatial arrangements, the morphological patterns and the genesis and evolution driving factors of headwaters, in order to link them both to the geomorphological pattern and to the fluvial network. We sampled 482 headwaters and then morphometric and statistical analysis were carried out in computational environment. The results indicate that in headwater areas the height variation in main rivers is markedly higher when compared to the watershed's main rivers. The former has high energy and therefore a more potential erosive environment while the last one is less sloping and much closer to the ideal equilibrium of watershed's main rivers. It was verified strong structural influences on the density of headwaters in the landscape and therefore in the development of landforms. Moreover, in the drained portions of the basement rocks, and even in calcisiltites of Pedro Leopoldo Member, the values exhibited a general trend to more uniform altitude variation caused by area increase in comparison to the metapelites of Serra de Santa Helena Formation. Considering the location and the morphometry results the headwaters might be divided into three compartments: (i) the highest portions on Basement; (ii) the portions of intermediate altitude, in the Middle-Lower Course of Ribeirão da Mata watershed located on the substrate and carbonates of Pedro Leopoldo Member; and (iii) the fluvio-karstic landscape of Lagoa Santa plateau, developed on the Lagoa Santa Member. Indeed, these results confirm the relevance of headwaters studies not only in the Middle Course of Rio das Velhas, but also to other areas with research objectives related to medium and large-scale spatial analysis.

Introdução

Strahler (1957) foi o primeiro pesquisador a definir as bacias de cabeceira (*headwater*) como compartimentos detentores de canais de primeira e segunda-ordem, estando essa classificação hierárquica diretamente atrelada à escala do mapa ou à resolução espacial da imagem trabalhada. Tal definição conceitual ainda é bastante usual na literatura, bem como na pesquisa geomorfológica, sobretudo nos países anglo-saxões (VIANELLO *et al.*, 2009; NICKOLOTSKY e PAVLOWSKY, 2007).

Historicamente, desde os primórdios dos estudos geomorfológicos, com as pesquisas de Gilbert (1877), Davis (1899) e King (1953), têm-se tratado os processos e produtos morfogenéticos em média e larga-escala de análise espacial, englobando, de forma indireta, as bacias de cabeceira. Todavia, foi somente a partir de Horton (1945) e, sobretudo Strahler (1957), com a substituição das descrições pelos aspectos quantitativos da morfometria, que as porções iniciais da rede de drenagem receberam acentuado volume de pesquisas específicas e, em sentido inverso, passaram a realimentar dados em outras escalas de análise espacial.

Apesar da relevância destes compartimentos, estas bacias detêm, ainda hoje, uma quantidade de estudos muito inferior àqueles segmentos fluviais de ordem hierárquica mais elevada (BENDA *et al.*, 2005; GOMI *et al.*, 2002). Fato esse pouco justificável, uma vez que, além de controlar a dinâmica hidrossedimentológica e biológica dos segmentos de jusante (MONTGOMERY e BUFFINGTON, 1997), as bacias de cabeceira possuem entre 60 e 80% da dimensão espacial das bacias hidrográficas (MEYER e WALLACE, 2001; SIDLE *et al.*, 2000), e 70 a 80% da extensão total da rede de drenagem (SCHUMM, 1956; SHREVE, 1969). Além disso, na escala temporal de longo-termo (*Cyclic Time*) esses elementos são responsáveis pela expansão da rede de drenagem e seus fenômenos consequentes, como capturas fluviais e inversões de relevo, influenciando, por conseguinte, a morfogênese de toda a bacia hidrográfica (COELHO-NETTO, 2003; SCHUMM, 1977).

Em vista dessas informações, este trabalho traz os resultados de pesquisas sobre a relevância da análise morfométrica de bacias de cabeceira para o entendimento da configuração geomorfológica e da rede hidrográfica, adotando-se, como estudos de caso, as bacias de cabeceira do Ribeirão

da Mata e do Córrego Jaguará, pertencentes ao Alto-Médio Curso do Rio das Velhas, em Minas Gerais.

Buscou-se analisar os arranjos espaciais, os padrões morfológicos e os fatores condicionantes da gênese e evolução das bacias de cabeceira, a fim de estabelecer relações com a estruturação de unidades geomorfológicas de média e larga escala espacial.

Estas áreas foram selecionadas em virtude de diferenças litoestruturais que permitiram uma evolução geomorfológica predominantemente superficial, nos ambientes granito-gnássicos, e subsuperficial, nos compartimentos localizados sobre rochas carbonáticas (KOHLER, 1989; KARFUNKEL *et al.*, 2006). Desta forma, ao considerar estas diferenças, pressupõe-se que tais áreas sejam propícias à verificação da análise morfométrica de bacias de cabeceira em regiões com

características geomorfológicas distintas, o que serviria como um procedimento de teste às possibilidades de aplicação em outros estudos.

Além disso, embora seja um dos flúviocarstes mais representativos do Grupo Bambuí (KOHLER, 1989), mencionados desde os trabalhos pioneiros de Eschwege (1833), este foi o primeiro trabalho de pesquisa envolvendo especificamente as bacias de cabeceira da região.

Áreas de Estudo

Foram investigadas as bacias de cabeceira situadas nas bacias hidrográficas do Ribeirão da Mata e do Córrego Jaguará, inseridos no Alto-Médio Curso do Rio das Velhas a aproximadamente 35 km de Belo Horizonte.

