

# Hidrossedimentologia de Ambientes Fluviais Naturais e sua Relevância em Estudos de Cursos D'água Artificializados: o Caso do Córrego Ponte Queimada - Belo Horizonte/MG.

Chrystiann Lavarini<sup>1</sup>; Henrique Pesciotti<sup>1</sup>; Lílian Coeli<sup>1</sup>; Antônio Pereira Magalhães Jr.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Acadêmicos em Geografia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). E-mails: lavarini.c@gmail.com; hpesciotti@gmail.com; liliancoeli@gmail.com.

<sup>2</sup> Professor Adjunto do Departamento de Geografia da UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, 31.270-901, BH-MG. E-mail: magalhaesufmg@yahoo.com.br

**ABSTRACT** --- The current growth of investments in works that deal directly with extreme weather events cannot be considered on a purely deterministic approaches. In this perspective, there is the Adaptive Water Management, which comes from the theory of adaptive control process, developed to deal with systems characterized by uncertainty. With this purpose, this research aims to give a information feedback proposed by the Adaptive Water Management: (i) understand the hydraulic and sedimentologic differentiation of the longitudinal profile of the river, (ii) identify and classify different geomorphological patterns of river channel, (iii) analyze and compare the variables of the natural river system artificialized and (iv) prepare a synthesis of certainties and uncertainties about the design of river modification, and finally, (v) predict possible future short term scenarios. In order to achieve these goals, morphometric parameters were performed at 25 hydrometric cross sections, also were performed the pebble count method and sedimentological analysis in the laboratory. As a result, it was found that the stream channel exhibited significant morphological and hydrological changes in relatively short reaches typical of mountain environments near the headwaters. It is also important to mention that bed clasts control the contemporary fluvial dynamics establishing that bedload grain size variations are not always a dependent variable in the river flow as traditionally reported in fluvial geomorphology and hydrology literature. It was also notice that hydrosedimentological and morphological variations combined with the riverbed artificialization could have increased the depositional rates. If it is kept the current standards in conjunction with the anthropogenic and quaternary climate changes, this deposition will be accentuated, jeopardizing the future fluvial dynamics and functionality of the performed work. Finally, this paper aims to contribute not only in the current dynamics understanding, but also, in a synthetic way, to predict future hydrosedimentological scenarios and their responses. In addition, due to the applicability of these methods, it is expected that it could be applied to other research allowing the understanding of the dynamics anthropogenic variables in fluvial works.

**Key-words:** Hydro-sedimentology; Geomorphological Classification; Stream Channel Artificialization.

**Palavras-chave:** Hidrossedimentologia; Classificação Geomorfológica; Artificialização de Canais Fluviais.

## 1. INTRODUÇÃO.

A gestão sustentável e integrada dos recursos hídricos é uma questão de crescente preocupação e, ao mesmo tempo, um dos maiores desafios do século XXI. Porém, a escassez ou abundância de água não representa o único desafio fundamental (Pahl-Wostl et al., 2005). Ainda são pouco conhecidos os aspectos inerentes à variabilidade e natureza das mudanças no fornecimento de água, e juntamente a isso há um limitado acervo de informações científicas e técnicas disponíveis (Pahl-Wostl et al., 2002a; Downs e Kondolf, 2002), fato este verificado também no Brasil com forte ocorrência (Cruz, 2005). Na grande maioria dos casos, dados hidrológicos básicos não estão disponíveis e as projeções futuras do sistema fluvial ainda são bastante incertas. Isso significa que a dependência dos métodos convencionais de gestão dos recursos hídricos baseadas em análises estatísticas de séries históricas não é suficiente. Sob tais condições, a análise deve prosseguir interativamente, enfatizando nos pontos de incertezas ao invés daqueles plenamente conhecidos (Lee, 1999; Pahl-Wostl et al., 2005). A necessidade, cada vez mais recorrente, de investimentos em obras que lidam diretamente com eventos climáticos extremos (como inundações e secas) não pode ser considerada de uma forma puramente determinística, pois isso exigiria o fornecimento de informações exatas sobre a frequência e magnitude de extremos climáticos no futuro (Pahl-Wostl et al., 2005).

Nessa perspectiva insere-se o Gerenciamento Adaptativo da Água, que decorre, em termos gerais, da teoria do processo de controle adaptativo, desenvolvida para lidar com sistemas caracterizados pela incerteza (McLain e Lee 1996). Esta teoria pode ser descrita como inovadora, tratando os programas de gerenciamento ambiental como experimentos, ou seja, cada etapa de um programa de gestão é vista como

um exercício de coleta de informações, que possibilita mudar ou projetar a nova fase do programa ambiental, podendo antecipar-se aos eventos incertos (Downs e Kondolf, 2002; Berkes et al., 2000; Stankey et al., 2005). Há, portanto, uma realimentação direta entre ciência e gestão, haja vista que as decisões políticas podem utilizar-se das informações científicas mais acuradas em todos os estágios de desenvolvimento.

Dentre os elementos naturais de maior complexidade e incerteza na paisagem destaca-se o sistema fluvial, tanto em termos científico quanto gerencial (Schumm, 1977; Hey, 2006). Dadas as suas características, os ambientes fluviais são influenciados pelas mudanças na bacia hidrográfica e, concomitantemente, conduzem, no tempo geológico e humano, grandes alterações na sua configuração morfológica e biótica (Goudie, 2004). Além disso, os segmentos fluviais em determinados trechos, como nas proximidades das cabeceiras de drenagem, adquirem características hidráulicas e morfológicas específicas que refletem a interação de processos fluviais e de encosta (Benda e Dunne, 1997). Desse modo, tais áreas podem sofrer distúrbios causados por movimentos de massa, como desmoronamentos, deslizamentos e fluxos, que controlam o transporte e fornecimento de sedimentos dos canais de ordem mais baixa para aqueles de ordem hierárquica maior, condicionando modificações na geometria dos canais, nas variáveis hidráulicas e atingindo, freqüentemente, populações humanas, animais e vegetais (Lancaster et al., 2001; Howard, 1998; Gomi et al., 2004). No entanto, apesar das bacias de drenagem em áreas montanhosas ou serranas possuir grande importância geomorfológica e biológica, sobretudo, pela diversidade de habitats aquáticos e à dinâmica hidrossedimentar particular, que condiciona todos os trechos fluviais à jusante (Reid, 1993), ainda não há uma quantidade de estudos satisfatórios desse tema, tanto na literatura internacional (Golden e Springer, 2006), quanto na literatura nacional, mais especificamente em áreas de nascentes e cabeceiras de drenagem (Lavarini et al., 2009; Felliipe, 2009).

Nos últimos anos um crescente número de publicações científicas tem envolvido estudos de geomorfologia fluvial e hidrossedimentologia inseridos na perspectiva do Gerenciamento Adaptativo da Água, sobretudo, nos países desenvolvidos, objetivando, em sua maioria, avaliação de reabilitações e restaurações fluviais (Wohl et al., 2005; Shields Jr. et al., 2003). Com efeito, face à grande incerteza na predição das repostas dos rios a intervenções, o Gerenciamento Adaptativo é considerado o marco conceitual mais adequado ao planejamento de projetos de modificação fluvial e sua subsequente avaliação, assim como em todas as fases de desenvolvimento gerencial (Downs e Kondolf, 2002).

