

## ESTUDO DE APLICAÇÃO PRELIMINAR DO MODELO SIAQUA-IPH PARA DISPERSÃO LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS EM RIOS RESULTANTES DE ROMPIMENTOS DE BARRAGENS DE REJEITOS

*Rodrigo Sanchotene Quintela<sup>1\*</sup>; Fernando Mainardi Fan<sup>2</sup>;*

**Resumo** - Por possuir um território de proporções continentais e de notável diversidade geológica, o Brasil sempre fez da atividade mineradora um de seus pilares econômicos. Diariamente grandes quantidades de rejeitos são produzidas, sendo necessário construir locais de armazenamento adequados, como barragens. Após o rompimento da barragem de Fundão na cidade de Mariana-MG, a disposição adequada dos rejeitos tornou-se uma grande preocupação, tendo como principal motivo a proteção do meio ambiente. Este trabalho buscou validar a utilização do modelo de qualidade de água SIAQUA-IPH para analisar a dispersão de sedimentos resultantes de rompimentos de barragens de rejeitos. O caso estudado foi o próprio rompimento da barragem de Fundão (MG) e os resultados obtidos foram comparados com os dados divulgados pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM). Os resultados obtidos para a relação entre os períodos de passagem das ondas de cheia observadas e calculadas foram satisfatórios, porém houve uma diferença relevante entre as concentrações calculadas e às divulgadas pela CPRM, sendo necessária a realização de outros estudos para melhor compreensão do fenômeno.

**Palavras-Chave:** SIAQUA-IPH, Barragem de Rejeito, Bacia do Rio Doce

### PRELIMINARY ANALYSIS OF THE USE OF SIAQUA-IPH MODEL TO RIVER LONGITUDINAL DISPERSION OF SEDIMENTS RESULTED FROM DAM-BREAK OF TAILING DAMS

**Abstract** – Since it has a territory of continental proportions and notable geological diversity, Brazil has always had mining activities as one of the pillars of its economy. On a daily basis, great amounts of byproducts are produced, being necessary to build adequate storage locations, such as tailings dams. After the breakage of the tailing dam of Fundão in the city of Mariana/MG, an adequate allocation of byproducts became a big concern, being its main goal the protection of the environment. This paper sought to validate the utilization of SIAQUA-IPH, a quality water model for analyzing the dispersion of sediments resulted from the breakage of tailing dams. The case studied concerns the breakage of the tailing dam of Fundão (MG) itself, and the results obtained were compared to the data published by the Brazilian Company of Research and Mineral Resources (“CPRM”). The results presented satisfactory values to the relation between the period of passing of the flood waves calculated and observed. However, the calculated values for the concentration were higher than those provided by CPRM, being necessary the realization of more studies to understand this issue.

**Keywords** – SIAQUA – IPH, Tailing Dam, Rio Doce Watershed

#### 1. INTRODUÇÃO

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), desconsiderando a produção de petróleo e gás, o setor de mineração movimentou cerca de US\$ 40 bilhões apenas no ano de 2014, representando cerca de 5% do PIB industrial brasileiro. Estima-se que o país possua aproximadamente 8.870 companhias mineradoras, explorando 72 tipos de substâncias minerais,

<sup>1\*</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Porto Alegre, RS, Brasil. [rodrigospentek@gmail.com](mailto:rodrigospentek@gmail.com)

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Porto Alegre, RS, Brasil. [fernandofan@ufg.br](mailto:fernandofan@ufg.br)

sendo o ferro a mais importante.

Em contrapartida, os impactos ambientais, principalmente nos corpos hídricos, ocasionados em decorrência dessa intensa exploração são extremamente relevantes. Um dos principais desafios das mineradoras é a destinação adequada dos rejeitos provenientes desse processo, sendo a disposição em barragens a técnica mais comumente utilizada. O rompimento deste tipo de estrutura não é incomum, existindo registros em diversos países como África do Sul (barragem de Merriespruit – 1994), Espanha (Los Frailes – 1998), Canadá (Barragem de Mount Polley – 2014).

Importantes ferramentas para representar a propagação de cargas perigosas oriundas de acidentes em corpos hídricos são os modelos computacionais que focam diretamente a simulação e o comportamento de poluentes diversos em corpos hídricos, dentro os quais se podem destacar os modelos QUAL-2E, QUAL2K, SIMCAT e SWAT. Ainda, destaca-se o modelo SIAQUA-IPH, proposto por Fan *et al.*(2013), que, dentre outras aplicabilidades, pode ser usado para calcular a dispersão, propagação e decaimento de poluentes em corpos hídricos.

