

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ALTERAÇÕES DE VARIÁVEIS HIDROGEOMORFOLÓGICAS DO RIO GUALAXO DO NORTE PELO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO (MARIANA, MG)

Victor José Brey-Gil Brito de Carvalho^{1}; Luiz Fernando de Paula Barros¹; Miguel Fernandes Felipe²;*

Antônio Pereira Magalhães Jr¹ & Diego Rodrigues Macedo¹

RESUMO – Em 5 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de fundão, no Município de Mariana em Minas Gerais, liberando 34 milhões de m³ de rejeitos e causando diversos impactos ambientais, sociais e econômicos. Esse trabalho tem como objetivo compreender como os rejeitos alteraram a dinâmica de ajuste do canal do rio Gualaxo do Norte, diretamente afetado pelo rompimento. Não tendo sido atingido pelos rejeitos, o rio do Carmo foi adotado como referência para comparação devido às semelhanças hidrogeomorfológicas. Foram calculados parâmetros da geometria hidráulica de ambos os rios com base em dados de duas estações fluviométricas, uma no rio Gualaxo do Norte e uma no rio do Carmo, entre os anos de 2000 a 2015 (antes do rompimento) e 2016 a 2018 (depois do rompimento). Os parâmetros de vazão (Q), largura (w), profundidade (d) e velocidade (v) foram avaliados através de diagramas de dispersão e testes estatísticos. Os resultados apontam para modificações no canal do rio Gualaxo do Norte, enquanto o rio do Carmo não apresentou modificações significativas, como esperado. Com isso pode-se concluir que os rejeitos alteraram o equilíbrio do canal afetado e este sofreu processos de reajustes após o acréscimo de carga sedimentar.

ABSTRACT– On November 5th, 2015, The Fundão dam in Mariana, Minas Gerais was disrupted, dumping 34 million m³ of tailings spills into the river system and resulting in several environmental, social and economic impacts. This work aims to understand how this fine sediment altered the channel dynamic adjustment of the rio do Gualaxo do Norte affected by the rupture. We used the Carmo river as control due its hydrogeomorphological similarity to Gualaxo do Norte river, since it was not affected by the tailings spills. To do so, the parameters of the hydraulic geometry of both rivers were studied based on two fluviometric stations, one in each one, between 2000 and 2015 (before the disruption) and 2016 to 2018 (after the event). The parameters of flow (Q), width (w), depth (d) and velocity (v) were evaluated through dispersion diagrams and statistical tests. The results showed changes in the channel of the Gualaxo do Norte river while the Carmo river did not present any changes, as expected. We concluded that the tailings spills altered the equilibrium of the affected river and this adjusted to a new equilibrium after the increase of this sedimentary load.

Palavras-Chave – Rejeitos minerais; desastres ambientais; rio Gualaxo do Norte.

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Laboratório de Geomorfologia e Recursos Hídricos – RIVUS; Avenida Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Cep 31.270-901, Belo Horizonte, MG, breycarvalho@hotmail.com, luizbarros@ufmg.br, antonio.magalhaes.ufmg@gmail.com, diegorm@ufmg.br

² Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Geociências, Grupo de Pesquisa e Extensão Temáticas Especiais Relacionadas à Terra e Água – TERRA; Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário, São Pedro, Cep 36.036-900 - Juiz de Fora, MG, mffelippe@gmail.com