Consideradas essas relevantes informações, insere-se a presente pesquisa, que possui como objetivo geral compreender a situação hidrossedimentológica e geomorfológica de um típico curso fluvial das áreas serranas do espaço urbano da capital mineira. O córrego Ponte Queimada, na zona sul de Belo Horizonte – MG, inserido no Parque Aggeo Pio Sobrinho, foi percorrido sistematicamente durante o estudo. Criado em 1996 no programa Parque Preservado da Prefeitura de Belo Horizonte, essa Unidade de Conservação vem sofrendo, ao longo do tempo, diversas obras para criação de espaços de convivência, e reformas por meio de compensações ambientais público-privadas (Mendes, 2007). Não obstante, o programa teve como meta a transformação efetiva dessas áreas em parques públicos sendo que estes, em sua maioria, não possuíram estudos preliminares, tampouco projetos definitivos elaborados, instalando-se apenas o ambiente núcleo, necessário e atraente ao uso público, de tal forma que fosse possível a posterior elaboração do projeto (Maciel, 2001). Dessa maneira, na área do parque foram realizadas diversas intervenções para utilização da comunidade, sobretudo na entrada da Unidade, com a implantação de cercamento, guaritas, portarias, sanitários públicos, mesas de jogos, bancos, lixeiras, *playground*, bebedouros e equipamentos de ginástica e quadras poliesportivas. Houve também modificações nos ambientes fluviais, tanto na confluência do seu médio curso com o Córrego Cercadinho, quanto próximo a sua nascente através de uma pequena barragem de água pluvial.

Em conformidade com a problemática supracitada, esta pesquisa evidenciou os segmentos artificiais e naturais do córrego Ponte Queimada, por meio de elementos que contribuíssem para o enriquecimento técnico-científico pós-obras em sistemas fluviais. Com efeito, foram traçados os seguintes objetivos específicos: (i) compreender a diferenciação hidráulica e sedimentológica do perfil longitudinal do rio; (ii) verificar e classificar os distintos padrões geomorfológicos da calha fluvial; (iii) analisar e comparar as variáveis do sistema fluvial artificializado e natural; (iv) elaborar uma síntese de certezas e incertezas sobre o projeto de modificação fluvial e, por fim, (v) seus possíveis cenários futuros em curto prazo.

Para este propósito foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a temática, com observações em campanhas de campo associadas a análises laboratoriais e de gabinete de 25 pontos selecionados.

Por fim, espera-se contribuir positivamente no processo de realimentação de informações e na avaliação e aprendizagem continuadas de projetos de intervenção nos recursos hídricos, assim como proposto pelo paradigma do Gerenciamento Adaptativo da Água.

Este trabalho se insere no conjunto de estudos sobre geomorfologia fluvial do Grupo de Pesquisa Geomorfologia e Recursos Hídricos (CNPq), sediado no Instituto de Geociências da UFMG.

## 2. METODOLOGIA.

**ÁREA DE ESTUDO** – Situada no Município de Belo Horizonte - MG dentro do Parque Municipal Aggeio Pio Sobrinho, a bacia do córrego Ponte Queimada está inserida em uma área de aproximadamente 543.650 m<sup>2</sup>, correspondendo a uma das maiores áreas de conservação da cidade e o segundo maior parque municipal. A vegetação nativa ocupa, aproximadamente, 95% da área do parque, sendo descrita como floresta estacional semidecidual com manchas de savana localizadas no topo das vertentes. Os córregos apresentam mata galeria em bom estado de preservação (Callisto et al., 2001). Apesar de boa parte vegetada, a bacia de drenagem do córrego estudado possui próximo aos seus interflúvios, uma área residencial verticalizada de ocupação urbana recente. Coexistem também, no entorno do parque, feições erosivas aceleradas e impermeabilização de áreas de recarga (asfaltos e construções). No recorte da área de estudo no qual foram realizadas as coletas de dados predominam as rochas do Grupo Sabará, essencialmente xistos, filitos, quartzitos, metavulcanoclásticas, metaconglomerados e metadiamicritos, sendo tal grupo a unidade geológica mais recente do Supergrupo Minas. (Reis et al., 2002).

Em face do detalhamento necessário à pesquisa optou-se pela focalização do Córrego Ponte Queimada, afluente do Córrego Cercadinho que por sua vez é tributário do Ribeirão Arrudas, o principal curso d'água que corta a cidade de Belo Horizonte. Situado em um vale serrano, em região de cabeceiras, a área de estudo é uma das poucas na região metropolitana de Belo Horizonte em estado de conservação razoável. A bacia possui uma área de aproximadamente 2,14 km<sup>2</sup> e parte dela situa-se fora da área de proteção do parque, com altitudes variando entre 905 – 1235 metros. O clima correspondente a área é do tipo Cwa (tropical de altitude), segundo a classificação climática de Köppen. A rede de drenagem possui padrão geral dendrítico, com vales encaixados e sem presença de planícies de inundação. Este encaixamento pode ser de tal magnitude, que o talvegue encontra-se geralmente no substrato rochoso, e os taludes marginais podem atingir altitudes próximas a oito metros. Como resultado do processo de encaixamento fluvial, alguns segmentos de vertentes são altas e íngremes. Matações e seixos são encontrados tanto no leito fluvial quanto nos taludes marginais. É possível, ao longo de vários trechos do córrego, identificar diversas feições erosivas nas encostas, desde pequenos sulcos a voçorocas de magnitude expressiva.

**MATERIAIS E MÉTODOS** – A maior parte das técnicas existentes para a compreensão e estimativa das taxas de transporte fluvial é de difícil aplicação, tendo em vista os altos custos, a pouca praticidade e a margem de confiabilidade nos resultados. A partir do preposto, foi selecionada uma série de técnicas e procedimentos descritos na literatura científica, que tomados em conjunto, permitiram um bom nível de compreensão das características fluviais e hidrogeomorfológicas da bacia pesquisada. Esses procedimentos podem ser subdivididos entre procedimentos de campo, de laboratório e gabinete.

Foram realizadas duas campanhas de campo nos dias 02 e 03/03/2010, onde se percorreu toda a calha fluvial do Córrego Ponte Queimada, desde seu trecho artificializado (nas proximidades de sua confluência com o Córrego Cercadinho) até a nascente principal da sua margem esquerda, próxima ao limite SW do Parque. O percurso foi feito seguindo-se uma adaptação do método original proposto por Bevenger e King (1995), conhecido como *Pebble Count*. Ao invés de realizar um percurso de sete passos em ziguezague, coletar e medir aleatoriamente os seixos da carga de leito como o método propõe, optou-se por percorrer apenas o talvegue numa seqüência de 50 passos (aproximadamente 35 metros) e mensurar três seixos aleatoriamente (Fig. 1). Essa adaptação ocorreu em função da pequena variação granulométrica ao longo do perfil longitudinal do rio, da maior heterogeneidade da carga de fundo em perfil transversal e também em função da considerável distância a ser percorrida. Concomitantemente à amostragem de seixos, foram analisados alguns parâmetros morfométricos e hidrométricos, dimensionando-se a velocidade do fluxo ( $v$ ), a largura ( $w$ ), a profundidade ( $h$ ) e a temperatura da água ( $t$ ) estimando-se posteriormente, a área do canal ( $A_c$ ), a área de setor ( $A_s$ ) e a vazão ( $Q$ ). Além dos dados já descritos, foram coletadas amostras de água à profundidade média e sedimentos das camadas superficiais do leito. Todos os procedimentos de campo acima mencionados perfizeram 25 perfis transversais onde foram realizadas tais interpretações.