Tendo em vista a importância de estudos de validação de modelos para futuros projetos de prevenção e ação emergencial no caso de rompimentos de barragens de rejeito, este artigo pretende verificar a eficácia do modelo de qualidade de água SIAQUA-IPH, que possui uma formulação simples baseada na equação da dispersão de longitudinal, para análise da dispersão, propagação e decaimento de sedimentos provenientes de rompimentos de barragens de rejeitos, sendo o rompimento da barragem de Fundão o caso estudado. Assim, espera-se contribuir para a gestão emergencial do uso de águas que estejam à jusante destes acidentes e que possam ser prejudicadas pela pluma de poluição gerada no corpo hídrico.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para utilização do modelo SIAQUA-IPH é necessária a preparação de alguns dados de entrada, como informações sobre a geometria da bacia, o *shapefile* da rede de drenagem com cada trecho de rio discretizado e alguns dados hidráulicos como, por exemplo, vazões de referência. A obtenção dos dados de entrada foi feita a partir da calibração e verificação do modelo hidrológico MGB-IPH para a bacia do Rio Doce. Com estes dados, foram realizadas diversas simulações no modelo SIAQUA-IPH a fim de obter-se plumas de concentração de sedimentos oriundos do rompimento da Barragem de Fundão. A seguir é apresentado o modelo MGB-IPH utilizado e são descritos os testes realizados.

### 2.1 O modelo hidrológico MGB-IPH

O modelo hidrológico usado neste projeto foi o MGB-IPH. Desenvolvido e introduzido por Collischonn et al. (2001), o modelo foi desenvolvido para representar as transformações chuva-vazão especificamente para bacias de grande escala. O modelo foi escolhido porque o SIAQUA-IPH possui um módulo de dados de entrada utilizando arquivos oriundos do MGB-IPH.

A calibração do modelo MGB-IPH foi realizada baseada na comparação de dados de vazão observados com os calculados pelo programa. Para este trabalho, o período considerado na calibração foi de 1990 a 2015 e os dados observados foram obtidos diretamente do sistema Hidroweb mantido pela Agência Nacional de Águas (ANA). O modelo foi validado no período compreendido entre 1977 e 1989.

As medidas de desempenho consideradas na calibração do MGB-IPH foram: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões calculadas e observadas (E); o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões calculadas e observadas (E\_Log); e o erro relativo de volume total dos hidrogramas ( $\Delta V$ ). Nas Figuras 1 e 2 podem-se ver os hidrogramas obtidos na

calibração e na verificação do posto fluviométrico 56539000, localizado em Cachoeira dos Óculos (19° 46' 37" S; 42° 28' 35" W). A Tabela 1 demonstra os medidores de desempenho para cada período do mesmo posto. Os dados deste modelo calibrado foram usados como dados de entrada para as simulações com o SIAQUA-IPH.

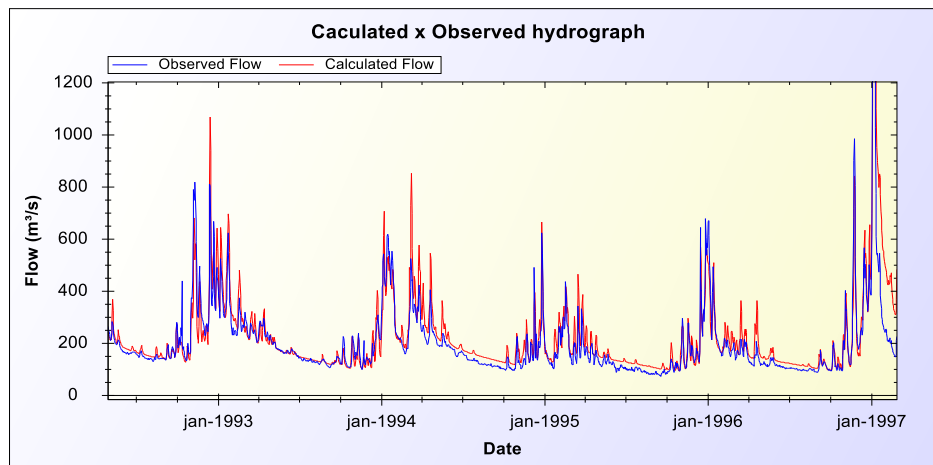


Figura 1: Calibração no posto 56539000.

