Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

A Lama de Rejeitos de Mineração e os seus Efeitos sobre a Recarga dos Aquíferos Aluvionares do Rio Gualaxo do Norte após o Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG

Gillianne Assis Carneiro¹, José Augusto Costa Gonçalves², Grazielle Cristina Assis Carneiro³

¹Formanda de Engenharia Ambiental do Instituto de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira; ²Professor Associado do Instituto de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira - Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II - CEP 35903-087 - Itabira - MG - Email: jau costa@unifei.edu.br (autor correspondente); ³Mestranda do Programa de Pós Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Profágua, na Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira.

Artigo recebido em 27/11/2019 e aceito em 25/03/2020

RESUMO

As águas subterrâneas têm grande importância como fonte de abastecimento doméstico, agropecuário e industrial no Brasil devido às vantagens de sua utilização, assim, cada vez mais aumenta a necessidade de estudos para mapeamentos hidrogeológicos. O rompimento da barragem de Fundão em Mariana causou uma devastação enorme ao longo dos leitos dos cursos d'água atingidos, que são locais cruciais para o reabastecimento dos lençóis freáticos, aquíferos e nascentes, assim, este trabalho teve como objetivo avaliar e quantificar relação entre águas superficiais e subterrâneas a partir das análises de hidrogramas representativos do escoamento total, bem como identificar as áreas com prováveis aquíferos aluvionares, que são volumosos e de fácil exploração para o uso da população. Constatou-se que a área de estudo possui uma boa potencialidade para o armazenamento subterrâneo, o deflúvio subterrâneo representou 70% do deflúvio total, sendo que os depósitos aluvionares identificados se estendem praticamente como uma faixa alongada às margens do Rio Gualaxo do Norte, o que favorece a utilização desse recurso devido serem mais volumosos de fácil exploração. Verificou-se ainda que com os dados atuais disponíveis e utilizados para os cálculos, com o pequeno espaço temporal decorrido do rompimento da barragem, não foram constatadas variações significativas do escoamento subterrâneo como resposta ao acidente.

Palavras chaves: Água Subterrânea, Capacidade de Armazenamento, Aquíferos Aluvionares.

Mining Tailings Mud and its Effects on the Recharge of Alluvial Aquifers of the Rio Gualaxo do Norte after the Fundão Dam Breach in Mariana-MG

ABSTRACT

Groundwater is of great importance as a source of domestic, agricultural and industrial supply in Brazil due to the advantages of its use, thus increasing the need for studies for hydrogeological mappings. The disruption of the Fundão dam in Mariana caused enormous devastation along the of the watercourse beds hit, which are crucial places for the replenishment of groundwater, aquifers and springs. Thus, this work aimed to evaluate and quantify the relationship between surface and groundwater from the analysis of hydrograms representative of the total runoff, as well as identifying areas with probable alluvial aquifers, which are large and easy to exploit for the population to use. It was found that the study area has a good potential for underground storage, the underground defluvium represented 70% of the total defluvium, with the alluvial deposits identified extending practically as an elongated strip along the banks of the Rio Gualaxo do Norte, which favors the use of this resource because they are more bulky and easy to operate. It was also found that with the current data available and used for the calculations, with the small time span resulting from the rupture of the dam, there were no significant variations in the underground flow in response to the accident.

Keywords: Surface and underground runoff, outflow, storage capacity, alluvial aquifers.

Introdução

A água é um recurso renovável essencial à vida no planeta Terra, que vem sustentando a biodiversidade e mantendo em funcionamento ciclos ininterruptos nos ecossistemas, comunidades e populações. O ciclo hidrológico na Terra tem seus componentes integrados e bem conhecidos, as águas superficiais, subterrâneas e atmosféricas, e é o permanente movimento entre esses componentes que garante à água suas propriedades e seus estados sólido, líquido e gasoso (Tundisi, 2014; Bicudo et al., 2011).

As atividades de mineração podem causar grandes e diversos impactos ambientais ao meio físico, biótico e socioeconômico. Existe uma grande relação de interdependência entre a água e as atividades minerárias, que sem acesso à água em volumes compatíveis com a produção, não é possível haver mineração em escala industrial (Brasil, 2007; Brasil, 2015).