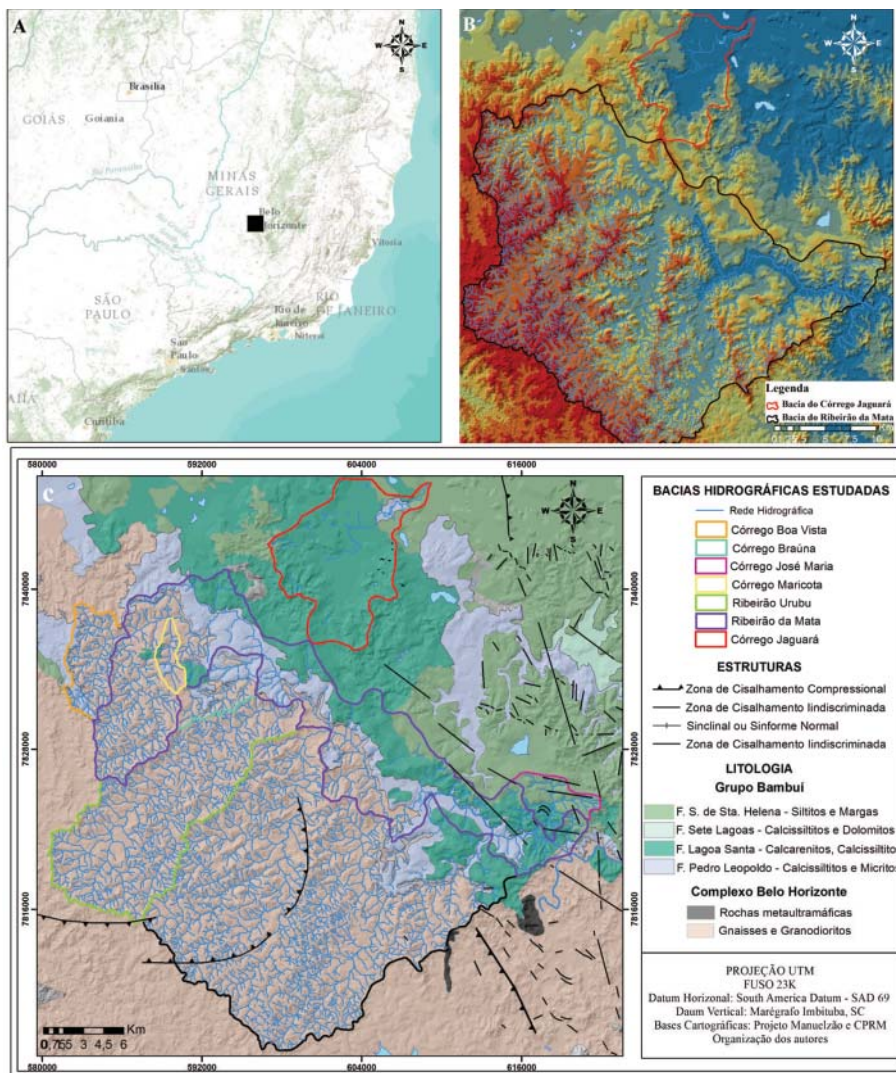


Figura 1 – (A) Localização das bacias do Ribeirão da Mata e Córrego Jaguará; (B) configuração do relevo e altimetria regional; (C) compartimentação litoestrutural nas bacias supracitadas.

O padrão de drenagem predominante das sub-bacias do Ribeirão da Mata é do tipo dendrítico, com direção principal NW-SE. A densidade de drenagem é visualmente superior nos afluentes da margem direita, nos granito-gnaisses do Embasamento Cristalino (Complexo Belo Horizonte), em relação à densidade nos calcissiltitos dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa (margem esquerda), onde prevalecem feições relacionadas à dinâmica fluvio cárstica (Figura 1). O Córrego José Maria situa-se sobre folhelhos e siltitos da Formação Serra de Santa Helena, verificando-se uma série de lineamentos estruturais compressoriais.

Em termos morfogenéticos, Kohler (1989) formulou a hipótese de paleodrenagem do vale do Ribeirão da Mata ocupado pelo Rio das Velhas fluindo para NW com base em indícios de campo e da direção anômala do vale. Karfunkel *et al.* (2006) e Pagung (2007) a partir da mesma anomalia de drenagem descrita por Kohler (1989), registraram a existência de um gráben denominado Vespasiano – Pedro Leopoldo, com direção preferencial NW-SE.

Localizada no Planalto de Lagoa Santa, a bacia do Córrego Jaguará está completamente inserida em calcissiltitos. Neste interflúvio (700-800 m), denominado Planalto de Lagoa Santa, estão presentes quase todas as feições características de um carste tropical, além de numerosas microformas cársticas (TRICART, 1956 *apud* MAGALHÃES JR., 1993).

Procedimentos Metodológicos

Em vista dos objetivos de larga-escala espacial e a extensão da área investigada- aproximadamente 800 km²- optou-se pela amostragem das bacias de cabeceira presentes nas porções do alto curso do Ribeirão da Mata; do médio curso do Ribeirão Urubu, e do baixo curso do Córrego José Maria. Para estes dois últimos, foram adotados critérios estatísticos de amostragem estratificada. Este procedimento foi realizado por meio do agrupamento de todas as bacias hidrográficas na classe “Médio” e “Baixo Curso” e, em seguida, fez-se a escolha randômica dessas amostras.

As bacias de cabeceira do Ribeirão da Mata e do Córrego Jaguará foram inteiramente mapeadas em vista da extensão relevante de seus canais principais e suas diferenciações litológicas. As bacias de drenagem do Alto Curso também tiveram todas as suas bacias de cabeceira mapeadas, haja vista a variabilidade intrínseca destes ambientes (BURT, 1992) e a importância desses comportamentos “não-equilibrados” na compreensão do modelado (HACK, 1960).

Posteriormente ao mapeamento destas unidades, foram utilizadas técnicas geomorfométricas difundidas na literatura científica (HORTON, 1945; STRAHLER, 1957; CHRISTOFOLETTI, 1980), a saber: Índice de Circula-

ridade (IC); Densidade de Drenagem (Dd); Coeficiente de Manutenção (Cm); Relação de Relevo (Rr); Índice de Rugosidade (Ir); e Extensão do Percurso Superficial (EPS). As técnicas estatísticas utilizadas para verificação de hipóteses e relações entre os parâmetros mensurados foram o Coeficiente de Correlação de Pearson (*p*) e a Análise de Regressão Linear Simples, com seus respectivos Coeficientes de Determinação (R²) e Testes-F para verificação da adequabilidade dos modelos, com intervalo de confiança (1- α) de 95%.

Todos esses procedimentos foram realizados em bases cartográficas de escala 1:50.000 disponibilizadas pelo Projeto Manuelzão da UFMG e CPRM, sendo trabalhadas no *software* ArcGIS 9.3.

Análise Morfométrica das Bacias de Cabeceira e Suas Relações com as Interpretações Espaciais de Média e Larga-Escala

Considerando-se a terminologia empregada por Strahler (1957), e a escala adotada no mapeamento, foram contabilizados um total de 482 bacias de cabeceira, sendo: 50 na bacia do Córrego Boa Vista, 19 em todo o Córrego Braúna, 17 no Córrego José Maria, 8 no Córrego Maricota, 208 na bacia do Córrego Urubu, 172 no Ribeirão da Mata e, 8 no Córrego Jaguará (Figura 2).

Como é possível constatar, o padrão de distribuição das bacias de cabeceira no Ribeirão da Mata conforma-se, essencialmente, à faixa representada pelos afluentes da margem direita, orientados de forma quase perpendicular à rede de drenagem dos vales principais, que possuem sentido geral NW-SE. No Planalto de Lagoa Santa, a bacia do Córrego Jaguará, com direção do fluxo SSW-NNE, possui, ao contrário das anteriores, seis de suas sete cabeceiras orientadas neste sentido, estando todas, sem exceção, desconectadas da rede de drenagem principal. Sabendo-se que o direcionamento e a morfologia desses vales fluviais tende a formar uma rede de drenagem contínua, e que o grau de carstificação do Planalto de Lagoa Santa é bastante elevado, o que favoreceu a existência de vales secos (KOHLENER, 1989), é muito provável que tais vales formassem uma rede hidrográfica homogênea e contínua no passado geológico.

Em termos litológicos, as cabeceiras do Ribeirão da Mata situadas nas porções mais elevadas (850-1050 m), próximas à linha divisora da bacia, são compostas em sua maioria por rochas do Complexo Belo Horizonte. Além disso, duas das seis bacias afluentes do Ribeirão da Mata possuem grande parte de suas cabeceiras sobre substrato granito-gnáissico (Ribeirão Urubu e Córrego Boa Vista, com 99% e 51% das cabeceiras neste litotipo, respectivamente) (Tabelas 1 e 2).