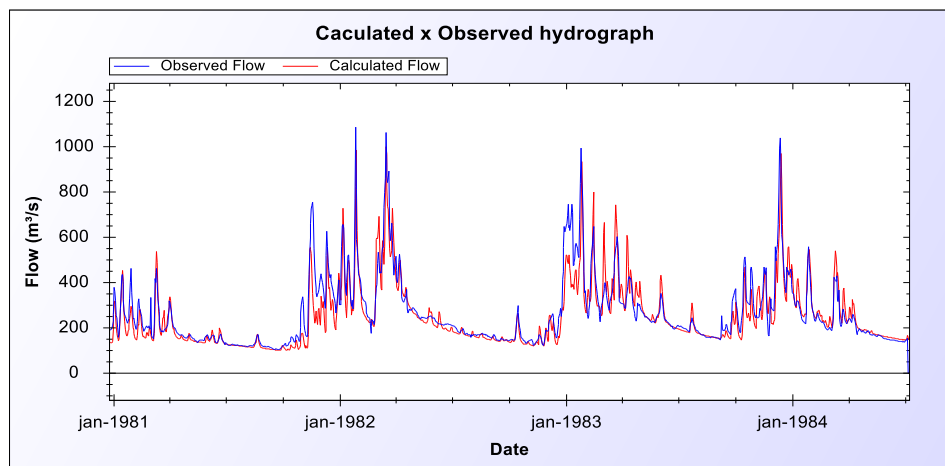


Figura 2: Verificação no posto 56539000.

Tabela 1: Medidas de desempenho para o posto 56539000.

Parâmetro	Calibração	Verificação
E	0.753	0.714
E_Log	0.8	0.823
$\Delta V$	10.17%	3.256%

## 2.2. MODELO SIAQUA-IPH

O Simulador Analítico de Qualidade da Água (SIAQUA-IPH) é um modelo de qualidade de água desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) que permite simular diferentes cenários de impacto de lançamentos de

efluentes em rios de grandes bacias. O modelo permite a simulação de cenários de diferentes vazões, referentes à situação de cheia, seca ou vazões intermediárias, baseando-se em valores de referência. Além disso, o programa simula diferentes tipos de lançamentos de poluentes de acordo com sua distribuição temporal: instantâneo; intermitente; contínuo; e permanente.

Na etapa de inserção de lançamentos, o usuário define o tipo de lançamento e os parâmetros a ele associados. Após definidos estes dados, o programa realiza o processamento das informações. Para a propagação das plumas de contaminação, o modelo simula a dispersão longitudinal, a advecção e o decaimento do poluente trecho a trecho. Os resultados são visualizados para o exutório de cada trecho de rio.

O programa dispõe de diversas ferramentas de apresentação destas simulações, como as curvas de passagem do polutograma no trecho de rio selecionado. Após visualizar o resultado, o usuário pode mudar os parâmetros de calibração e realizar novas simulações sem modificar os dados hidráulicos. Detalhes dos modelos matemáticos utilizados no SIAQUA-IPH estão descritos em Fan *et al.* (2013).

### 2.3. ESTUDO DE CASO

Em virtude do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão na cidade de Mariana-MG, a área de estudo escolhida para execução deste estudo é a bacia hidrográfica do Rio Doce. O rompimento ocorrido em Mariana é considerado um dos maiores desastres ambientais da história brasileira, culminando com a morte de 18 pessoas e o despejo de aproximadamente 34 milhões de m<sup>3</sup> de rejeito de minério de ferro no rio Doce. A região possui uma área de drenagem de 86.715km<sup>2</sup>, sendo a maior bacia inteiramente presente na região sudeste brasileira, abastecendo cerca de 3,5 milhões de habitantes em 228 municípios distintos, a sua localização e rede de drenagem pode ser vista na Figura 3. O Rio Doce, com 873 km de extensão, é o principal rio da bacia. Seu principal afluente é o rio Piranga, cuja nascente se encontra na serra da Mantiqueira em MG. O Rio Doce tem sua foz no oceano Atlântico, mais precisamente no município de Linhares no ES.