Em cinco de novembro de dois mil e quinze, no município de Mariana (MG), ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, da empresa Samarco Mineração S.A., cujo grande volume de material passou sobre a Barragem de Santarém subsequentemente. Esse rompimento liberou um volume de lama estimado de 62 milhões de metros cúbicos (Brasil, 2015; Castro, 2019).

O rompimento da barragem, causou a destruição da comunidade de Bento Rodrigues, distrito do município de Mariana, soterrando 207 imóveis dos 251 existentes.

O rompimento desta barragem pode ser considerado o desastre de uma atividade industrial que tenha provocado o maior impacto ambiental da história brasileira e o maior do mundo envolvendo barragens de rejeitos.

A lama chegou ao rio Doce, cuja bacia hidrográfica abrange 230 municípios dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, muitos dos quais abastecem suas populações com a água do rio.

A lama de rejeitos deteriorou a qualidade das águas consumidas pelos municípios ao longo seu caminho até o mar, principalmente, devido aos elevados índices de turbidez e risco de contaminação por metais pesados oriundos do processo de beneficiamento do minério (Minas Gerais, 2016; ANA, 2019).

Cientistas e ambientalistas consideraram que o efeito dos rejeitos na bacia e no mar continuará por pelo menos mais cem anos, contudo, não houve uma avaliação detalhada de todos os danos causados pelo desastre.

A lama de rejeitos recobriu grande parte das margens e das planícies de inundação dos cursos d'água atingidos, que são áreas de recarga dos aquíferos aluvionares e nascentes, podendo

contribuir em grande parte com a redução da quantidade e da qualidade de água disponível na bacia (Santos, 2018; Bensusan, 2016).

As águas subterrâneas têm grande importância como fonte de abastecimento doméstico, agropecuário e industrial no Brasil e no mundo (Maréchal et al., 2020). Em parte devido aos crescentes custos de tratamento e outros fatores limitantes do uso das águas superficiais, ou também devido às vantagens da utilização das águas subterrâneas que vêm sendo bem mais entendidas, (Gonçalves, 2001; Hirata et al., 2010; Obodovsky et al., 2020).

Os depósitos aluvionares são locais de acúmulo de sedimentos clásticos, que são os fragmentos de rochas de diferentes tamanhos granulométricos, nos fundos ou nas margens das drenagens (Fuentes-Arreazola et al., 2018; Gholami et al., 2017). As planícies de inundação são locais ao longo das margens dos rios, que são invadidas pela água em períodos de cheia do canal, (Lopes, 2014; Huang et al., 2017).

Os aquíferos aluvionares, são do tipo de aquíferos livres, ou seja, são aqueles que têm como limite superior a superfície de saturação ou freática, que se encontra sob pressão atmosférica, que correspondem às áreas de recarga, onde os excessos de água conseguem penetrar por infiltração (Fitts, 2015; Izbicki et al., 2015). Assim, os aquíferos aluvionares são abastecidos quase que na sua totalidade pela infiltração das águas dos rios, principalmente em períodos de cheias (Chiaudani et al., 2017; Bernard-Jannin et al., 2016; Blom et al., 2017a; Blom et al., 2017b).

A origem das formações aquíferas e a localização das suas reservas subterrâneas quase sempre dificultam nas situações práticas, a análise direta dos parâmetros e grandezas necessárias para realizar a quantificação dessas reservas (Maharjan e Donovan, 2016; Vergnes e Habets, 2018). Com a necessidade de quantificá-las, faz-se o uso de métodos indiretos que considerem os efeitos das reservas subterrâneas sobre o regime fluvial observado na superfície. Consequentemente, o entendimento e a pesquisa da capacidade reguladora dos aquíferos sobre a descarga natural dos rios oferecem subsídios que irão auxiliar na estimação das reservas exploráveis (Gonçalves et al., 2005; Ohmer et al., 2017).