INTRODUÇÃO

Em 5 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro de Fundão, localizada no Município de Mariana (Minas Gerais), liberando grande quantidade de lama e resíduos de mineração na bacia do rio Doce e gerando danos ambientais, sociais e econômicos (SEDRU, 2016). Foram liberados 34 milhões de m³ de rejeitos sob a forma de fluxos de lama, que percorreram até 600 quilômetros de distância ao longo dos fundos de vales. Cerca de 16 milhões de m³ continuam sendo carregados gradativamente para jusante, em direção ao Oceano Atlântico (IBAMA, 2015). Um elevado aporte de sedimentos de textura fina foi liberado pelo rompimento, os quais foram carregados e, grande parte, depositados ao longo dos leitos fluviais. O fundo do vale do rio Gualaxo do Norte, na bacia do alto rio Doce, foi o mais impactado em termos hidrossedimentológicos, pois abrange a área diretamente afetada pelo rompimento (Figura 1). O fornecimento repentino de tão elevada carga sedimentar impactou a capacidade e a competência de transporte do rio Gualaxo do Norte, alterando a dinâmica de ajuste do canal em termos geomorfológicos. A investigação destas alterações pode ser baseada na mensuração de parâmetros de geometria hidráulica, como vazão, profundidade, largura e velocidade de fluxo (Leopold *et al.*, 1964; Christofolletti, 1981).

A)



B)



Figura 1. Deposição de rejeitos de minério de ferro nas (A) margens e (B) leito do rio Gualaxo do Norte.

Em termos geomorfológicos, os cursos d'água esculpem os seus canais fluviais buscando otimizar a energia empregada no escoamento de água e sedimentos. Os parâmetros de geometria hidráulica, particularmente a seção largura-profundidade, o perfil longitudinal e a organização espacial dos canais, dependem não apenas das características do fluxo (magnitude, velocidade e regime), mas também do tipo de substrato (rochoso ou aluvial), da natureza da carga sedimentar

(carga de fundo, suspensa ou dissolvida) e da quantidade de material transportado (Stevaux & Latrubesse, 2017).

Considerando que o fluxo de lama alterou potencialmente a dinâmica de canais da bacia do rio Doce, o objetivo deste trabalho é avaliar as mudanças nos padrões de ajustes do canal após o rompimento por meio das relações entre parâmetros de geometria hidráulica, particularmente vazão (Q), profundidade do canal (d), largura do canal (w) e velocidade do fluxo (v). Foi estudada a dinâmica de ajustes antes e após o evento, partindo-se da hipótese de que o desastre trouxe alterações significativas na dinâmica fluvial.

ÁREA DE ESTUDO

Com 83.400 km² a bacia do Rio Doce está localizada na região sudeste do país, abrangendo os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. O Rio Doce nasce da confluência dos rios Piranga e Carmo, cujas nascentes estão situadas nos municípios de Ressaquinha e Ouro Preto (MG) e tem a sua foz no oceano Atlântico, na altura da vila de Regência, em Linhares (ES). Aproximadamente 98% da bacia se insere no Bioma Mata Atlântica e 2% no bioma Cerrado, apresentando relevo ondulado, montanhoso e acidentado (CBH-DOCE, 2019). O trabalho buscou focar a dinâmica de ajuste do canal do rio Gualaxo do Norte, dado que foi o curso d'água de maior porte mais afetado pelos fluxos de lama liberados pelo rompimento. A barragem de Fundão impactou de imediato o córrego Ferrugem e o córrego Santarém, este último desaguando no rio Gualaxo do Norte, que, por sua vez, conflui com o rio do Carmo no município de Barra Longa. Este último foi utilizado como controle de referência para comparação, pois possui porte semelhante ao rio Gualaxo do Norte e não foi atingido pelo acidente (Figura 2). Ambos os canais são de 6ª ordem (*sensu* Strahler).