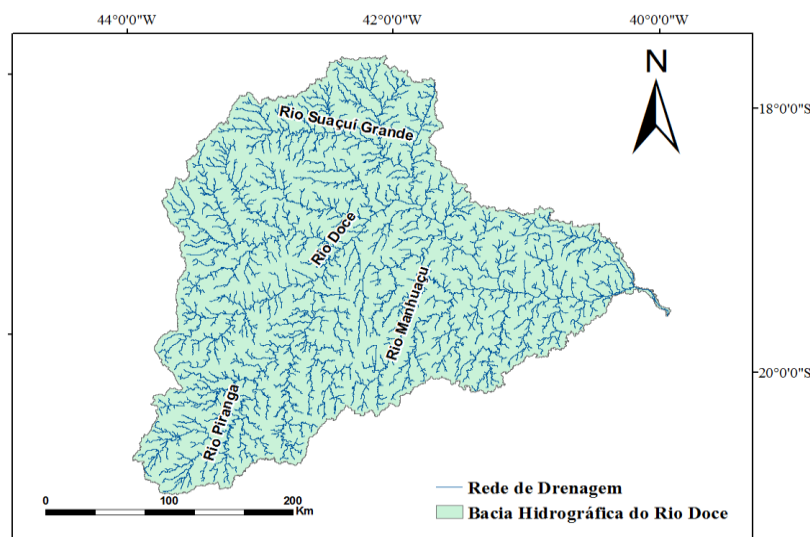


Figura 3: Localização e Rede de Drenagem da Bacia do Rio Doce com seus rios principais.

### 2.4. SIMULAÇÕES REALIZADAS NO SIAQUA-IPH

O tipo de lançamento escolhido para realizar as simulações foi o instantâneo, onde se assume que todo o despejo de carga ocorreu no mesmo ponto de forma instantânea. As informações a respeito do rompimento foram todas obtidas a partir do Relatório I emitido em dezembro de 2015

pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). O tempo de simulação foi de 385h, visto que este foi aproximadamente o tempo decorrido entre o rompimento da barragem e a chegada da onda de cheia na cidade de Linhares – ES. Este valor foi mantido constante para todas as simulações realizadas. Baseado nos dados do relatório, uma primeira simulação foi realizada com os parâmetros vistos na Tabela 2, onde C1 e C2 são parâmetros de calibração do modelo denominados coeficientes de correção de velocidade e dispersão respectivamente. É importante ressaltar que o modelo SIAQUA-IPH possibilita também a calibração de outros parâmetros, porém para este trabalho eles foram mantidos constantes. Os resultados desta simulação serão demonstrados na próxima seção.

Tabela 2: Parâmetros utilizados na primeira simulação.

Parâmetro	Valor
Vazão de Referência	Q70
Massa (kg)	68,000,000,000
Decaimento (1/d)	0.0000001
Coefficiente C1	1
Coefficiente C2	1

Em um segundo momento, diversas simulações de cenários foram realizadas, alterando apenas estes cinco parâmetros listados acima. O resultado mais satisfatório foi obtido quando se simulou o cenário da Tabela 3. Neste caso considerou-se que boa parte dos sedimentos ficou retida no trecho inicial da simulação, representado pelo alto valor no decaimento, e que a velocidade de propagação dos sedimentos era maior do que a velocidade da água em condição normal, por que o volume despejado no rio se propaga como uma onda de cheia, com mais celeridade do que o águas baixas.

Tabela 3: Parâmetros utilizados na melhor simulação obtida.

Parâmetro	Valor
Vazão de Referência	Q50
Massa (kg)	68,000,000,000
Decaimento (1/d)	0,01
Coefficiente C1	10
Coefficiente C2	5

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O relatório divulgado pela CPRM apresenta valores de concentração de sedimentos coletados *in loco* em oito cidades da bacia: Bom Jesus do Galho, Belo Oriente, Governador Valadares, Tumiritinga, Resplendor, Baixo Guandu, Colatina e Linhares. Para a simulação ser satisfatória, as concentrações simuladas pelo modelo devem ser similares às divulgadas pela CPRM. Dessa forma, as comparações foram realizadas analisando-se os trechos da rede de drenagem que estavam localizados nas proximidades de cada uma destas cidades. Na Figura 4, é apresentado o

polutograma da simulação realizada seguindo os parâmetros da Tabela 2 para a região de Colatina. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos pela CPRM para a mesma região.