Posteriormente, no Laboratório de Geomorfologia do Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), foi realizada a mensuração da carga dissolvida (STD) através da secagem em estufa de amostras d'água de 100 ml previamente filtradas com filtros de papel de 6  $\mu$ m de porosidade (marca Whatman) e pesadas em balanças de precisão. Também foram secas em estufa as amostras dos mesmos pontos, porém sem filtração, obtendo, portanto, o valor de sólidos totais (ST). A partir desses dois valores foram estimados os sólidos em suspensão (SS), sabendo que  $SS = STD - ST$ . As amostras de sedimentos correspondentes à camada superficial da carga de leito foram peneiradas e separadas nas seguintes frações: cascalho; areia muito grossa, grossa, média e fina; silte e argila (através do método de pipetagem). Na caracterização morfológica do canal utilizou-se a metodologia proposta por Montgomery e Buffington (1997) para classificações de canais em bacias montanhosas e o Número de

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot Rh}}$$

Froude (Fr), em que hidráulico).

(onde V = velocidade do fluxo; g = aceleração da gravidade; e Rh = raio

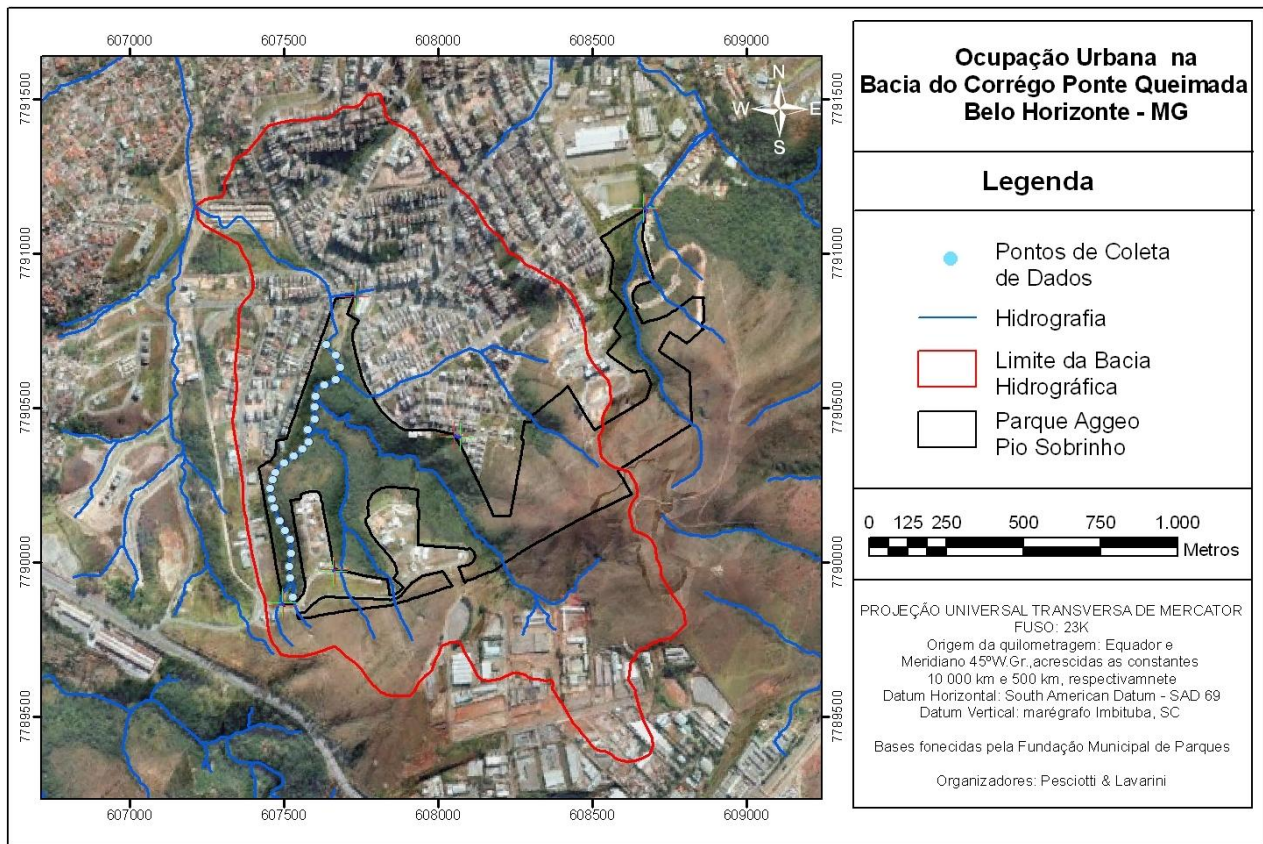


Figura 1: Mapa de pontos amostrados e ocupação urbana na bacia hidrográfica do córrego Ponte Queimada.

### 3. DESCOBERTAS E DISCUSSÕES.

Em relação à morfologia dos canais naturais foi possível reconhecer grande parte das descrições realizadas por Montgomery e Buffington (1997) prevalecendo, em sua maioria, classificações intermediárias (Quadro 1). Dos 25 pontos de análise, nove obtiveram classificações intermediárias pelo fato de não corresponderem a uma morfologia específica. Também não foram encontrados trechos de canais com configuração característica de poços/corredeiras (*pool-riffle*); de leito plano (*bed plane*); e de canais em cascata (*cascade*).

A compartimentação longitudinal dos trechos classificados parece guardar relação com as características geomorfológicas e geológicas da bacia hidrográfica. Em consonância ao mencionado, a montante da nascente do córrego Ponte Queimada, o canal apresenta substrato coluvial, enquanto logo a jusante o fluxo situa-se em leito aluvial com morfologia intermediária do tipo cascata e poços (*cascade-pool*). Prevaecem matacões e blocos angulosos onde, em determinados trechos, há geração de fluxo semelhante ao de cascata, concomitante à existência de poços espaçados. Progressivamente no sentido do fluxo, o canal adquire formas de degraus e poços (*step-pool*), como constatados nos pontos 22 e 23, alterando em alguns trechos subseqüentes para canal de leito rochoso. É fundamental assinalar que esse trecho do canal fluvial está em posição altimétrica elevada em relação à porção de jusante por um desnível abrupto de aproximadamente cinco metros, o que evidencia o ganho de energia local necessário ao processo de entalhamento da calha e exposição do substrato rochoso.

Mais a jusante, o ambiente de calha fluvial foi especificado como de cascatas e poços, o que diferenciava das classificações de Montgomery e Buffington (1997), uma vez que nas suas bacias esta classificação foi reconhecida apenas nas porções superiores do canal, seguindo-se com diminuição granulométrica e modificação morfológica nos trechos de jusante. Esta modificação consiste na evolução de substrato coluvial para substratos aluviais, seqüencialmente, do tipo cascata; degraus e poços; leito plano; poços e corredeiras; e ondulações-dunas. Entende-se assim, que a existência de um compartimento sobrelevado na bacia do córrego Ponte Queimada, modifica fortemente os processos fluviais locais,

contribuindo no fornecimento de material mais grosseiro – tanto pela dinâmica fluvial quanto pelos processos de encosta – que repercutem na elaboração de uma morfologia típica de regiões de cabeceira de drenagem com alta declividade, como é característico dos ambientes de cascatas e poços (*cascade-pool*).

Seguindo a direção do fluxo, o canal adquire somente mais duas tipologias de morfologia de calha, uma como canal em degraus e poços, e a outra em corredeiras e degraus. Os trechos correspondentes às corredeiras e degraus (*riffle-step*) estão relacionados às porções de menor declividade e irregularidade do leito, assim como no trecho artificializado, e entre os pontos 13 e 16, onde o confinamento do vale e a quantidade de carga grosseira é menos pronunciada. Por outro lado é marcante a presença de trechos em degraus e poços (*step-pool*) bem delimitados na porção média do canal aluvial, com granulometria extremamente variada. Estas diferenças morfológicas estão relacionadas, obviamente, à dinâmica do fluxo, mas também à dinâmica das vertentes.