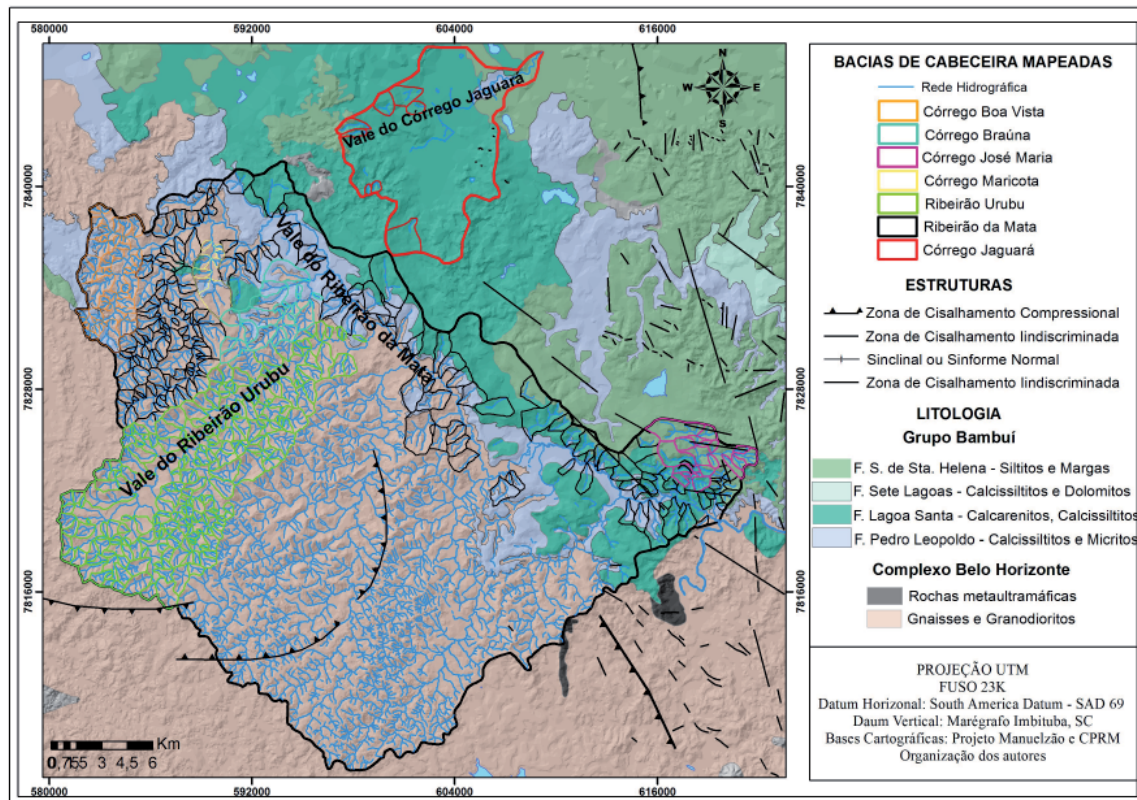


Figura 2 – Bacias de cabeceira do Córrego Jaguará e de segmentos do Ribeirão da Mata em relação à sua configuração litoestrutural. Destaque para os vales principais.

Tabela 1 - Área Ocupada por bacias de cabeceira em função da litologia.

Bacias Hidrográficas (Km²)	Complexo B.H.	M. P. Leopoldo	M. Lagoa Santa	F.S. Sta. Helena	Lit. Transicionais
Ribeirão Urubu	92.89	----	----	----	0.52
Córrego José Maria	12.20	----	1.11	7.63	----
Córrego Braúna	4.33	0.35	----	----	11.04
Córrego Boa Vista	9.40	0.31	----	----	8.88
Ribeirão da Mata	36.96	4.93	1.80	0.93	86.21
Córrego Maricota	0.79	----	----	----	4.59
Córrego Jaguará	----	----	9.06	----	----
Valores Totais	156.56	5.59	11.97	8.56	111.23
Percentuais Totais	0.55	0.02	0.01	0.03	0.39

Tabela 2 - Percentual de área ocupada por vales de cabeceira em cada bacia hidrográfica analisada em função da litologia.

Bacias Hidrográficas (%)	Complexo B.H.	M. P. Leopoldo	M. Lagoa Santa	F.S. Sta. Helena	Lit. Transicionais
Ribeirão Urubu	99 %	----	----	----	1 %
Córrego José Maria	58 %	----	5 %	36 %	----
Córrego Braúna	28 %	2 %	----	----	70 %
Córrego Boa Vista	51 %	2 %	----	----	48 %
Ribeirão da Mata	28 %	4 %	1 %	1 %	66 %
Córrego Maricota	15 %	----	----	----	85 %
Córrego Jaguará	----	----	100 %	----	----
Percentuais Totais	55 %	2 %	1 %	3 %	39 %

No que concerne aos dados morfométricos, as bacias de cabeceira dos Córregos Boa Vista e Braúna apresentaram os valores mais altos de determinação estatística (R^2) entre amplitude altimétrica e área (Figuras 3 e 4). Em outras palavras, sabendo-se que R^2 indica o quanto da variância da variável resposta Y (altimetria) é explicada pela variância da variável explicativa X (área), pode-se afirmar que 62,2% e 61,4% da variância da amplitude altimétrica das bacias de cabeceira dos Córregos Braúna e Boa Vista, respectivamente, são explicadas pela variância de área, enquanto 37,8% e 38,6% da variância destes mesmos dados são explicadas por variáveis não diagnosticadas.

As bacias de cabeceira do Ribeirão Urubu e do Córrego Boa Vista, embora situados, predominantemente, sobre o Embasamento Cristalino (CPRM, 2002), apresentaram valores de R^2 diferenciados entre si. Enquanto no Ribeirão Urubu, 45,7% das variáveis explicativas não foram diagnosticadas na análise de regressão (R^2), esse valor foi de 38,6% para o Córrego Boa Vista, o que torna possível admitir a existência de pelo menos mais uma variável ambiental condicionando a altimetria diagnosticada naquela bacia ou, ainda, que a(s) mesma(s) variável(eis) não diagnosticada(s) no Córrego Boa Vista estejam atuantes, porém com uma influência nitidamente superior no Ribeirão Urubu (Figura 5).

Partindo-se desse axioma estatístico e da confirmação de geoestruturas compressionais no Ribeirão Urubu – que estão ausentes no Córrego Boa Vista (CPRM, 2002) – é possível inferir que esses elementos estejam se comportando como uma das variáveis não mensuradas na análise de regressão (R^2). Complementando essa hipótese do condicionamento estrutural, as bacias de cabeceira do Ribeirão Urubu, registraram 1,34 vezes mais cursos fluviais por Km² (Dd) que o segundo maior valor mensurado (Córrego Boa Vista) (Tabelas 3 e 4).

Sendo assim, admitindo-se a influência estrutural na geração, quantidade e direção de fluxos hídricos, e ainda, na elaboração da morfologia regional (SUMMERFIELD, 1991), é justificável considerar que essa seja uma das variáveis responsáveis pela diferenciação da amplitude altimétrica e da Dd nas cabeceiras do Ribeirão Urubu, reduzindo, conseqüentemente, o poder explicativo da variável área, o que teoricamente não ocorreria em casos de variações lineares, típicas de estados de equilíbrio dinâmico (HACK, 1960).