Assim, o objetivo deste trabalho é identificar, mapear os aquíferos aluvionares e quantificar os possíveis impactos produzidos na recarga destes aquíferos pela capa de lama proveniente do rompimento da barragem de rejeitos, deixada sobre os aluviões da bacia do Rio Gualaxo do Norte.

Material e métodos

Caracterização da Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce possui área de drenagem de 86.715 km², dos quais 86% estão no leste de Minas Gerais e 14% no nordeste do Espírito Santo. Em Minas Gerais, a bacia é subdividida em seis Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRH's): Rio Piranga, Rio Piracicaba, Rio Santo Antônio, Rio Suaçuí, Rio Caratinga, Rio Manhuaçu. No Espírito Santo, não há subdivisões administrativas, somente os comitês de bacias (Brasil, 2019).

A sub-bacia do Rio Gualaxo do Norte, Figuras 1 e 2, está inserida na Bacia do Rio Doce.

Sua nascente se localiza na Serra do Espinhaço, a uma altitude de aproximadamente 1380 metros, no município de Ouro Preto, atinge o município de Mariana, e ao todo percorre uma extensão aproximada de 75 km até seu encontro com o rio do Carmo no município de Barra Longa. A Bacia do Rio Gualaxo do Norte tem uma área de drenagem de 529 km². Após o rompimento da barragem, a lama de rejeitos da barragem atingiu diretamente este rio a 12 km a jusante de sua nascente, impactando 67 km do seu leito e de suas margens, sendo que aproximadamente 59 km estão na área de estudo, Figuras 3 e 4.

Figura 1 – Localização da área de estudos, modificado de IBGE (2019).

Figura 2 – Mapa da Rede Hidrográfica, modificado de CPRM (1993) e IBGE (2019).

Figura 3 – Barragem do Fundão após o rompimento, em 09/11/2015. Fonte: Google Earth (2019).

Figura 4 – Rio Gualaxo do Norte tomado pela lama após o rompimento da barragem. Fonte: Autores (2019)

Geologia

A geologia da área de estudo, Figura 5, está ligada à evolução do Quadrilátero Ferrífero (QF), na sua porção NE. Engloba rochas de idades arqueana e proterozoica, que foram tectonizadas por diversos eventos de dobramento, cisalhamento e falhamento.

A Bacia do Rio Gualaxo do Norte, ao longo de sua extensão, é constituída por várias unidades geológicas principalmente quartzitos, itabiritos e filitos do Supergrupo Minas, no seu médio e baixo curso, enquanto sua cabeceira está situada no domínio de rochas supracrustais, onde afloram os Complexos Metamórficos Santa Bárbara, Acaiaca e Mantiqueira, além de xistos e quartzitos do Supergrupo Rio das Velhas (Costa, 2001). Baseando-se nos estudos regionais de Ladeira (1980); Renger et al., (1994); Alkmim e Marshak (1998), Knauer (2007), Mourão (2007),

pode-se distinguir na região do extremo SE do Quadrilátero Ferrífero, quatro unidades litoestratigráficas principais: o Complexo Metamórfico e o Supergrupo Rio das Velhas, que possuem uma evolução que remonta ao Arqueano, o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi de idade proterozoica, Figura 5. *Grupo Itacolomi*: é representado por uma sequência de rochas supracrustais metamorfizadas que capeiam o Supergrupo Minas. *Supergrupo Minas*: é composto por 3 subgrupos: *Grupo Caraça*: representado por rochas clásticas de granulação fina a grossa (quartzitos e filitos); *Grupo Itabira*: caracteriza-se por rochas sedimentares químicas e divide-se nas Formações Cauê (formações ferríferas) e Gandarela (rochas carbonáticas); *Grupo Piracicaba*: caracterizado por rochas sedimentares clásticas (quartzitos e filitos), sendo constituído pelas formações Cercadinho, Fecho do Funil,

Tabões e Barreiro. Na área estudada, ocorre a Formação Cercadinho constituída por quartzitos, quartzitos ferruginosos, filitos prateados e lentes de sericita e clorita xisto e a Formação Fecho do Funil, representada por filitos dolomíticos, dolomitos argilosos e silicosos, e filitos.