Tendo em vista que a maioria desses sedimentos é de granulometria muito elevada e que, assim, podem ser mobilizados somente em eventos raros e de grande magnitude, o fluxo pode ser condicionado pelos sedimentos do leito (*flow-regulated*), que não podendo transportá-los, tem sua dinâmica hidrossedimentológica determinada (Rubin e Topping, 2001). Além disso, os sedimentos mais grosseiros funcionam eventualmente como obstáculos ao transporte da carga fluvial suspensa, devido ao efeito de represamento do fluxo. Este fato, em conjunto com o descrito anteriormente, pode explicar os baixos valores mensurados de carga suspensa nos 25 pontos amostrados, à exceção dos trechos 09 e, especialmente, do 13. Este último apresenta valores mais elevados em função de sua localização como último trecho numa seqüência de rugosidade relativamente menor (intermediária entre leito plano e de degraus/poços), possuindo condições de transporte de sedimentos superior aos dos demais segmentos fluviais.

As condições do fluxo, por seu turno, apresentaram resultados bastante expressivos na delimitação dos ambientes fluviais. Pelo número de Froude pôde-se realizar uma classificação mais precisa do que a de larga escala proposta por Montgomery e Buffington (1997) em função do maior nível de detalhamento e o envolvimento de variáveis hidráulicas. Assim sendo, foram classificados os padrões de fluxo em cascata; degraus, corredeiras e rápidos; poços e leito plano (Gráfico1).

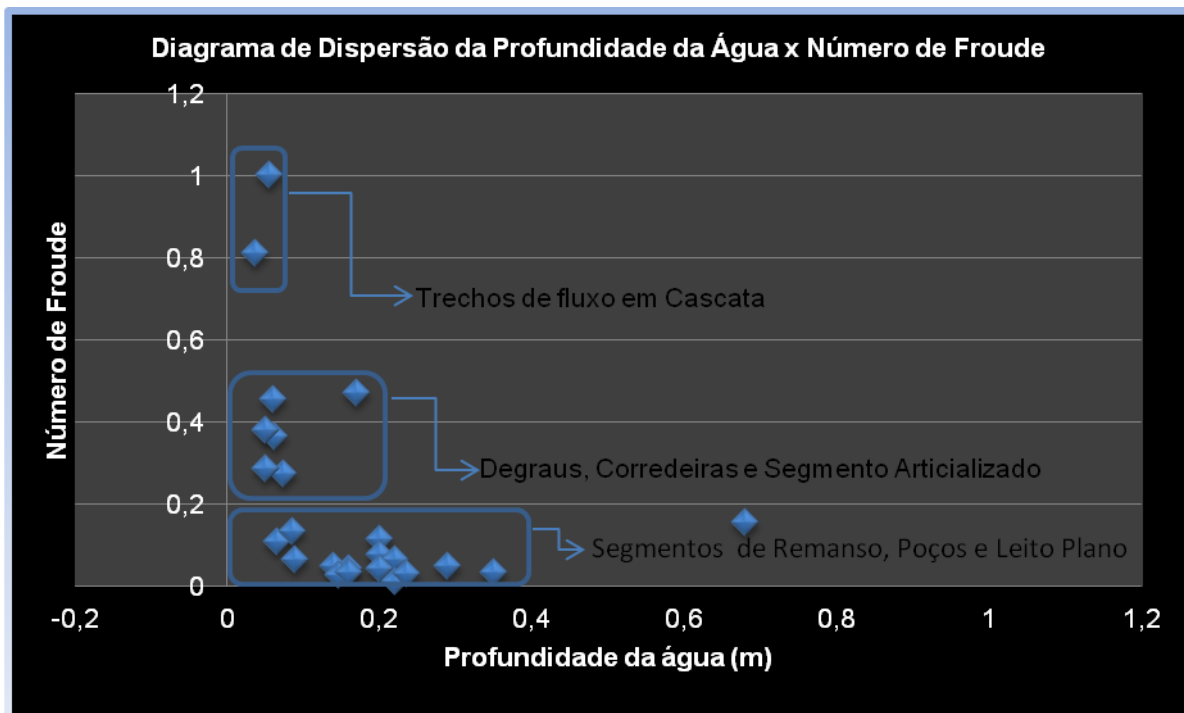


Gráfico 1: Diagrama de Dispersão da Profundidade da Água x Número de Froude.

| Seção | Velocidade (m/s) | Vazão (m³/s) | N. de Froude | D50 (mm)  | TDS (g/L) | SS (g/L) | Morfologia do Leito                              |
|-------|------------------|--------------|--------------|-----------|-----------|----------|--|
| 1     | 0,30846          | 0,832842     | 0,34837006   | 39        | 0,106     | 0,046    | Artificializado (com degraus)                    |
| 2     | 0,08047          | 0,2180737    | 0,047733355  | 28        | 0,118     | 0,055    | Artificializado (com degraus)                    |
| 3     | 0,05812          | 0,1011288    | 0,061885843  | 32        | 0,113     | 9,254    | Artificializado (com degraus)                    |
| 4     | 0,0546           | 0,120666     | 0,046613916  | 26        | 0,09      | 0,131    | Artificializado (sem degraus)                    |
| 5     | 0,05364          | 0,042912     | 0,042836674  | 60        | 0,075     | 0,107    | Artificializado (sem degraus)                    |
| 6     | 0,08494          | 0,1044762    | 0,106424726  | 71        | 0,064     | 0,078    | Artificializado (sem degraus)                    |
| 7     | 0,15646          | 0,4161836    | 0,111757143  | 41        | 0,084     | 0,095    | Corredeiras e Degraus I (leito plano/escadaria)  |
| 8     | 0,23246          | 0,58115      | 0,27114685   | 73,3      | 0,084     | 0,064    | Corredeiras e Degraus I (leito plano/escadaria)  |
| 9     | 0,10430839       | 0,286848073  | 0,074505993  | 24        | 0,09      | 0,066    | Degraus e Poços I                                |
| 10    | 0,348448687      | 0,961718377  | 0,454412396  | 60        | 0,062     | 0,087    | Degraus e Poços I                                |
| 11    | 0,092449923      | 0,181201849  | 0,062962531  | 40        | 0,07      | 0,084    | Degraus e Poços I                                |
| 12    | 0,057927658      | 0,084574381  | 0,041376899  | 30        | 0,064     | 0,11     | Degraus e Poços I                                |
| 13    | 0,121437423      | 0,10929368   | 0,132278809  | 44        | 0,111     | 10,024   | Corredeiras e Degraus II (leito plano/escadaria) |
| 14    | 0,489130435      | 0,611413043  | 0,809016227  | 145       | 0,074     | 0,039    | Corredeiras e Degraus II (leito plano/escadaria) |
| 15    | 0,115761354      | 0,196794301  | 0,471151092  | 65        | 0,091     | 0,076    | Corredeiras e Degraus II (leito plano/escadaria) |
| 16    | 0,029683507      | 0,038588559  | 0,024815655  | 65        | 0,096     | 0,086    | Corredeiras e Degraus II (leito plano/escadaria) |
| 17    | 0,199192463      | 0,153378197  | 0,284560661  | 76        | 0,088     | 0,074    | Degraus e Poços II                               |
| 18    | 0,282511211      | 0,316412556  | 0,363607048  | 45        | 0,069     | 0,054    | Cascatas e Poços (Degraus e Poços/Cascata)       |
| 19    | 0,039857421      | 0,051416073  | 0,031829965  | 80        | 0,076     | 0,025    | Leito rochoso                                    |
| 20    | 0,014544641      | 0,030398299  | 0,009905551  | 47,5      | 0,092     | 0,052    | Leito rochoso (com sedimentos finos acumulados)  |
| 21    | 0,398550725      | 0,019927536  | 0,154388913  | Sem carga | 0,059     | 0,179    | Leito rochoso                                    |
| 22    | 0,043324492      | 0,160300619  | 0,028488162  | 40        | 0,034     | 1,108    | Degraus e Poços III                              |
| 23    | 0,266343826      | 0,487409201  | 0,38049118   | 116,6     | 0,099     | 0,193    | Degraus e Poços III                              |
| 24    | 0,057862491      | 0,098366236  | 0,031242809  | 42,5      | 0,081     | 0,13     | Cascatas e Poços (Degraus e Poços/Cascata)       |
| 25    | 0,735294118      | 0,647058824  | 1,001536333  | 47,8      | 0,048     | 0,106    | Cascatas e Poços (Degraus e Poços/Cascata)       |

Quadro 1: Varáveis hidrométricas e sedimentológicas das seções amostradas.