Em termos morfométricos e espaciais, dentre os valores de Dd obtidos, os mais elevados se circunscrevem, novamente, às bacias de montante sobre substrato granítico (Córrego Boa Vista, Ribeirão Urubu). Exceção é feita ao Córrego Braúna que, a despeito de localizar-se a montante, detém grande parte de sua área sobre rochas carbonáticas, e possui, ao mesmo tempo, o terceiro valor mais elevado de Dd .

Tabela 3 - Análise morfométrica das bacias hidrográficas pesquisadas.

<i>Parâmetros Amostrados nas Bacias Hidrográficas</i>							
Bacias	IC	Dd (km/ km ²)	Cm (m ² /m)	Rr (m/ Km)	Ir	Eps (km)	Kc
Ribeirão Urubu	0.388	3.052	327.663	11.824	1022.391	0.16383	1.594
Córrego José Maria	0.446	1.952	512.224	25.333	390.454	0.25611	1.486
Córrego Braúna	0.537	2.117	472.455	28.119	565.133	0.23623	1.355
Córrego Boa Vista	0.489	3.153	317.142	18.147	599.100	0.15857	1.420
Ribeirão da Mata	0.121	1.772	564.207	9.597	661.105	0.28210	2.851
Córrego Maricota	0.520	2.063	484.654	31.334	321.879	0.24233	1.377
Córrego Jaguará	0.493	0.403	2481.688	11.830	102.350	1.24084	1.414
Médias	0.428	2.073	737.148	19.455	523.202	0.369	1.643
Desv. Padrão	0.133	0.847	717.318	8.159	270.184	0.359	0.499
Coef. Variação	31.142	40.851	97.310	41.937	51.640	97.310	30.364

Tabela 4 - Análise Morfométrica dos vales de cabeceira pesquisados. Detalhe para a correlação (p) existente entre os dados dos vales de cabeceira e das bacias de drenagem.

<i>Parâmetros Amostrados nos Vales de Cabeceira</i>							
PRINCIPAL	IC	Dd (km/ km ²)	Cm (m ² /m)	Rr (m/ Km)	Ir	Eps	KC
Ribeirão Urubu	0.691	5.188	373.756	97.267	330.569	2.594	1.202
Córrego José Maria	0.666	2.403	480.473	85.692	192.256	1.202	1.229
Córrego Braúna	0.670	2.981	473.677	78.448	225.596	1.491	1.222
Córrego Boa Vista	0.712	3.864	288.745	100.517	251.212	1.932	1.185
Ribeirão da Mata	0.677	2.768	438.896	94.476	231.455	1.384	0.100
Córrego Maricota	0.734	3.250	388.212	87.668	209.497	1.625	1.161
Córrego Jaguará	0.742	1.678	1079.468	107.916	216.129	0.839	0.143
Médias	0.699	3.162	503.318	93.141	236.673	1.581	0.891
Desv. Padrão	0.029	1.040	243.069	9.203	41.938	0.520	0.488
Coef. De Variação	4.086	32.891	48.293	9.880	17.720	32.891	54.711
Correlação (p)	0.381	0.879	0.984	-0.767	0.842	0.879	-0.637

O parâmetro *Ir* evidencia, além da relação entre densidade de drenagem e amplitude altimétrica, o grau de dissecação fluvial de uma paisagem (FERREIRA, 2010). Com efeito, pode-se considerar que o Ribeirão Urubu representa o compartimento mais dissecado no universo amostral, com índice 1,54 vezes superior ao Ribeirão da Mata, que detém o segundo maior valor. Ademais, a bacia do Córrego Urubu deteve, concomitantemente, os valores mais altos de *Dd* e *Ir* tanto nos vales de cabeceira quanto na sua bacia, reiterando novamente a hipótese de maior grau de esculturação desta em relação aos demais sítios investigados.

De uma maneira geral, as bacias de cabeceira do Alto Curso, detêm valores de *Dd*, em média, 1,6 vezes superior àqueles localizados nas proximidades da foz. Parâmetros como *Ir* e *Cm*, que são dependentes da *Dd*, seguiram essa mesma tendência, com valores 1,1 e 1,6 vezes mais elevados no Alto Curso, respectivamente. Somente a *Rr* apresentou recuo, com cerca de 10% menos declividade nas cabeceiras do Alto Curso em relação ao Baixo Curso. Os vales principais das bacias, como um todo, também apresentaram proporções similares, com única diferença na *Rr*, que, ao contrário das bacias de cabeceira, deteve um valor médio 1,4 vezes superior no Alto Curso.

Mais a jusante, nos Cursos Médio e Baixo, as bacias de cabeceira localizadas sobre rochas do Membro Pedro Leopoldo e da Formação Serra de Santa Helena se estruturaram em uma faixa transversal de sentido NW-SE, nas porções menos elevadas do relevo (800-640 m). Dentre as cabeceiras de drenagem investigadas, as localizadas na bacia do Córrego José Maria foram as únicas, além do Ribeirão Urubu e Baixo Ribeirão da Mata, a possuir estruturas compressoriais mapeadas por CPRM (2002), com aparente condicionamento estrutural da rede de drenagem e das cabeceiras nele inseridas. Estas bacias – Ribeirão da Mata, Córrego Braúna e Córrego José Maria – detêm 67%, 70% e 63%, respectivamente, de suas cabeceiras sob faixas transicionais entre granito-gnaisses, carbonatos e metapelitos. Por sua vez, os vales de cabeceira do Córrego Jaguará estão entre os de menor valor altimétrico (~ 650 m) e se situam exclusivamente sob os calcissiltitos do Membro Lagoa Santa.

Outra característica relevante da espacialização refere-se ao percentual de área ocupada pelas bacias de cabeceira em cada bacia hidrográfica (Tabela 5). A variação apresentada neste caso também parece reafirmar a lógica entre a existência de fluxos em canais superficiais e possíveis influências das rochas carbonáticas. As bacias hidrográficas situadas sobre o Embasamento Cristalino apresentaram valores superiores de ocupação por bacias de cabeceira, se comparadas às bacias localizadas sobre os domínios dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, assim como em suas transições.

Tabela 5 – Relações areais entre os vales de cabeceira pesquisados e suas bacias. Detalhe para a ocupação diferencial das bacias por vales de cabeceiras.