O Complexo Santa Bárbara é a unidade geológica de maior distribuição espacial na área de estudo. Litologicamente, o Complexo Santa Bárbara é constituído por: a) gnaiss tonalítico e trondjemítico; b) rocha de composição granítica, observada injetando o gnaiss bandado trondjemítico e c) granito mais claro que aparece na interface dos litotipos anteriormente descritos. c) Complexo Metamórfico Acaiaca, constitui uma faixa norte-sul, no sudeste da área de estudo, sendo constituído por rochas com alto grau metamórfico, como chanockitos, enderbitos e gnaisses

kinziginiticos, biotita-anfibólio gnaisses e migmatíticos e granitoides.

d) Complexo Metamórfico Mantiqueira é uma sequência de gnaisses de composições variadas, migmatizados e/ou com intercalações de anfibolitos.

e) Supergrupo Rio das Velhas é composto de rochas metavulcânica e metassedimentar, composto por 2 grupos: Grupo Nova Lima: rochas representativas de uma sequência do tipo greenstone belt e são compostas por 3 unidades, da base para o topo: unidade metavulcânica, unidade metassedimentar química e unidade metassedimentar clástica; Grupo Maquiné: este grupo é constituído por duas formações: Formação Palmital (filitos, filitos quartzosos, grauvacas, sericita-quartzito e metaconglomerados) e Formação Casa Forte (quartzitos sericíticos, xistosos e cloríticos).

Figura 5 – Mapa Geológico, modificado de CPRM (1993) e Brandalise (1991).

Hidrogeologia

O sistema hidrológico subterrâneo da bacia hidrográfica do Rio Gualaxo do Norte, está fundamentalmente condicionado às características geomorfológicas, litoestratigráficas e estruturais que compõem o arcabouço geológico regional. Assim, nos diferentes litotipos que ocorrem na região é possível definir, basicamente, três domínios hidrogeológicos: poroso fissural, cristalino ou fissural e o domínio dos metassedimentos e das rochas metavulcânicas, que

apresentam distribuição espacial e comportamentos distintos, diferenciados pela estrutura física da rocha, modo de circulação da água e condições de armazenamento (Wirth et al., 2020, Souza et al., 2010), Figura 6.

Os aquíferos granulares são caracterizados por depósitos aluvionares, e os aquíferos fissurados são representados por rochas cristalinas de diversas unidades litológicas (Bonsor et al., 2017). Ainda segundo Souza et al. (2010), os aquíferos granulares ou porosos são bons produtores de água

subterrânea, podendo ser utilizados para exploração de água para usos consuntivos. Os aquíferos fissurados quartzíticos possuem maior favorabilidade hidrogeológica em relação aos aquíferos desenvolvidos em rochas cristalinas e xistosas, e, portanto, podem ser utilizados para exploração de água para usos consuntivos, apesar de sua pequena extensão.

Numa bacia hidrográfica, todos os cursos de água que mantêm regime de escoamento permanente recebem águas subterrâneas de diversos sistemas aquíferos (Tazioli et al., 2020).

Essas águas podem representar o escoamento de base ou o componente subterrâneo do escoamento superficial total (Okakita et al., 2019; Orrú et al., 2016a). Em consequência disso, os deflúvios superficiais no tempo da estiagem dependem quase que exclusivamente da capacidade de retenção dos aquíferos e o estudo dessa variação sazonal poderá fornecer boas relações e revelações sobre as águas subterrâneas armazenadas (Gonçalves et al., 2005; Orrú et al., 2016b).

Figura 6 – Mapa dos Domínios Hidrogeológicos, modificado de CPRM (1993) e Brandalise (1991).

Clima

A área de estudo está totalmente inserida na faixa de clima tropical, sendo normalmente caracterizada por uma não conformidade climática, ditada pelas peculiaridades do relevo, que condicionam, entre outras coisas, o fluxo das massas de ar. De uma maneira geral, encontra-se a uma altitude média elevada, com clima do tipo Cwa, segundo a classificação de Koppén, o que indica clima tropical de altitude, com chuvas de verão e verões quentes (Engecorps, 2014).