Conjuntamente com as observações morfológicas em campo, percebeu-se que os valores do número de Froude situados entre zero e 0,2 correspondem exclusivamente a áreas aluviais de remanso e fluxo relativamente lento, especificamente poços ou trechos planos de baixa energia que em sua maioria compõem o trecho artificial do canal fluvial. Apenas uma seção situada em leito rochoso possui grande redução da declividade local e baixo valor do número de Froude, sendo classificada como poço. Os valores no intervalo de 0,2 e 0,6 são característicos de trechos de degraus, corredeiras e rápidos (muitas vezes em substrato rochoso), com fluxo relativamente mais competente se comparado aos valores anteriores. Tais números correspondem especificamente a sete seções do conjunto total analisado.

Os valores mais elevados (entre 0,6 e 1,1) correspondem aos fluxos mais próximos ao padrão encachoeirado, sendo aqui denominados de fluxo em cascata, de maneira análoga a Montgomery e Buffington (1997). Este tipo de fluxo possui alto poder erosivo e de esculturação da calha fluvial, repercutindo também na morfologia das vertentes e no modelado da bacia de drenagem. Foram registrados apenas dois pontos nessa categoria: o ponto 25, mais próximo da cabeceira de drenagem, e o ponto 14, que corresponde a um trecho do canal com encaixamento considerável e presença de matacões expressivos (alguns chegando, inclusive, a 1 m de diâmetro), o que, conjuntamente, tende a gerar fluxos de cascata.

Comparando as análises granulométricas dos sedimentos de leito com a classificação morfológica de Montgomery e Buffington (1997), os resultados reafirmam novamente a nítida relação entre as morfologias de leito e a dinâmica hidrossedimentológica dos trechos investigados. Ao tomar, por exemplo, os valores de areia muito grossa (2,0 a 1,0 mm) percebe-se que o menor percentual se restringe exatamente ao trecho de cascatas e poços (pontos 25 e 24). Seqüencialmente os valores sofrem um rápido aumento entre os pontos 23 e 21, correspondendo em sua maioria a degraus e poços. A jusante localizam-se trechos de leito rochoso, de cascatas-poços, de degraus-poços, e predominantemente morfologias de corredeiras e degraus. A partir do ponto 11, o percentual dessa fração de areia aumenta novamente, correspondendo a degraus e poços na parte superior, corredeiras e poços na porção intermediária e ao trecho restaurado nas proximidades do exutório da bacia. Compreendendo a influência exercida pela disposição e granulometria dos sedimentos de leito, bem como das variáveis hidráulicas no fluxo, sabe-se que a dinâmica local dos trechos de maior rugosidade (especialmente de degraus e poços) favorece a deposição de quantidades significativas de carga sedimentar no leito em função da própria barreira representada pelos blocos e matacões. Os trechos com menor percentual dessa fração de areia constituem (apesar de possuírem matacões no leito) áreas em que o fluxo supera a atuação desses elementos. Em condições intermediárias, encontram-se majoritariamente os trechos artificiais e de corredeiras e poços (que já representam uma transição de degraus para o leito plano), leito rochoso e alguns pontos de cascatas-poços, e degraus-poços. Tais correntes são relativamente mais competentes se comparadas àquelas em que granulometria exerce um papel predominante na regulação do fluxo (*flow-regulated*). De forma análoga à influência do material de leito, é imprescindível considerar que a redução da declividade do canal auxilia a entender parcialmente a dinâmica sedimentológica diferenciada desses trechos.

A carga dissolvida (TDS) não apresentou modificações expressivas no perfil longitudinal do curso d'água, evidenciando assim, que a influência das diferentes morfologias da calha fluvial se fez de forma bem menos pronunciada no transporte de elementos químicos em solução.

Apesar da pequena variação apresentada longitudinalmente pelos cascalhos, seixos e blocos mensurados pelo método *Pebble Count*, podem ser encontrados matacões e blocos em quase toda a calha fluvial, nos taludes marginais e encostas. Tendo em vista a localização do curso fluvial na porção serrana, próximo às cabeceiras de drenagem, pode-se deduzir que dificilmente os blocos encontrados no fundo do vale são exclusivamente de origem fluvial. Como salientado por outros estudos em regiões montanhosas (Dietrich e Dunne, 1978; Benda, 1990; Lancaster et al., 2001; Caine e Swanson, 1989; Benda e Dunne, 1997), o grandes fornecedores de material grosseiro nesses casos advém de processos de encosta como movimentos de massa, com destaque à atuação das quedas de blocos e dos fluxos de detritos (*debris flow*).

Igualmente, a interação desta gama de processos condicionantes da morfogênese e dinâmica fluvial torna ainda mais complexa e difícil a predição de fenômenos extremos gerando, por conseguinte, um aumento do intervalo de incertezas no sistema ambiental em questão. Como subsídio aos fatos mencionados, registros sedimentares com matriz de granulometria entre bloco e cascalho sub-arredondados a angulosos, possivelmente relacionados a eventos colúvio-aluvionares, foram observados em diversos trechos marginais (vertentes e taludes) do córrego Ponte Queimada o que, reforça ainda mais, a existência e recorrência de eventos naturais de grande magnitude e importância local provavelmente associados a movimentos de massa rápidos e transporte fluvial de expressiva competência, ocorridos em uma escala de tempo anterior à ocupação humana (Fig. 2).

Estes registros paleoambientais evidenciam que, analogamente aos fenômenos ocorridos no passado, futuros eventos extremos como chuvas torrenciais podem, em conjunto com as características do relevo, provocar o fornecimento de elevadas cargas sedimentares em curto intervalo de tempo, podendo comprometer a estabilidade da obra fluvial realizada, e possibilitar a mutação dos processos hidrodinâmicos locais e das porções a jusante.

Somado aos processos morfoclimáticos mencionados, que em múltiplas escalas têmporo-espaciais podem redefinir a arquitetura da paisagem e influenciar a estrutura da obra investigada, algumas variáveis hidrométricas tornaram-se ferramentas de grande importância na interpretação ambiental, presente e futura, do sistema, tanto em seus aspectos naturais quanto artificiais. Dentre os compartimentos fluviais pesquisados, destaca-se o trecho artificializado que apresentou variáveis hidrológicas com valores discrepantes em relação aos trechos naturais a montante. Todavia, deve-se ressaltar que as modificações hidrossedimentológicas ocorreram em todos os segmentos do perfil longitudinal do rio. Dessa forma, é necessário considerar a existência de variações de ordem natural, próprias de ambientes serranos sem anomalias no sistema, e alterações de cunho antropogênico, condicionadas e/ou aceleradas pela artificialização, com alta probabilidade de anomalias futuras. De maneira geral, o segmento artificializado apresentou em relação aos demais, uma redução bastante nítida na dispersão de valores de algumas variáveis, tendendo muito mais que qualquer outro trecho



**Figura 2: Um dos registros sedimentares encontrados nas margens e vertentes do canal.**

investigado a uma homogeneização e redução da diversidade morfológica e hidrossedimentológica (Gráficos 1, 2, 3 e 4). Nota-se que nos valores do Índice de Froude e de velocidade (ponto 6 a 2), onde se localiza o segmento artificializado, há uma variação em termos proporcionais muito menor que todos os trechos a montante e que, ao comparar os dois gráficos, fica ainda mais clara a relação entre as reduções e mudanças de velocidade e regime do fluxo.