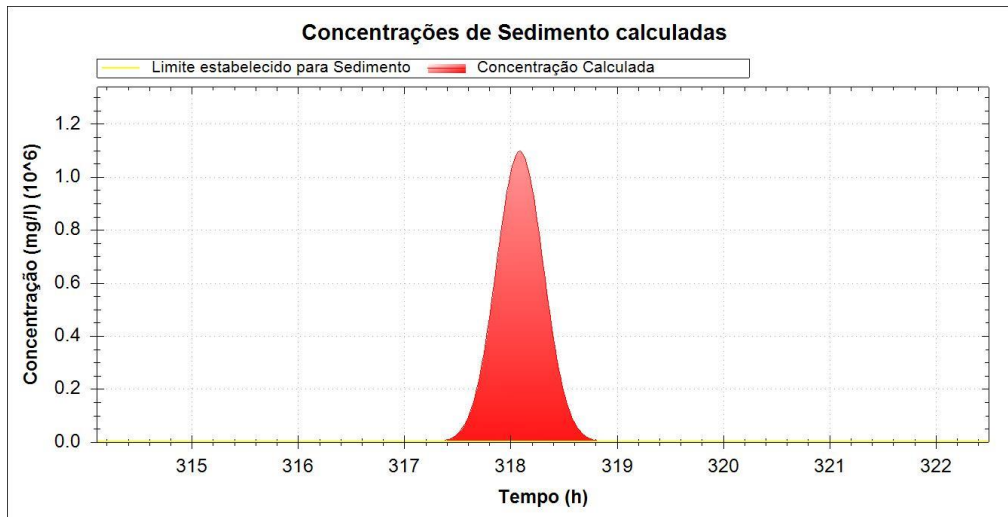


Figura 4: Polutograma simulado para a região de Colatina.

Tabela 4: Valores coletados pela CPRM para a cidade de Colatina.

Cidade	Data da Medição	Tempo pós-rompimento	C <sub>ss</sub> (mg/L)
Colatina	19/11/2015	329h	1208
Colatina	19/11/2015	330h	1266
Colatina	19/11/2015	331h	2556
Colatina	19/11/2015	334h	1704
Colatina	19/11/2015	335h	1726
Colatina	19/11/2015	336h	1730
Colatina	19/11/2015	337h	1726
Colatina	19/11/2015	338h	1834
Colatina	19/11/2015	342h	2044
Colatina	20/11/2015	354h	2226

Percebe-se que tanto a magnitude da concentração de sedimentos quanto a velocidade da pluma estão distantes da realidade, desta forma a simulação não pode ser considerada satisfatória. Essa diferença de valores ocorre, dentre outros fatores, em virtude da presença de duas barragens (Aimorés e Mascarenhas) à montante da cidade de Colatina, retendo grande parte dos sedimentos. O modelo SIAQUA-IPH, entretanto, não dispõe de parâmetros que considerem a presença de barragens, resultando numa maior concentração de sedimentos nestas regiões.

Na Figura 5, é apresentado o polutograma da simulação realizada seguindo os parâmetros da Tabela 3 para a região de Governador Valadares. Dessa vez, no entanto, o período de passagem da onda de cheia calculado está muito semelhante aos períodos divulgados pela CPRM. Pode-se notar, também, que persiste a diferença na magnitude das concentrações. Isso ocorre, provavelmente, em

função de insuficiências resultantes de simplificações adotadas no modelo. Dentre essas imprecisões, pode-se destacar a realização de uma única calibração para toda a bacia, quando, possivelmente, a segmentação da calibração em sub-bacias fosse uma alternativa mais apropriada. Este fenômeno segue sendo estudado, visando-se obter valores mais próximos da realidade para as concentrações calculadas.