Bacia Hidrográfica	Bacias (Km ²)	Cabeceiras (Km ²)	Percentual de Ocupação (%)
Ribeirão Urubu	133.95	93.41	69.74
Córrego José Maria	15.92	12.20	76.59
Córrego Braúna	21.66	15.72	72.55
Córrego Boa Vista	25.49	18.59	72.91
Ribeirão da Mata	226.88	129.89	57.25
Córrego Maricota	7.39	5.38	72.81
Córrego Jaguará	84.38	9.06	9.31
Totais	515.67	284	431

De forma geral, deve-se atentar para os valores “anômalos” de ocupação por bacias de cabeceira encontrados no Córrego José Maria, Ribeirão da Mata e Córrego Jaguará. O Ribeirão da Mata, com suas cabeceiras localizadas em maior parte sobre a interface das rochas graníticas e carbonáticas, apresentou o menor valor dentre todos os seus afluentes, com 12 % menos área ocupada por cabeceiras em comparação com o menor valor obtido em suas sub-bacias (Ribeirão Urubu). Além disso, convém notar que há uma nítida diminuição da densidade de drenagem e, consequentemente de cabeceiras, após a inflexão sobre os calcissiltitos do Membro Pedro Leopoldo, assim como para a maioria dos eixos de drenagem (Figura 2). A bacia do Córrego Jaguará no Planalto de Lagoa Santa, situada exclusivamente sob os calcissiltitos do Membro homônimo, apresentou o inexpressivo valor de 9,31% de ocupação da bacia por bacias de cabeceira de drenagem, ou seja, 6,15 vezes menos bacias de cabeceira por área em relação ao segundo menor valor obtido.

Além da influência estrutural, verificou-se também que as bacias de cabeceira pertencentes às porções drenadas sobre rochas carbonáticas e metapelíticas – Ribeirão da Mata, Córrego Jaguará e José Maria – apresentaram coeficientes de determinação (R^2) entre amplitude altimétrica e área, expressivamente menores em relação aos Córregos anteriormente mencionados, onde há variações litológicas bem menores. Essa informação enriquece a hipótese de influência litológica para as áreas da bacia sem homogeneidade granítica (Figuras 6 a 9). Complementando essa inexpressiva quantidade de cabeceiras e de R^2 , a *Dd* obtida nos compartimentos cársticos foi a menor dentre o rol amos-

trado, com acentuado destaque para o Córrego Jaguará, que apresentou um valor 4,39 vezes menor que o segundo valor mais baixo (Ribeirão da Mata).

Entre as áreas carbonáticas, a enorme diferenciação hidrológica (Membro Lagoa Santa e Pedro Leopoldo) pode estar diretamente ligada ao grau de evolução desses ambientes face aos processos de dissolução e abatimento, conforme pondera Kohler (1989). Essa é uma explicação coerente para a presença de bacias de cabeceira desconectadas no Córrego Jaguará, fato este bem menos pronunciado no Ribeirão da Mata (Figura 2).

Além dos fatores externos que contribuíram na esculturação do Planalto de Lagoa Santa, Kohler (1989) considera que as feições exocársticas possuem sua origem ligada a um espectro de lineamentos, que têm condicionado inclusive a morfodinâmica atual. Esta assertiva pôde ser visualizada no mapeamento recente efetuado por CPRM (2002) através da constatação da superimposição dos eixos de drenagem em relação aos eixos estruturais. Além disso, no Planalto de Lagoa Santa, o valor mensurado de R^2 , entre altimetria-área na bacia do Córrego Jaguará, foi mais baixo que o obtido nos afluentes do Ribeirão da Mata (Córrego José Maria), sendo, portanto, a variável independente (área) considerada como de baixo poder explicativo sobre as modificações da variável dependente (altimetria). Confirmando esses dados, o Teste-F demonstrou que o modelo de regressão linear para essa bacia não é adequado, onde a variância de área não explica a variância da amplitude altimétrica, dentro do intervalo de confiança de 95%, devendo-se, portanto, rejeitar esse modelo explicativo. Esse fato caracteriza-se como mais um forte indício da existência de relações causais na configuração do relevo cárstico local que não se encontram presentes nas áreas graníticas e mesmo em outros ambientes de calcissiltitos.

Dentre os resultados mais baixos de I_r , e, teoricamente, de menor dissecação fluvial, destaca-se também o Córrego Jaguará, com valores de rugosidade 3,14 vezes menor que o Córrego Maricota, que por sua vez, é o segundo mais baixo. Esta informação implicaria que o modelado contemporâneo, esculpido nos calcissiltitos e margas do Membro Lagoa Santa, praticamente não possui evidências da esculturação fluvial nos compartimentos superficiais da paisagem. Tal ponderação confirmaria, por sua vez, o grau acentuadamente maior dos fenômenos subsuperficiais na elaboração do relevo cárstico do Planalto de Lagoa Santa. Contudo, um importante contra-argumento registrado foram os valores de R_r obtidas nas bacias de cabeceira do Córrego Jaguará serem os mais elevados dentre as bacias amostradas, demonstrando que o desnível entre os interflúvios e as desembocaduras chega a ser maior nesses compartimentos em comparação àqueles observados no Embasamento Cristalino. Outra informação comparativa bastante relevante é que a R_r obtida para a bacia do Córrego Jaguará teve um

dos valores mais baixos de toda a amostragem, o que, sem a análise específica das bacias de cabeceira, deturparia todos os resultados anteriormente expostos.

No caso das bacias de cabeceira, pode-se argumentar, conforme, White (2009), que o rebaixamento do relevo pelos processos de dissolução de rochas carbonáticas tende a gerar uma superfície de pequena amplitude altimétrica, exceto quando há o desenvolvimento de dolinas. Entretanto, se o entalhamento fluvial for maior que as taxas de dissolução, há grande possibilidade de originar, inclusive, cânions escarpados.

Desta forma, o valor de R_r constatado nas bacias de cabeceira do Córrego Jaguará parece tornar ainda mais evidente que, em ambientes fluvio-cársticos, a conjugação da morfogênese cárstica e fluvial pode provocar a elaboração de um modelado com vertentes e calhas fluviais altamente declivosas. E que, conforme mensurado, este grau de dissecação pode ser de tal magnitude, que ultrapassa, inclusive, áreas de maior densidade de drenagem e teoricamente mais susceptíveis à ação dos processos de entalhamento fluvial. Com efeito, em vista dos dados adquiridos, é possível considerar que, sobretudo nas bacias de cabeceira, os fenômenos de esculturação fluvial tenham sido bastante atuantes como fatores morfogenéticos, tendo contribuído efetivamente na elaboração da arquitetura local-regional.

Através da análise espacial e morfométrica, na área de estudos, a influência litológica entre domínios graníticos e carbonáticos, – registradas na localização das cabeceiras de drenagem, na inflexão do vale do Ribeirão da Mata e no nível de evolução do Planalto de Lagoa Santa – parece ser mais efetiva na configuração do relevo regional se comparada aos controles externos, como o clima, embora a sua influência seja fundamental para a dinâmica e evolução das paisagens (SCHUMM, 1977). Além disso, este apontamento tem sido demonstrado indiretamente no planalto São-Franciscano por diversos pesquisadores desde os anos 1980 (KOHLER 1989; KARFUNKEL *et al.*, 2006; PAGUNG *et al.*, 2007).

Na bacia do Ribeirão da Mata, as cabeceiras do Córrego José Maria apresentaram valores ainda mais baixos que do Ribeirão da Mata, apesar de localizarem-se sobre metapelitos, reafirmando assim, seu padrão diferencial em relação aos segmentos graníticos e carbonáticos do trecho a montante. Segundo Horton (1945), em um mesmo ambiente climático, a permeabilidade das rochas repercute decisivamente na densidade de drenagem. Esta assertiva parece aplicável ao caso pesquisado, sobretudo quando considerados os baixos valores de D_d nos carbonatos drenados pelos Córregos José Maria, Jaguará e Ribeirão da Mata. Convém ressaltar, todavia, que o fato do Córrego José Maria deter uma parte considerável de sua bacia sobre rochas de baixa permeabilidade e transmissividade (metapelitos), e, por conseguinte, de alta D_d , parece tê-la influenciado somente na escala da bacia

(em que se constatou uma média superior à do Ribeirão da Mata), fato este que não se sucedeu com os números obtidos nas cabeceiras.