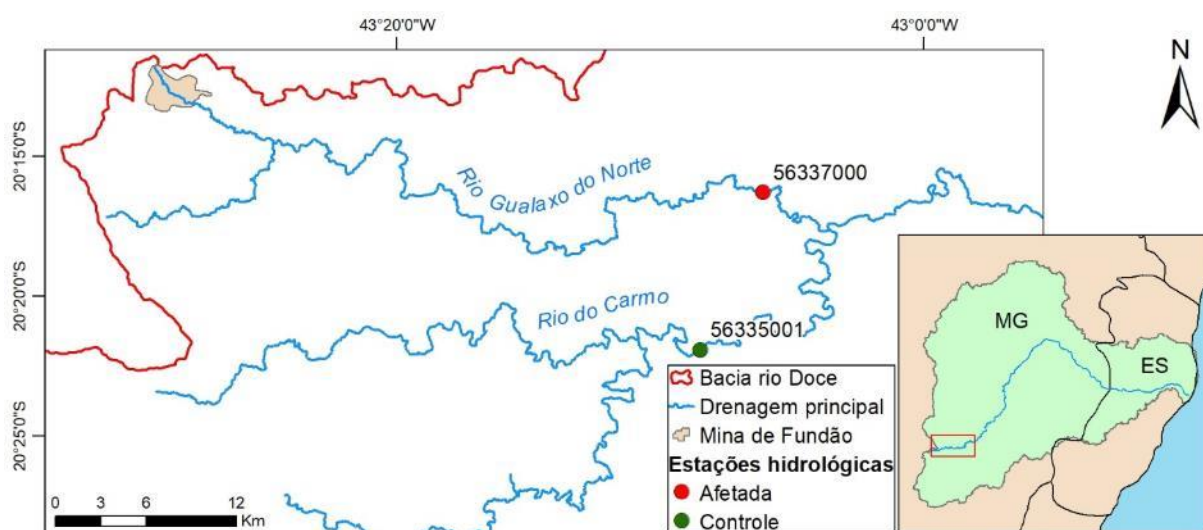


Figura 2. Localização das estações de monitoramento hidrológico utilizadas neste estudo.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Base de dados

Foram analisados dados hidrológicos de duas estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas – ANA (2019), disponíveis na plataforma Hidroweb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>). Uma está localizada no rio Gualaxo do Norte (estação 56337000), latitude S 20° 16' 1.92" e longitude W 43° 6' 2.88". A segunda está no rio do Carmo (estação 56335001), latitude S 20° 21' 41.04" e longitude W 43° 8' 21.84", não tendo sido atingida pelo evento. Foram utilizados dados de vazão, profundidade e largura do canal e velocidade do fluxo, em dois momentos: (i) antes do acidente, entre 2000-2015, e (ii) após o acidente, entre 2016-2018.

Análise dos dados

A análise das alterações na dinâmica de ajuste do canal foi realizada através dos elementos da geometria hidráulica (Leopold & Maddock, 1953), os quais são inter-relacionados e podem ser derivados a partir de relações matemáticas (Equações 1-3):

$$\text{Largura} \quad w = aQ^b \quad (1)$$

$$\text{Profundidade} \quad d = cQ^f \quad (2)$$

$$\text{Velocidade} \quad v = kQ^m \quad (3)$$

Sendo: Q = descarga ou vazão (velocidade x área); a , c , k os coeficientes; b , f , m os expoentes, onde $b + f + m = 1$.

Quando as equações 1, 2 e 3 são representadas graficamente em relação aos valores de vazão (Q), em escala logarítmica, os valores de b , f e m correspondem à inclinação da reta (β_1).

Neste sentido, as equações de relação entre a vazão, largura, profundidade e velocidade foram calculadas nos momentos antes (2000-2015) e após o rompimento (2016-2018) no rio Gualaxo do Norte e no rio do Carmo. As retas foram plotadas em diagramas de dispersão para análise visual. A semelhança estatística entre a inclinação das retas (β_1) e o intercepto (β_0) foram testadas entre os dois momentos, utilizando um teste-t para variâncias não-equivalentes (Charnet *et al.*, 2008). Foi testada a hipótese nula que os coeficientes β_1 e β_0 são iguais ao nível de significância de 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra a alteração na dinâmica de ajuste de canal do rio Gualaxo do Norte após o acréscimo da carga de sedimentos oriundos do rompimento da barragem de Fundão, em 2015. Os

resultados mostram que o rio Gualaxo do Norte teve sua largura e profundidades alteradas, ou seja, o canal ficou mais estreito e profundo. Estudos realizados por Schumm (1963) em cursos d'água nos Estados Unidos mostram uma importante relação entre a quantidade de lama da carga sedimentar dos canais e seus condicionantes da relação entre largura (w) e a profundidade (d).