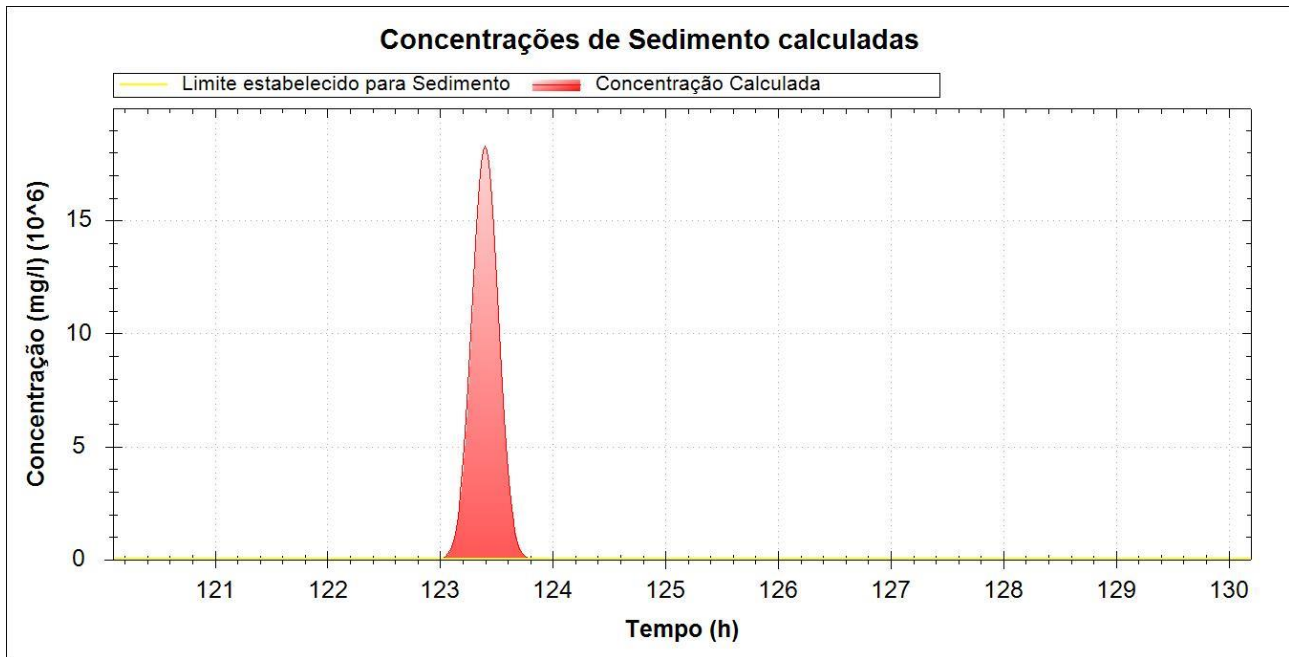


Figura 5: Polutograma simulado para a região de Governador Valadares.

Tabela 4: Valores coletados pela CPRM para a região de Governador Valadares.

Cidade	Data da Medição	Tempo pós-rompimento	Css(mg/L)
Governador Valadares	10/11/2015	112h	36240
Governador Valadares	10/11/2015	113h	33728
Governador Valadares	10/11/2015	114h	39040
Governador Valadares	10/11/2015	115h	47582
Governador Valadares	10/11/2015	116h	50942
Governador Valadares	10/11/2015	118h	49372
Governador Valadares	10/11/2015	119h	49490
Governador Valadares	10/11/2015	120h	32442
Governador Valadares	10/11/2015	121h	46700
Governador Valadares	10/11/2015	122h	46718
Governador Valadares	11/11/2015	159h	12422

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que diz respeito ao rompimento da Barragem de Fundão, para realizar as simulações foi necessária a consideração que boa parte dos sedimentos se depositou logo a jusante do rompimento, nas vertentes e nos barramentos dos rios (como na barragem de Candonga), sendo representado por

um valor alto de decaimento. Além disso, a grande quantidade de carga modificou a velocidade da água no rio em comparação com a visualizada no momento em função da vazão de referência, pois, mesmo a vazão estando baixa no momento do rompimento (Q70, segundo a CPRM), a passagem da onda de cheia elevou o nível do rio e, conseqüentemente, a vazão de referência e a velocidade da água. Em relação aos coeficientes de correção, para o caso específico analisado foi necessário aumentar a velocidade em dez vezes e a dispersão em cinco vezes. Também foi possível concluir que a obtenção de uma única calibração para toda a bacia não é a melhor opção, sendo a divisão da mesma em regiões de calibração menores uma alternativa que possivelmente apresente resultados mais satisfatórios.

Dessa forma, os resultados atingidos pelo estudo demonstram que o SIAQUA-IPH pode ser útil no auxílio em estudos de prevenção e ações emergenciais, porém suas simplificações exigem que seus parâmetros sejam “forçados” para corrigir insuficiências das simplificações adotadas na modelagem. Além disso, é necessária a realização de outros estudos para melhor compreensão dos efeitos das barragens na calibração do modelo.

### REFERÊNCIAS

COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M.(2001) Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.6, n. 2, 2001.

FAN, F. M. ; COLLISCHONN, W. ; RIGO, D. *Modelo analítico de qualidade da água acoplado com Sistema de Informação Geográfica para simulação de lançamentos com duração variada. Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, p. 359-370, 2013.

PORTAL DA COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS. Relatório I do comitê especial de monitoramento da Bacia do Rio Doce. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/>. Acesso em 01 de Fevereiro de 2017.

PORTAL DO INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Relatório sobre a economia mineral brasileira em 2015. Disponível em <http://www.ibram.org.br/>. Acesso em 10 de Maio de 2017.