Considerando-se, igualmente, a localização do Córrego José Maria, próxima ao exutório do Ribeirão da Mata e do Rio das Velhas e, portanto, de seu nível de base regional, natural seria, conforme a literatura (HACK, 1960; SCHUMM, 1977), que o valor de ocupação por bacias de cabeceira fosse o menor em relação aos demais, caso o segmento estivesse dinamicamente ajustado em relação à bacia. Contudo, a bacia do Córrego José Maria apresentou o maior valor de área ocupada por cabeceiras e a maior densidade de lineamentos estruturais dentre todo o universo amostral.

A influência dos lineamentos, longe de desconsiderar os demais fatores causais, tem sido apresentada nos últimos trinta anos como a causa primordial da localização e gênese de cabeceiras de drenagem em contexto estrutural, como fraturas, falhas normais e compressionais (PAISANI, 2006; COELHO-NETTO, 2003). Neste mesmo sentido, Avelar e Coelho Netto (1992a) apontaram a ocorrência de água subterrânea, proveniente de fluxos artesianos com águas de outras bacias, como um dos mais efetivos fatores condicionantes de cabeceiras de drenagem sob o controle de geoestruturas. Esta característica somada à existência do Planalto Cárstico de Lagoa Santa, que apresenta fluxo predominantemente subterrâneo, tende a reforçar a explicação litoestrutural sobre o alto valor de área ocupada por cabeceiras no Córrego José Maria.

Desdobrando as análises das informações supracitadas, pode-se inferir, dentro dos limites estabelecidos pelas mensurações, que coexistem dentro, e entre, as bacias de drenagem pesquisadas, diversos compartimentos geomorfológicos, em que prevalecem formas específicas, ajustadas a diferentes estados de equilíbrio. Neste mesmo sentido, verificou-se que os valores de Rr obtidos nas bacias de cabeceiras são, em média, 4,78 vezes mais elevados que nas bacias. Em outras palavras, nas regiões das bacias de cabeceira, a variação altimétrica do perfil longitudinal do coletor principal, é acentuadamente maior, prevalecendo um gradiente energético elevado e, portanto, um ambiente com potencial erosivo efetivamente maior em comparação ao padrão esculptador dos vales principais das bacias hidrográficas, menos declivosos e mais próximos do estado de equilíbrio ideal (HACK, 1960).

De uma maneira geral, foi possível deduzir também que os segmentos em rochas graníticas detêm uma homogeneidade que é estatisticamente superior aos segmentos localizados em interfaces litológicas e, principalmente, em relação aos carbonatos. Nas porções drenadas sob o Embasamento Cristalino, e mesmo no Membro Pedro Leopoldo, os valores exibem uma tendência geral a gradações mais uniformes das cotas altimétricas em função do aumento de área se comparadas à Formação Serra de Santa Helena - na qual

o Córrego José Maria está circunscrito - e ao Membro Lagoa Santa - no Córrego Jaguará. Por conseguinte, sabendo-se que os processos contemporâneos são fortemente regulados pela morfologia (SCHUMM, 1977), torna-se inevitável destacar a existência de compartimentos morfodinâmicos e morfogenéticos diferenciados.

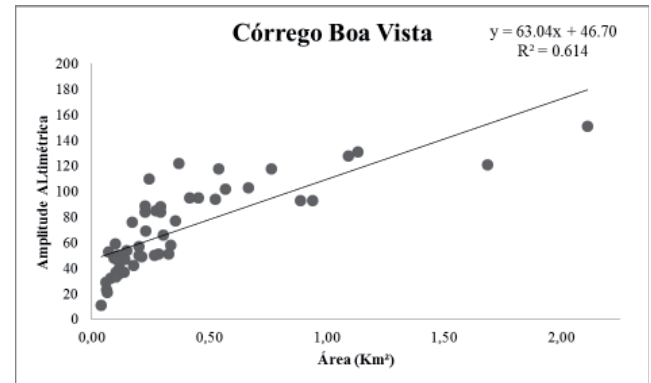


Figura 3 – Equação de regressão entre ΔH e área nas bacias de cabeceira do Córrego Boa Vista.

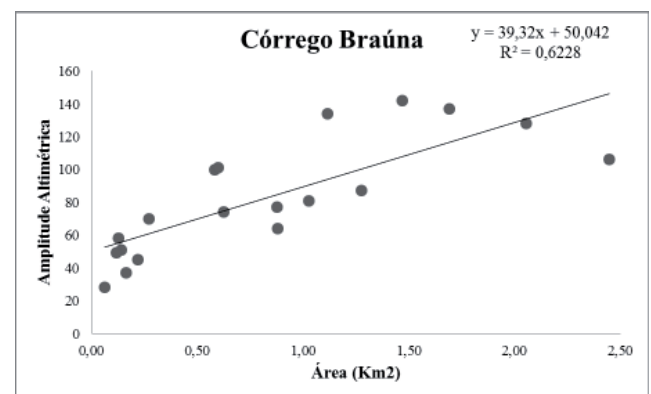


Figura 4 – Equação de regressão entre ΔH e área nas bacias de cabeceira do Córrego Braúna.

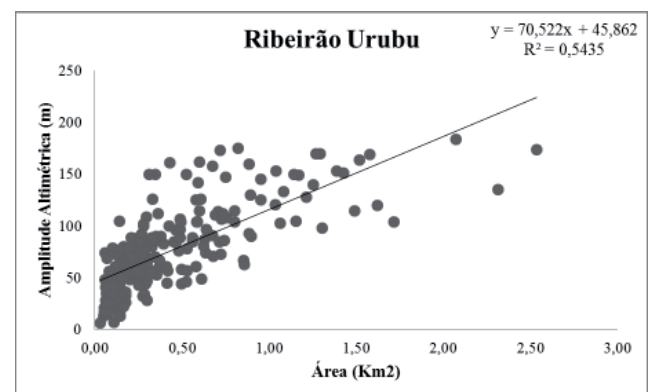


Figura 5 – Equação de regressão entre ΔH e área nas bacias de cabeceira do Ribeirão Urubu.

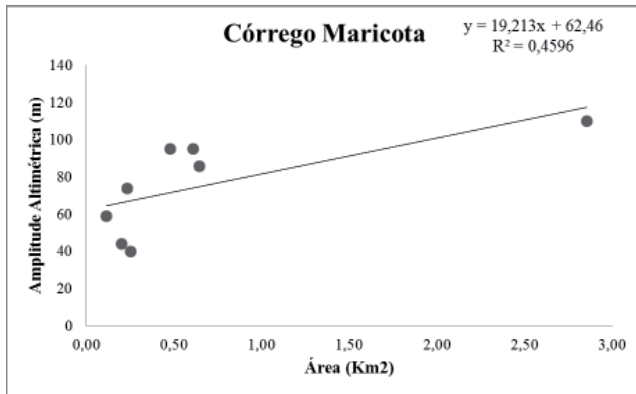


Figura 6 – Equação de regressão entre ΔH e área nas bacias de cabeceira do Córrego Maricota.