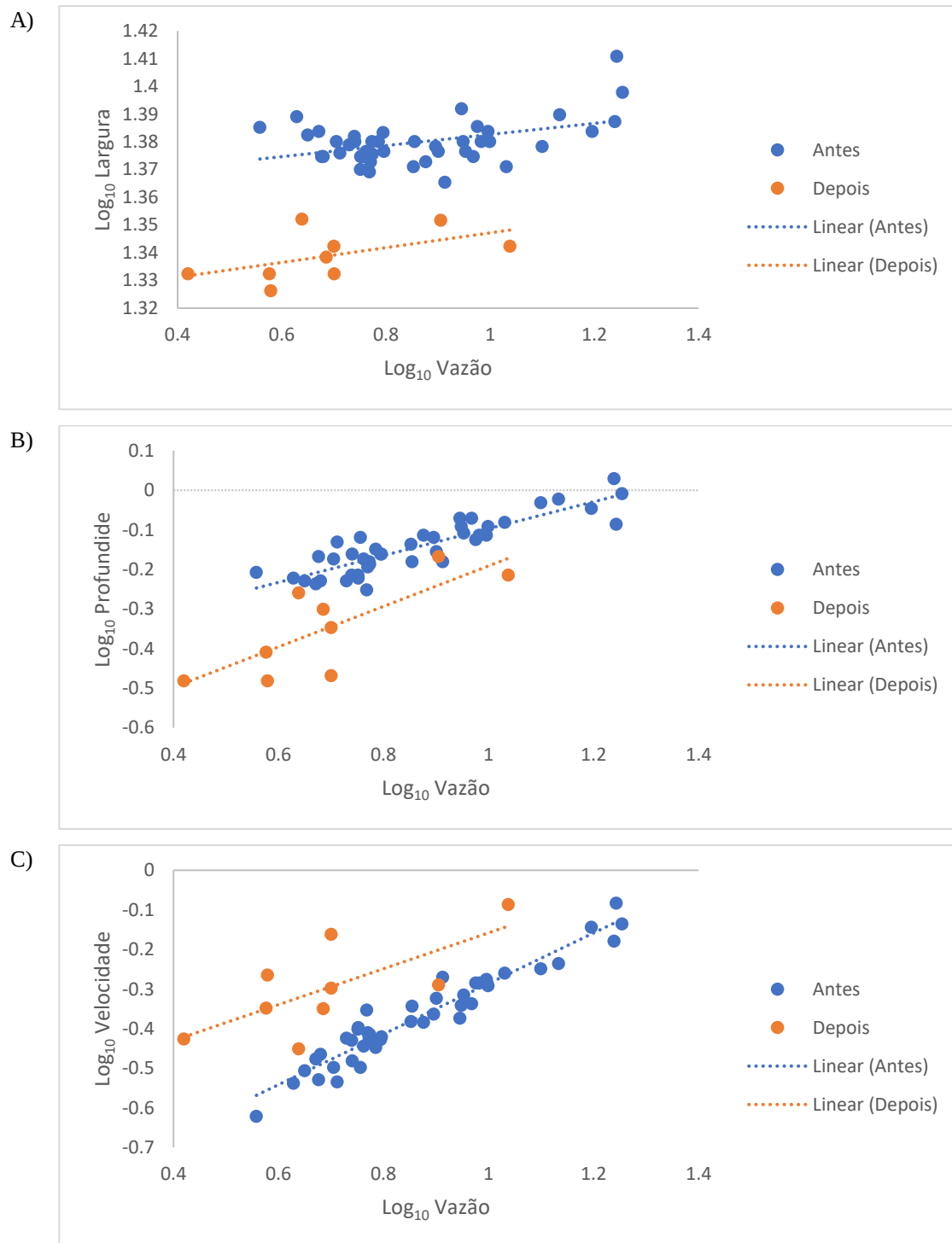


Figura 2. Relações entre (A) Largura e Vazão; (B) Profundidade e Vazão e (C) Velocidade e Vazão no rio Gualaxo do Norte nos momentos pré-acidente (2000-2015) e pós-acidente (2016-2018).

Com as referidas alterações, a velocidade do fluxo aumentou no trecho estudado, mostrando um ajuste característico de trechos fluviais de zonas situadas nas porções superiores das bacias (Setevaux & Latrubesse, 2017). Por outro lado, o canal do rio do Carmo não apresentou modificações, conforme o esperado, pois este não recebeu tanta carga sedimentar como o Gualaxo do Norte (Figura 4).