No mês de fevereiro, o mês mais quente do ano, a temperatura média é de 23,2 °C. Ao longo do ano Julho tem uma temperatura média de 16,9 °C. Durante o ano é a temperatura média mais baixa. Existe uma diferença de 248 mm entre a precipitação do mês mais seco e do mês mais chuvoso. A temperatura média oscila

pouco ao longo do ano, com amplitude térmica de apenas 6,3°C.

Material e métodos

Em uma bacia hidrográfica, os cursos de água que mantêm regime de escoamento permanente recebem águas subterrâneas de diversos sistemas aquíferos, e essas águas podem representar o escoamento de base ou o componente subterrâneo do escoamento superficial total. Como resultado, os deflúvios superficiais do tempo de estiagem irão depender quase que exclusivamente da capacidade de retenção dos aquíferos e o estudo dessa variação sazonal poderá fornecer boas relações e revelações sobre as águas subterrâneas ali armazenadas (Gonçalves et al., 2005).

Considera-se que o equilíbrio de fluxo das águas que entram seja igual aos volumes de saída dentro dos aquíferos. Com isso, se conhecendo o quanto é restituído das águas subterrâneas para os rios, se pode determinar em que dimensão as águas subterrâneas participam do escoamento superficial total, permitindo ainda a determinação do escoamento subterrâneo unitário, sendo esses equivalentes à capacidade de armazenamento subterrâneo das bacias (Castany, 1967; Costa e Bacellar, 2010).

Utiliza-se o deflúvio do período de esgotamento ou recessão hidrológica que, na área de estudo, se inicia em abril estendendo-se até fins de setembro, para se estudar a capacidade de armazenamento subterrâneo numa bacia hidrográfica.

Esse esgotamento significa que nos diversos sistemas aquíferos da bacia há a diminuição da água armazenada, expondo assim o regime dos cursos de água em período de déficit pluviométrico (Gonçalves et al., 2005; Stefano et al., 2018).

A regularização dos fluxos de base não depende somente das reservas hídricas armazenadas, como também das descargas dessas reservas para os cursos d'água. Essas descargas estão condicionadas a um diferencial de carga hidráulica entre os depósitos subterrâneos e os canais fluviais para que ocorra o deslocamento da água entre os meios. A relação entre a carga hidráulica e a vazão transportada é geralmente denominada de curva de esgotamento, Figura 7, (Gonçalves et al., 2005).

Figura 7 - Figura 7: Curva de Esgotamento. Fonte: Custodio e Llamas (1983).

Segundo Correa e Mello (2014), são vários métodos pelo quais é possível realizar a separação do fluxo base, sendo o Método de Barnes o mais recomendável pela literatura. O método de Barnes consiste num procedimento manual, porém é bastante subjetivo. É usado quando se tem uma série hidrológica extensa, e aplicadas em séries representativas baseadas na vazão média. A curva de esgotamento ou recessão é ajustada a uma expressão como a equação de Maillet:

$$Q = Q_0 \cdot e^{(-\alpha t)}$$

A expressão é baseada na linearidade da recessão quando esta é analisada com as vazões em escala logarítmica. O tradicional método de Barnes, que exige séries hidrológicas mais extensas, permitindo assim a validação dos resultados, baseado na linearidade da recessão quando a vazão nos hidrogramas é expressa em escala logarítmica (Custódio e Llamas, 1983).

Em um hidrogramas com gráfico semilogarítmico, o coeficiente de recessão é a inclinação da reta de recessão, ou seja, da porção da curva de decaimento do fluxo quando a vazão provém, teoricamente, apenas de fontes subterrâneas, Figura 7. É um índice que depende principalmente da geologia, tipo de solo e

geomorfologia (Castany, 1967), sendo, portanto, característico de cada bacia de drenagem.

Para essa caracterização hidrogeológica da área de estudo, foi tratada de forma especial a correlação quantitativa existente entre as águas superficiais e as subterrâneas, da qual extraíram-se alguns parâmetros que permitiram um prévio entendimento sobre o comportamento hidrogeológico dos aquíferos aluvionares em termos das restituições subterrâneas, calculadas a partir da análise dos componentes, com a separação dos componentes subterrâneo e superficial.