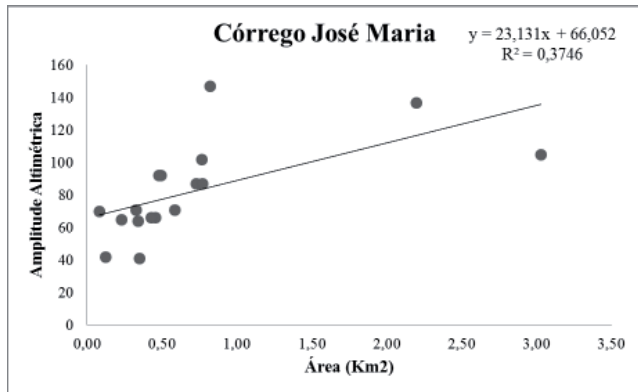


Figura 8 – Equação de regressão entre ΔH e área nas bacias de cabeceira do Córrego José Maria.

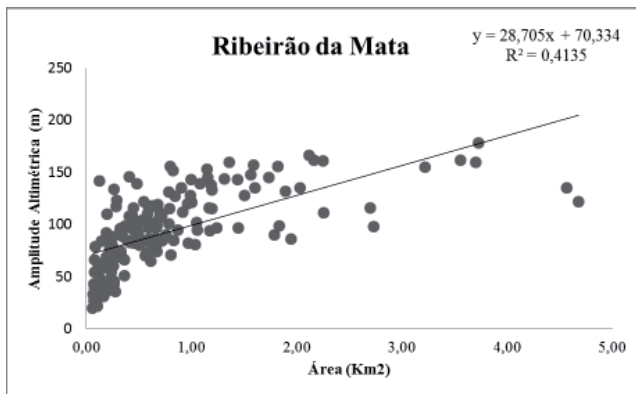


Figura 7 – Equação de regressão entre ΔH e área nas bacias de cabeceira do Ribeirão da Mata.

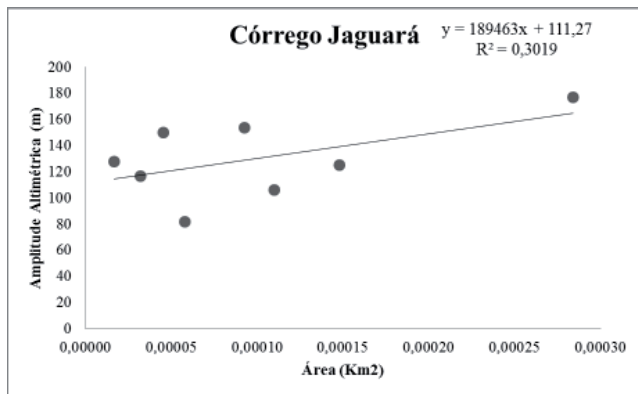


Figura 9 – Equação de regressão entre ΔH e área nas bacias de cabeceira do Córrego Maricota.

Dessa forma, considerando-se a análise estatística e espacial, anteriormente tratadas, é possível identificar três compartimentos geológico-geomorfológicos distintos quanto à distribuição das cabeceiras de drenagem: (i) as porções elevadas sobre Embasamento Cristalino; (ii) porções em altitude intermediária, no médio e baixo curso do Ribeirão da Mata, sob o substrato granito-gnáissico e os carbonatos do Membro Pedro Leopoldo; e (iii) o relevo flúvio-cárstico do Planalto de Lagoa Santa, modelado sobre as rochas do Membro Lagoa Santa.

Cabe destacar que as bacias de cabeceira apresentaram valores muito mais próximos de feições circulares em comparação às bacias hidrográficas. Segundo Ferreira (2010), índices de circularidade próximos à unidade indicam maior susceptibilidade a alagamentos, pois não há uma distribuição gradual do escoamento superficial ao longo do tempo. Deste modo, esta importante variável reitera a fragilidade ambiental destes sistemas e sua capacidade de rápidas mudanças ao longo do tempo (GOMI *et al.*, 2002), sobretudo admitindo-se que eventos extremos tendem a modelar muito mais rapidamente

a fisiografia terrestre do que eventos de grande recorrência e baixa magnitude (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Os parâmetros que mensuraram a forma das bacias hidrográficas e das bacias de cabeceira (I_c e K_c), também exibiram um padrão correlacionável, tanto entre si, quanto em relação aos outros dados. Dentre as bacias hidrográficas, o Ribeirão da Mata apresentou a forma mais irregular, fato este já perceptível visualmente, como por exemplo, através do cotovelo fluvial descrito por Kohler (1989). Em geral, todas as bacias hidrográficas analisadas apresentaram padrão de forma semicircular, com valores oscilantes entre 0,38 e 0,53.

Por fim, o coeficiente de correlação produto-momento (Pearson) nas bacias de cabeceira, entre os valores de área (Km^2) e o I_c , foi de grau moderado (-0,3911), ao passo que nas bacias hidrográficas, este valor apresentou correlação de alto grau (-0,9148). Com efeito, em face desses dados, pode-se considerar que há uma tendência real para o aumento da circularidade média das bacias em função da diminuição de suas dimensões espaciais, de forma semelhante ao que ocorre entre as bacias de cabeceira e suas bacias hidrográficas.

Considerações Finais

Embora seja um dos fluviocarstes mais representativos no Grupo Bambuí (KÖHLER, 1989), mencionados desde os trabalhos pioneiros de Eschwege (1833), este foi o primeiro trabalho de pesquisa envolvendo especificamente as bacias de cabeceira da região. Ademais, as interpretações dos resultados não ficaram restritas às bacias de cabeceira, haja vista a possibilidade de interpolação dos dados em diversas escalas de análise, gerando, inclusive, novas informações sobre a arquitetura da paisagem regional.

De forma geral, foi possível constatar que as cabeceiras, assim como os vales principais, possuem sua localização fortemente determinada por influências litológicas, estruturais e energéticas:

(i) A distribuição e a forma das bacias de cabeceira estão intimamente relacionadas à influência das rochas do Embasamento Cristalino e dos carbonatos/metapelitos do Grupo Bambuí;

(ii) Os lineamentos condicionam a densidade de cabeceiras na paisagem e, por conseguinte, determinam o desenvolvimento das formas de relevo, como constatado na bacia do Córrego José Maria e mencionado por diversos autores em outras localidades (COELHO-NETTO, 2003; PAISANI, 2006; AVELAR e COELHO-NETTO, 1992);

(iii) Os desníveis das bacias de cabeceira em relação ao nível de base local/regional marcam a existência de diversos patamares erosivos com valores de energia potencial e cinética típicos de estágios evolutivos e de equilíbrio dinâmico distintos (HACK, 1960).