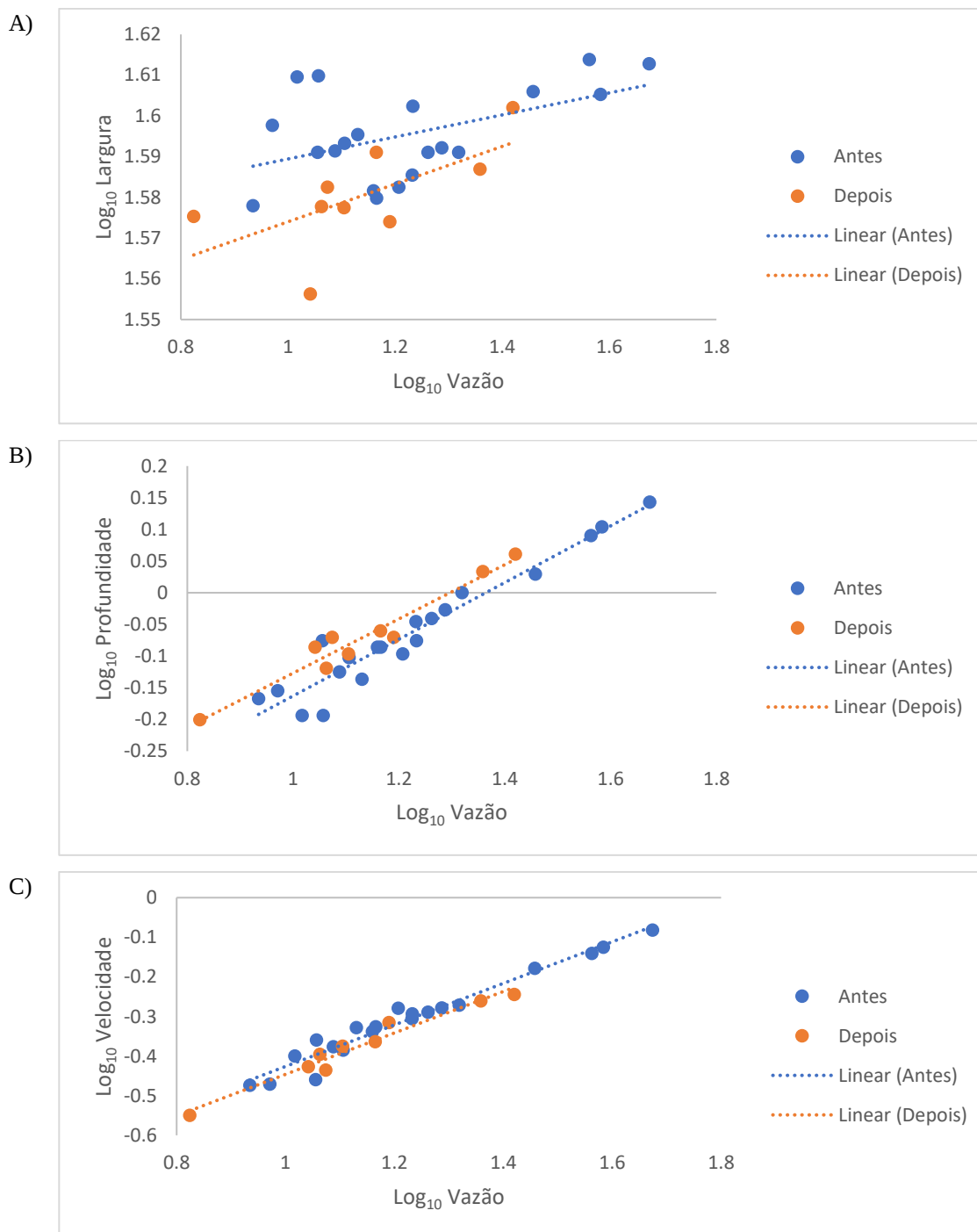


Figura 3. Relações entre (A) Largura e Vazão; (B) Profundidade e Vazão e (C) Velocidade e Vazão no rio do Carmo nos momentos pré-acidente (2010-2015) e pós-acidente (2016-2018).

A Tabela 1 permite aferir o comportamento dos expoentes b , f e m no rio Gualaxo do Norte e as alterações das relações da geometria fluvial geradas pelo aporte de sedimentos. Por outro lado, no rio do Carmo as relações continuam semelhantes no momento pós rompimento, trazendo a conclusão de que as alterações no rio Gualaxo do Norte não são de origem natural/regional, como seria o caso de ajustes hidrogeomorfológicos em função de mudanças no regime fluvial.

Tabela 1 – Diferenças dos coeficientes β_1 e β_0 nas relações entre parâmetros hidráulicos no rio Gualaxo do Norte (p-valor < 0,05 denota diferenças significativas).

	Largura vs Vazão		Profundidade vs Vazão		Velocidade vs Vazão	
Coeficientes	β_0	$\beta_1 (b)$	β_0	$\beta_1 (f)$	β_0	$\beta_1 (m)$
Antes	1,363	0,020	-0,436	0,339	-0,925	0,639
Depois	1,321	0,027	-0,702	0,511	-0,611	0,453
Teste-t (47 gl)	3,35	-0,41	3,38	-1,18	-4,29	1,89
p-valor	0,002	0,36	0,0004	0,07	0,0001	0,06