Com efeito, a tendência de diminuição dos valores de velocidade média e número de Froude modificam sobremaneira as interações entre o escoamento e as partículas do meio, sendo que tal fato regula em termos hidrodinâmicos uma complexa ligação de processos de erosão, transporte e deposição fluvial que modifica continuamente os sistemas ambientais (físicos e bióticos), com conseqüências efêmeras ou de milhares de anos (Christofoletti, 1981; Christofoletti, 1999). Não obstante, esta correlação, entre velocidade e regime de fluxo tem sido confirmada em diversos estudos de sistemas fluviais (Summerfield, 1991). Por sua vez, os valores de largura e profundidade medidos ao longo da calha do córrego Ponte Queimada mostraram uma relação geral inversa – tendência de aumento da largura concomitantemente à diminuição dos valores de profundidade –, mas semelhante quanto às interpretações. No que concerne à largura média, o segmento artificial apresentou conjuntamente (mas não apenas) com o compartimento morfológico corredeiras e degraus II, os menores valores observados. De forma análoga, as profundidades médias por segmento foram mais uniformes em ambos os trechos, com ligeira diminuição dos valores e maior uniformidade, se comparados aos dados de largura. Convém reforçar que, em relação à morfologia de leito, estes dois segmentos são os de maior semelhança, o que pode explicar, em parte, a similaridade hidrológica dos dados apresentados.

Ademais, como já mencionado, deve-se considerar as mudanças normais de algumas variáveis como, por exemplo, o efeito natural da geomorfologia local que no trecho antropogênico possui o menor valor de declividade da bacia hidrográfica e que, obviamente, condicionará, nesta escala de tempo, a geometria do canal fluvial (largura e profundidade) e, conseqüentemente, a dinâmica de transporte sedimentar supracitados (Fig. 3 Perfil Longitudinal).





**Figura 3: Perfil Longitudinal do córrego Ponte Queimada e seus compartimentos hidrossedimentológicos.**

Estas transformações na dinâmica fluvial são confirmadas – e melhor compreendidas – quando interpretados os dados sedimentológicos referentes à carga de leito, especialmente de granulometria inferior a cascalho. Com a redução da declividade, da velocidade média, do regime de fluxo e da geometria do canal houve mudanças longitudinais na carga de leito em todo o córrego Ponte Queimada (Gráf.5, 6, 7 e 8). Dentre estas mudanças ressalta-se a nítida tendência de aumento percentual da deposição de areia e redução comparativa dos valores de silte e argila, que refletem, indiretamente, a diminuição da força crítica de cisalhamento e, conseqüentemente, menores valores de competência fluvial.

Dessa forma, pode-se considerar que em função do padrão da carga de leito há, naturalmente, no sentido do fluxo, aumento dos processos agradacionais, especialmente no compartimento artificial. E que, mantidos os processos atuais, que caracterizam a dinâmica hidrossedimentológica do córrego, há uma forte tendência ao acúmulo de sedimentos arenosos no leito da calha fluvial. No campo das incertezas destacam-se a variabilidade temporal dessas mudanças, que podem se processar lenta ou drasticamente em dias, anos ou décadas, além da possibilidade de transformações na circulação hídrica subsuperficial, por circunstâncias naturais ou antrópicas, com conseqüências hidrológicas diretas.

Por fim, não obstante as interrelações discutidas, com o incremento da urbanização e impermeabilização na bacia hidrográfica, sobretudo nas regiões de alta declividade, e o aumento dos índices de temperatura e pluviosidade, amplamente confirmados para o Quaternário em Minas Gerais (Araújo et al., 2005), podem haver mudanças ambientais ainda mais profundas. O que torna ainda mais complexa a predição exata das mudanças e respostas, assim como a construção de modelos determinísticos futuros para a bacia investigada.

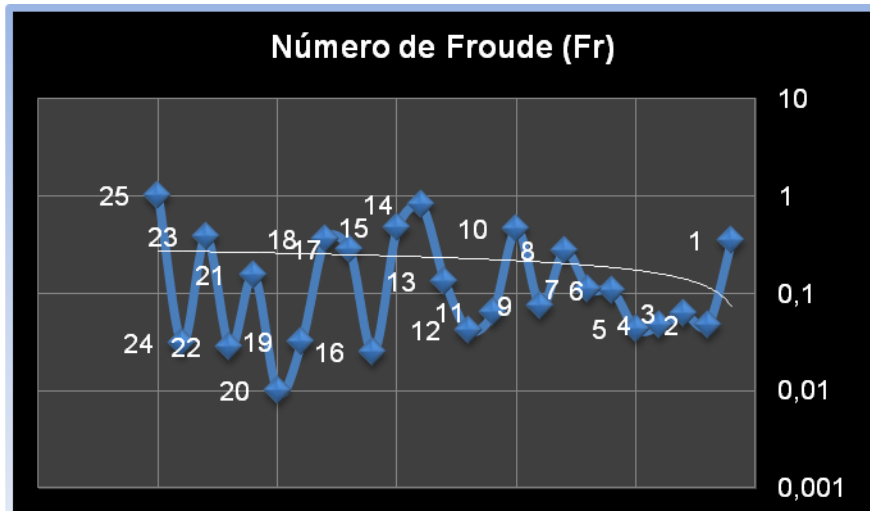


Gráfico 1: Número de Froude por seção amostrada. Dados plotados em escala semi-logarítmica com curva de tendência.

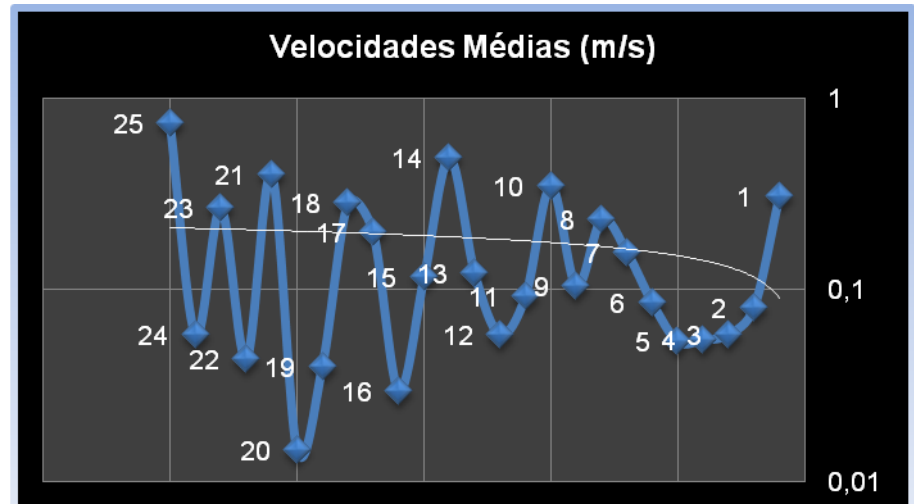


Gráfico 2: Velocidades médias (m/s) por seção amostrada. Dados plotados em escala semi-logarítmica com curva de tendência.