Para o cálculo das componentes superficiais e subterrâneas do escoamento, lançou-se mão do método gráfico de Barnes (Custodio e Llamas, 1983), analisando-se hidrogramas que representaram o escoamento total correspondente à descarga natural dos rios.

Para a região de estudo, devido às condições hidrogeológicas, onde encontram-se rochas de baixa permeabilidade, utilizou-se a fórmula de Maillet (Castany, 1967), que propicia a resolução da curva de esgotamento.

A fórmula de Maillet é:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)}$$

onde:

Q_t = vazão no instante t em m^3/s ;

Q_0 = vazão no instante inicial do esgotamento t_0 , em m^3/s ;

α = coeficiente de esgotamento;

t = período desde o início do esgotamento, em dias;

e = base dos logaritmos neperianos (2,71828).

Tomando-se os logaritmos dos dois membros da equação, a expressão do coeficiente de esgotamento (α) resulta em:

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0,4343 t}$$

O coeficiente de esgotamento de uma bacia hidrográfica é função inversa das dimensões, do coeficiente de armazenamento e do coeficiente de permeabilidade de Darcy dos sistemas aquíferos. Com isso, deduz-se que o valor do coeficiente de esgotamento é tanto menor quanto maiores forem os parâmetros dimensionais e hidrodinâmicos dos aquíferos da bacia.

A determinação da capacidade de armazenamento é dada pela expressão:

$$V = \frac{Q_0}{\alpha}$$

Como α , na curva de esgotamento, se calcula em dias, temos:

$$V = \frac{86400 Q_0}{\alpha}$$

Essa expressão calcula o volume de água subterrânea armazenado no instante t_0 , acima do nível de base.

A segunda etapa da confecção dos hidrogramas foi realizada com os dados obtidos para o ano de 2015, realizando a correlação desses meses com os meses que se repetiam nos anos de 2013, 2014 e 2019. Assim, realizando a comparação desses anos com o ano de 2015, para a análise pré e pós rompimento da barragem de Fundão.

Para a definição das Estações Fluviométricas que seriam utilizadas para o estudo, buscou-se restringir a uma área mais próxima da barragem de Fundão. Foram encontradas 14 estações fluviométricas que são de responsabilidade e operadas pelos órgãos ANA, CPRM ou IGAM-MG, porém algumas não havia medições registradas e outras somente dados referentes à qualidade das águas.

Destaca-se que dentro dessas estações, foi realizada a análise das medições obtidas num raio de aproximadamente 70 km do local do rompimento da barragem de Fundão, visando os rios e locais atingidos, avaliando a qualidade dos dados disponíveis.

Assim, foi selecionada a Estação fluviométrica Fazenda Ocidente, no Rio Gualaxo do Norte, município de Barra Longa-MG, como a base de dados para o estudo, sendo a área de estudo delimitada a partir da nascente do Rio Gualaxo do Norte até a referida estação, incluído todas as contribuições que chegam a ela.

As referências das estações de monitoramento que foram utilizadas como fonte de dados para o estudo, bem como sua localização são apresentados na Tabela 01.

Na Tabela 01 - Dados das estações meteorológicas utilizadas.

Estação	Código INMET	Latitude Sul	Longitude Oeste	Altitude
Belo Horizonte	A521	19°53'2.20"	43°21'22.43"	854 m
Ouro Branco	A513	20°33'23.73"	43°45'22.39"	1.048 m
Timóteo	A511	19°34'25.77"	42°37'20.69"	493 m
Viçosa	A510	20°45'45.39"	42°51'50.45"	698 m

Resultados e discussão

Na Tabela 2 é apresentada uma proposição e sistematização dos sistemas aquíferos e sua relação com as unidades litoestratigráficas identificadas. Os sistemas aquíferos são classificados de acordo com as condições semelhantes de armazenamento, circulação e qualidade de água (Gonçalves et al., 2019).