Tabela 2 – Diferenças dos coeficientes β_1 e β_0 nas relações entre parâmetros hidráulicos no rio do Carmo (p-valor < 0,05 denota diferenças significativas).

	Largura vs Vazão		Profundidade vs Vazão		Velocidade vs Vazão	
Coeficientes	β_0	$\beta_1 (b)$	β_0	$\beta_1 (f)$	β_0	$\beta_1 (m)$
Antes	1,562	0,027	-0,610	0,447	-0,951	0,524
Depois	1,528	0,046	-0,555	0,428	-0,969	0,523
Teste-t (25 gl)	1,27	-0,82	-0,83	0,34	0,3	0,03
p-valor	0,17	0,27	0,27	0,37	0,37	0,39

O estudo da dinâmica fluvial e dos fatores hidrogeomorfológicos associados embasa diversos objetivos de pesquisa, intervenção e gestão de recursos hídricos, cursos d'água, bacias hidrográficas e outros recortes espaciais. As relações entre variáveis da geometria hidráulica dos canais podem contribuir, inclusive, para processos de planejamento e gestão territorial (Suguio & Bigarella, 1990). Avanços do conhecimento podem trazer adaptações importantes na aplicação das relações entre parâmetros hidráulicos. Stevaux & Latrubesse (2017), por exemplo, salientam que vários autores tem substituído o expoente m pela relação da carga suspensa e da carga de fundo, o que amplia as possibilidades analíticas de dados hidrológicos nos estudos de ajustes de canais.