Gráfico 4: Profundidade da calha fluvial (m) por seção amostrada. Dados plotados em escala semi-logarítmica com curva de tendência.



Gráfico 3: Largura da calha fluvial (m) por seção amostrada. Dados plotados em escala semi-logarítmica com curva de tendência.

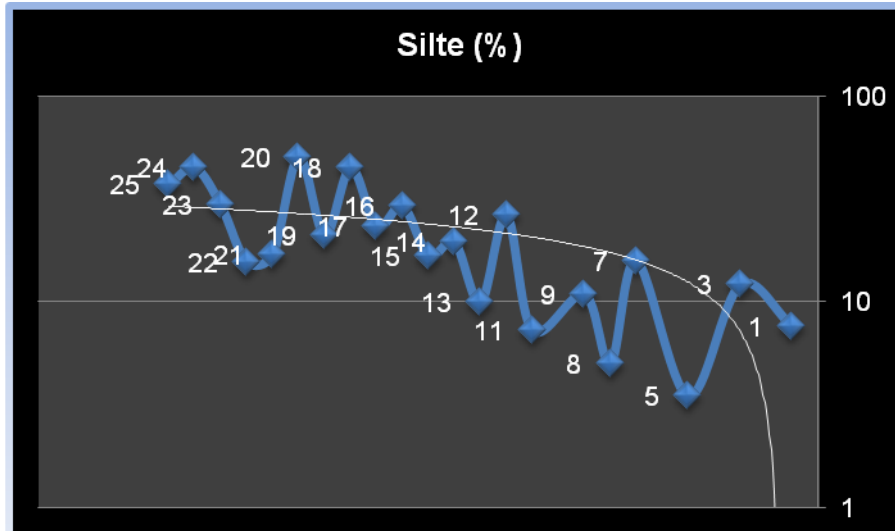


Gráfico 5: Percentual de silte por seção amostrada. Dados plotados em escala semi-logarítmica com curva de tendência.

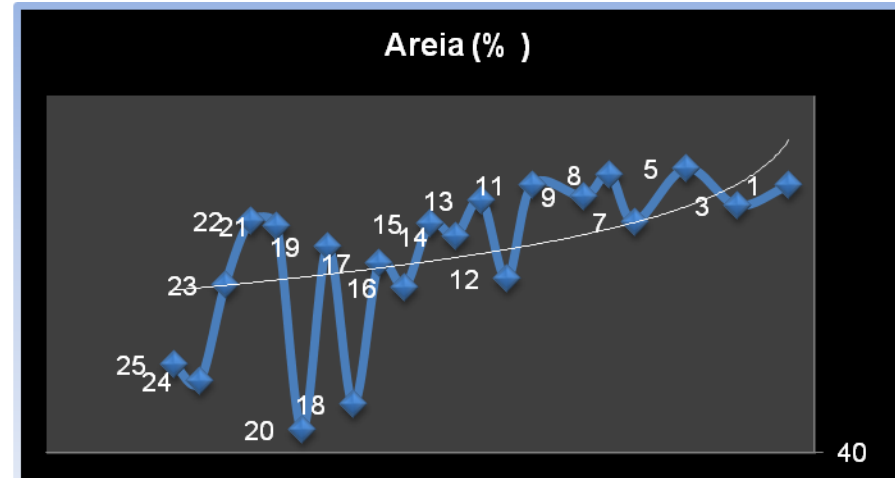


Gráfico 7: Percentual de argila (%) por seção amostrada. Dados plotados em escala semi-logarítmica com curva de tendência.

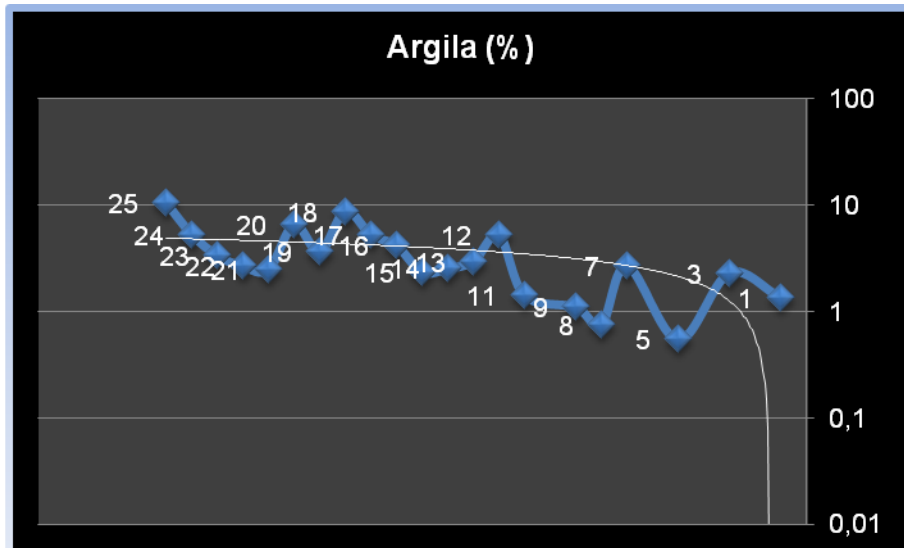


Gráfico 6: Percentual de argila (%) por seção amostrada. Dados plotados em escala semi-logarítmica com curva de tendência.

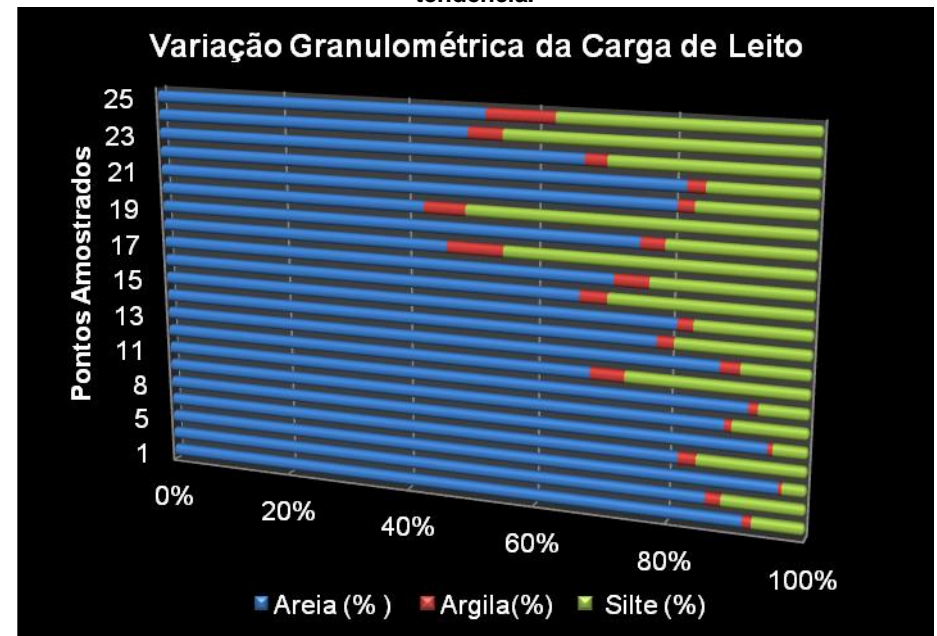


Gráfico 8: Variação Granulométrica Percentual da carga de leito (%) por seção amostrada.

#### 4. CONCLUSÕES.

O curso d'água investigado apresentou variações morfológicas e hidráulicas expressivas em trechos relativamente curtos, como é próprio de ambientes serranos próximos a cabeceiras de drenagem. É importante destacar também, a regulação exercida pelos clastos do leito sobre a dinâmica fluvial contemporânea, revelando que nem sempre a variação granulométrica da carga de fundo é uma variável dependente do fluxo, como tradicionalmente é relatada nos estudos de geomorfologia fluvial e hidrologia.