Os resultados confirmam a relevância dos estudos de bacias de cabeceira não somente no Médio Curso do Rio das Velhas, mas igualmente para outras áreas com objetivos de pesquisa ligados à média e larga-escala de análise espacial. Deve-se ressaltar que tais informações permitem, conseqüentemente, abordagens ainda mais integradoras dos diversos níveis de processos e formas existentes na pesquisa geomorfológica, tanto no tempo quanto no espaço.

Em face dos resultados obtidos, é imprescindível considerar essa categoria de análise como um dos elementos-chave para o entendimento da geodinâmica e gênese do relevo de média e larga-escala espacial.

Referências Bibliográficas

- AVELAR, A.S.; COELHO NETO, A.L. Fraturas e desenvolvimento de unidade geomorfológicas côncavas no médio vale do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio de Janeiro, 22(2): 222-227, dezembro, 1992.
- BENDA, L.; HASSAN, M. A.; CHURCH, M.; MAY, C. L. Geomorphology of Steepland Headwaters: The Transition from Hillslopes to Channels. *Journal of the American Water Resources Association American Water Resources Association*, 2005.
- BÜCHI, A. e PAGUNG, R. **Mapeamento geológico (1:25.000), neotectônica e georecursos da região de Vespasiano e São José da Lapa – MG**. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia), Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- BURT, T.P. The Hydrology of Headwater Catchments. CALOW, P.; PETTS, G.E. (Orgs.). **The Rivers Handbook**. Londres: Blackwell, pp. 3-28, 1992.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Büchler, 1999.
- COELHO-NETTO, A.L. Evolução de Cabeceiras de Drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): Bases para um Modelo de Formação e Crescimento da Rede de Canais sob Controle Estrutural. **Rev. Bras. Geomorfologia**, vol. 4(2), p. 118-167, 2003.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapeamento Geológico: Belo Horizonte**, Carta SE-23, 2002.
- DAVIS W. M. **O Ciclo Geográfico**. São Paulo: Seleção de Textos: Davis & Martone. AGB 19. p:9-27, 1899.
- DIETRICH, W.E.; RENEAU, S. L.; WILSON, C. J. Overview: Zero-Order Basins and problems of drainage density, sediment transport and hillslope morphology. **IAHS**, vol, 165, p. 49-59, 1987.
- ESCHWEGE, L. W. **Pluto Brasiliensis**. Berlim: G. Reimer, 1833.
- FERREIRA, A. L. M. **Caracterização Morfométrica Das Bacias Hidrográficas E Áreas Inundáveis No Concelho De Pombal**. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas Sociais, Riscos Naturais e Tecnológicos), Universidade De Coimbra, Coimbra, 2010.
- FONSECA, B. M. F. **O uso de sistema de informação geográfica na análise morfométrica e morfológica das bacias de drenagem na Serra do Espinhaço Meridional-MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- GILBERT, G. K. **Report on the geology of Henry mountains**. U.S. Geol. & Geol. Survey of the Rocky Mountain Region. Department of the Interior. Washington. 151p, 1877.
- GOMI, T.; SIDLE, R. C.; RICHARDSON, J. S. Understanding Processes and Downstream Linkages of Headwater Systems. **BioScience**, n. 52, v.10, 905-916, 2002.

- HACK, J. T. Interpretation of erosional topography in Humid Temperate regions. **American Journal of Science**, 188, p 80-97, 1960.
- HORTON, R. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative geomorphology. **Geol.Soc.Am.Bull.**, vol. 56, p. 275-370, 1945.
- KARFUNKEL, J.; ARANHA, P.R.A.; BÜCHI, A.; PIMENTA, F.; PAGUNG, R.; SILVA PINTO, J.A.; HOFMANN, M.; HOPPE, A. Registros neotectônicos entre Vespasiano e Pedro Leopoldo ao norte de Belo Horizonte, Minas Gerais. **Congresso Brasileiro De Geologia**, 42, 2006. Boletim de Resumos, Aracaju, 2006.
- KING, L.C. Canons of landscape evolution. **Geol. Soc. Am. Bull.**, vol. 64, p. 721-752, 1953.
- KOHLER, H. C. **Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- MAGALHÃES JR., A. P. **Evolução da Dinâmica Fluvial Cenozóica do Alto-Médio Vale do Rio das Velhas na Região de Belo Horizonte**. Dissertação (Geografia e Análise Ambiental). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1993.
- MEIS, M.R.M. & MONTEIRO, A.M.F. Upper Quaternary “rampas”: Doce river valley, SE Brazillian Plateau. **Zeits. Geomorp.**, vol. 23, p. 132-151, 1979.
- MEYER, J. L.; WALLACE, J.B. Lost linkages and lotic ecology: Rediscovering small streams. In: PRESS, M.C.; HUNTLY N.J.; LEVIN S. (Org.). **Ecology: Achievement and Challenge**. Oxford: Blackwell Scientific, p. 295–317, 2001.
- MONTGOMERY, D.R.; BUFFINGTON, J.M. **Channel-reach morphology in mountain drainage basins**. *GSA Bulletin*, v. 109; n. 5; p. 596–611, 1997.
- NICKOLOTSKY, A.; PAVLOWSKY, R. T. Morphology of step-pools in a wilderness headwater stream: The importance of standardizing geomorphic measurements. **Geomorphology**, vol. 83, p. 294–306, 2007.
- PAGUNG, R.; PIMENTA, F.; KARFUNKEL, J.; ARANHA, P.R.A.; BÜCHI, A.; HOFMANN, M.; HOPPE, A. Investigação de feições neotectônicas em Vespasiano-MG utilizando o georadar (GPR). **Simpósio De Geologia Do Sudeste**, 10. Boletim de Resumos, Diamantina, SBG/MG, p. 105, 2007.
- PAISANI, J. C.; PONTELLI, M. E.; GEREMIA, F. Cabeceiras De Drenagem Da Bacia Do Rio Quatorze – Formação Serra Geral (SW Do Paraná): Distribuição Espacial, Propriedades Morfológicas E Controle Estrutural. **RA'E GA**, Curitiba, n. 12, p. 211-219, 2006.
- SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, n. 67, p. 597-646, 1956.
- SIDLE, R.C.; TSUBOYAMA Y.; NOGUCHI S.; HOSODA I.; FUJIEDA M.; SHIMIZU T. Streamflow generation in steep headwaters: A linked hydro-geomorphic paradigm. **Hydrological Processes**, vol. 14, p.369–385, 2000.
- SHREVE, R.W. Stream Lengths and Basin Areas in Topologically Random Channel Networks. **Journal of Geology**, vol. 77, p. 397- 414, 1969.
- STRAHLER, A. N. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**. Vol. 8, n. 6, pp. 913-920, 1957.
- SUMMERFIELD, M. A. **Global Geomorphology**. Londres: Prentice Hall, 1991.
- VIANELLO, A.; CAVALLI, M.; TAROLLI, P. LiDAR-derived slopes for headwater channel network analysis. **Catena**, vol. 76, p. 97–106, 2009.
- WHITE, W. B. The evolution of Appalachian fluviokarst: competition between stream erosion, cave development, surface denudation, and tectonic uplift. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 71, no. 3, p. 159–167, 2002.