CONCLUSÕES

O trabalho mostrou, a partir da análise de variáveis da geometria hidráulica, que o rio Gualaxo do Norte sofreu impactos do rompimento da barragem de Fundão na morfologia do canal, particularmente na largura (tornou-se mais estreito) e na profundidade (tornou-se mais profundo). O comportamento dos parâmetros b , f e m em relação a Q , mostram a ocorrência de adaptações do canal após a liberação da elevada carga de rejeitos de minério de ferro. O rio do Carmo, por sua vez, não apresenta alterações estatisticamente significativas em suas variáveis de ajuste do canal, que permite concluir que não houve modificações de cunho natural/regional (p.ex. alteração no regime de vazões) que possam ter alterado a dinâmica do rio Gualaxo do Norte.

Falar em “equilíbrio fluvial” é complexo e pouco consensual, pois não há parâmetros muito claros sobre a definição de um estado de equilíbrio mensurável. Esta noção somente adquire sentido em uma avaliação temporal de relativa duração marcada por períodos com determinados comportamentos fluviais específicos. Entretanto, em termos gerais, o rompimento da barragem pode ser considerado um evento de rompimento do estado de “normalidade” vigente à época, no sistema fluvial do rio Gualaxo do Norte, ou de um limiar de absorção dos impactos causados pelo acréscimo sedimentar exagerado, levando-o a adaptações em sua morfologia. Tivemos, portanto, um evento geomorfológico de origem antropogênica que modificou as características hidrogeomorfológicas do canal.

Estes resultados são importantes para melhor caracterizar o real impacto dos rejeitos nos aspectos hidrogeomorfológicos dos canais da bacia a partir de dados de longo termo coletados *in loco*. Além disto, outras possibilidades analíticas, sobretudo as baseadas em informações provenientes de imagens de satélite e modelos de terreno são limitadas, pois não há informações pretéritas ao desastre em alta resolução espacial, além do custo elevado de aquisição destes produtos. Neste sentido, pretende-se continuar o processo de investigação dos impactos do rompimento ao longo do rio Doce a partir desta abordagem da Geomorfologia Fluvial.

AGRADECIMENTOS - O presente trabalho teve apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) – Projeto APQ-00231-17, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Projetos 402907/2016-7 e 407704/2018-3, e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. VJBBC é bolsista PIBIC CNPq. APMJ é bolsista de produtividade CNPq.

REFERÊNCIAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2019). “*Série Histórica de Estações*”. [S.I] Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>. Acesso em: 10 de março de 2019.
- CBH-DOCE - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (2019). “*A Bacia*”. [S.I]. Disponível em: <<http://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>>. Acesso em: 10 de março de 2019.
- CHARNET, R.; FREIRE, C. D. L.; CHARNET, E. M. R.; BONVINO, H. (1999). “*Análise de modelos de regressão linear com aplicações*”. Unicamp, Campinas, 356p.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1981) “*Geomorfologia Fluvial*”. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 313p.
- LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P (1964). “*Fluvial Processes in Geomorphology*”. Freeman, San Francisco.
- LEOPOLD, L. B.; MADDOCK, T. (1953) “*The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*”. US Government Printing Office, Washington, DC.
- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (2015). “*Laudo Técnico Preliminar Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais*”. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF.
- SCHUMM, S.A. (1963) “*A tentative classification of alluvial river channels*”. United States Geological Survey Circular 477, Washington, DC.
- SEDRO - SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL, POLÍTICA URBANA E GESTÃO METROPOLITANA (2016). “*Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG*”. Governo do Estado Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. (2017). “*Geomorfologia Fluvial*”. Oficina de Textos, São Paulo.
- SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. (1990). “*Ambientes fluviais*”. Ed. UFSC, Florianópolis, 183 p, 2ª ed.