Ademais, o segmento artificializado possui especificidades hidrológicas, geomorfológicas e sedimentológicas, que revelaram a interação entre as respostas do sistema fluvial face às transformações humanas nesse ambiente. Neste quesito, as condições naturais do comportamento fluvial neste trecho, juntamente com as alterações antropogênicas tenderão a manter o padrão de sedimentação vigente.

Além das incertezas inerentes à complexidade desse sistema, é condizente afirmar que a ausência de estudos anteriores à efetivação das obras do Programa Parque Preservado, contribuiu decisiva e negativamente na avaliação pós-obra. Não obstante, dentro do paradigma do Gerenciamento Adaptativo da Água, as informações pré-projeto são fundamentais à própria adaptação que lhe marca as diretrizes. Dessa forma, ao evidenciar e avaliar apenas o cenário atual, inúmeros dados relevantes não puderam ser tratados, implicando conseqüentemente na construção de um diagnóstico e não de uma avaliação continuada.

Por fim, espera-se que esta pesquisa tenha contribuído não apenas no entendimento da dinâmica contemporânea, mas também, de forma sintética, na compreensão e predição de fenômenos hidrossedimentológicos futuros e suas respostas. Além disso, pela aplicabilidade de seus métodos em diversas pesquisas ambientais almeja-se a possibilidade de organização e hierarquização das variáveis naturais e antropogênicas em outras obras fluviais. Dessa forma, acredita-se ter contribuído positivamente no processo de realimentação de informações e na avaliação e aprendizagens continuadas de projetos de intervenção nos recursos hídricos, o que caracteriza uma das fases da teoria do Gerenciamento Adaptativo da Água.

**AGRADECIMENTOS** - ao Grupo de Pesquisa Geomorfologia e Recursos Hídricos (CNPq) – IGC/UFMG; ao Laboratório de Geomorfologia do IGC/UFMG; ao Programa PRONOTURNO pela bolsa de pesquisa (UFMG); à Pró-reitoria de Graduação (PROGRAD) da UFMG pelo auxílio financeiro para participação no evento.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ARAUJO, A.G.M.; NEVES, W.A.; PILO, L.B.; ATUI, J.P.V. Holocene dryness and human occupation in Brazil during the "Archaic Gap". **Quaternary Research**, v. 64, p. 298 – 307, 2005.

BENDA, L. E. The influence of debris flows on channels and valley floors in the Oregon Coast Range, U.S.A., **Earth Surf. Processes Landforms**, 15, 457– 466, 1990.

BENDA, L. E.; DUNNE, T. Stochastic forcing of sediment supply to channel networks from landsliding and debris flow. **Water Resour. Res.**, 33, 2849– 2863, 1997.

BERKES, F. FOLKE, C. COLDING, J.; **Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience**. Cambridge University Press, 2000.

BEVENGER, G. S.; KING, R. M. A Pebble Count Procedure for Assessing Watershed Cumulative Effects. **USDA Forest Service**, pg.1-16, 1995.

BRUMMER, C. J.; MONTGOMERY, D. R. Downstream coarsening in headwater channels. **Water R. Research**, vol. 39, núm. 10, pg. 1-14, 2003.

CAINE, N.; SWANSON, F. J. Geomorphic coupling of hillslope and channel systems in two small mountain basins, Z. **Geomorphol.**, 33, 189– 203, 1989.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial: O Canal Fluvial**. Ed. Edgar Blutchter, São Paulo, 1981.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. Ed. Edgar Blutchter, São Paulo, 1999.

CRUZ, R. C. **Prescrição de vazão ecológica: aspectos conceituais e técnicos para bacias com carência de dados**. Tese (Doutorado em Ecologia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

DIETRICH, W. E.; DUNNE, T. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain, *Z. Geomorphol.*, 29, 191– 206, 1978.

DOWNS, P. W.; KONDOLF, G. M. Post-Project Appraisals in Adaptive Management of River Channel Restoration. **Environmental Management**, Vol. 29, No. 4, pp. 477–496, 2002.

FELIPPE, M. F. **Caracterização e tipologia de nascentes em Unidades de Conservação de Belo Horizonte-MG com base em variáveis geomorfológicas, hidrológicas e ambientais**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GOLDEN, L.A.; SPRINGER, G.S. Channel geometry, median grain size, and stream power in small mountain streams. **Geomorphology**, vol. 78 pgs. 64–76, 2006.

GOMI, T.; SIDLE, R. C.; SWANSTON, D. N. Hydrogeomorphic linkages of sediment transport in headwater streams, Maybeso Experimental Forest, southeast Alaska. **Hydrol. Process**. Vol. 18, pgs. 667–683, 2004.

GOUDIE, A. **Encyclopedia of geomorphology**. Londres: Taylor & Francis Group, 2004.

HEY, R. D. Fluvial geomorphological methodology for natural stable channel design. **American water resources association**, vol. 42(2), pgs. 357-374, 2006.

HOWARD, A. D. Long Profile of Development of BedRock Channels: Interactions of Weathering, Mass Wasting, Bed Erosion and Sediment Transport. **Geophysical Monograph**, vol. 107, pgs.297-319, 1998.

LANCASTER, S. T.; HAYES, S. K.; GRANT, G. E. Modeling sediment and wood storage and dynamics in small mountainous watersheds. In: DORAVA, J. M. et al. **Geomorphic Processes and Riverine Habitat**. AGU, Washington D. C., pp. 85– 102, 2001.

LAVARINI, C; FELIPPE, M. F.; MAGALHAES JR., A. P. Panorama do estudo de nascentes e cabeceiras de drenagem em periódicos nacionais. **Anais: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Viçosa, 2009.

LEE, K. N.. Appraising adaptive management. **Conservation Ecology** 3(2): 3, 1999.

MACIEL, M.C. Programa Parque Preservado. **Paisagem ambiente**, n.15, São Paulo, 2002.

MCLAIN, R. J.; LEE, E R. G. Adaptive management, promises and pitfalls. **Environmental Management**, vol. 20, pgs. 437– 448, 1996.

- MONTGOMERY, D.R.; BUFFINGTON, J.M. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. **GSA Bulletin**, v. 109; n. 5; p. 596–611, 1997.
- PAHL-WOSTL, C.; DOWNING, T., KABAT, P., MAGNUSZEWSKI, P., MEIGH, J., SCHLUETER, M., SENDZIMIR, J.; WERNERS, S. Transition to Adaptive Water Management; The NeWater project. Water Policy. **NeWater Working Paper X.**, Institute of Environmental Systems Research, University of Osnabrück, 2005.
- PAHL-WOSTL, C. Towards sustainability in the water sector: The importance of human actors and processes of social learning. **Aquatic Sciences**, vol. 64, 394-411, 2002a.
- REID, L. M. Research and cumulative watershed effects, Berkeley, California. Pacific Southwest Research Station: **U.S. Department of Agriculture**, Forest Service General Technical Report PSW-GTR-141, 118 p, 1993.
- RUBIN, D. M.; TOPPING, D. J. Quantifying the relative importance of flow regulation and grain size regulation of suspended sediment transport and tracking changes in grain size of bed sediment  $\beta$ . **Water R. Research**, vol. 37, no. 1, pgs. 133–146, 2001.
- SCHUMM, S. A. **The Fluvial System**. John Wiley and Sons, New York, 1977.
- SUMMERFIELD M. A. **Global Geomorphology**: an introduction of the study of landforms. Longman Scientific & Technical, 1991.