A definição das unidades hidrogeológicas tiveram como base as características das unidades lito-estruturais identificadas, considerando a geologia regional, identificam-se duas categorias de sistemas aquíferos: um meio granular, caracterizado por depósitos aluvionares, e um meio fissural, representado por rochas cristalinas de diversas unidades litológicas, Figura 8.

Aquíferos Aluvionares

Os depósitos aluvionares identificados se encontram às margens do Rio Gualaxo do Norte, na sua grande maioria formados com resíduos da lama do rompimento da barragem do Fundão, formando uma faixa alongada ao longo do trecho atingido, com a sua largura dependendo das planícies ao logo do mesmo. Os depósitos aluvionares constituem os aquíferos granulares e que são fundamentais para a contribuição e manutenção do volume e do fluxo das águas do Rio Gualaxo do Norte. Nas Figuras 9 e 10, é mostrado diversos locais com a ocorrência dos depósitos aluvionares na área de estudo.

A área de identificação e classificação de aluvião as margens do Rio Gualaxo do Norte foi de 30 km² para todo o limite da área de estudo, o que corresponde a 5,7% da mesma, engloba desde o desague do Córrego Santarém no Rio Gualaxo do Norte, que resultou também na geração de remansos antes do local de desague, podendo haver também áreas com falsa classificação, isto é, que não pertencem aos terraços aluvionares.

Comparativo do escoamento superficial pré e pós-rompimento da Barragem de Fundão

O escoamento superficial e o escoamento subterrâneo (fluxo de água do subsolo ou escoamento de base) constituem o escoamento total, que é o volume total de água que é transportado pelo canal de um curso de água (King et al., 2017). Contudo, o escoamento superficial resultante das precipitações é considerado o componente dominante para a formação de cheias ou aumento de vazões dos cursos de água (Alencar et al., 2006; Jerbi, 2018).

O volume de água que resulta do escoamento superficial depende de diversos fatores, como a geologia, vegetação, clima, características da bacia, quantidade e a intensidade de precipitação, entre outros (Hao et al., 2018). O período de estiagem para a área de estudo vai de abril, quando se inicia o esgotamento, até fins de setembro, sendo que o período úmido vai de outubro até março, o que geralmente coincide com as elevadas taxas pluviométricas e picos de cheias, quando se registram as maiores vazões (Batsaikhan et al., 2018).

A partir da análise dos dados de escoamento de janeiro a setembro para os anos de 2013, 2014, 2015 e 2019 (nos demais meses e anos não existem dados disponíveis), foi realizada a comparação para o escoamento total que passa pela área de estudo até a Estação Fluviométrica Fazenda Ocidente, com as precipitações acumuladas para cada mês dos respectivos anos.

Pode-se perceber que houve bastantes alterações nas precipitações registradas para a região, porém, o período de estiagem praticamente se manteve de abril até fins de setembro, com algumas alterações, e as descargas praticamente acompanharam os períodos de chuva em cada ano.

No ano de 2015 as descargas acompanharam os valores de chuva acumulada, com aumento de janeiro a março e iniciando a estiagem no mês de abril.

Tabela 2 - Coluna Estratigráfica e os Sistemas Aquíferos.

Sistema Aquífero	Litologia	Formação
Sistema Aquífero Piracicaba	Filitos, filitos grafitosos, filito dolomíticos, filitos ferruginosos, dolomitos, dolomitos silicosos, quartzitos, quartzito ferruginosos.	Grupo Piracicaba
Sistema Aquífero Nova Lima	Filitos, xistos, formações ferríferas, quartzitos, dolomitos, metacherts, rochas máficas e ultramáficas.	Grupo Nova Lima
Sistema Aquífero Itabira	Itabiritos, itabiritos dolomíticos, hematita, lentes de filito, filitos, filitos dolomíticos, dolomitos e calcário.	Grupo Itabira
Sistema Aquífero Maquiné	Quartzitos, conglomerados, xistos e filitos.	Grupo Maquiné
Sistema Aquífero Acaiaca	Ortognaisses granulíticos, gnaisses kinzigíticos e quartzitos com silimanita e granada enderbite, opdalito e norito	Complexo Metamórfico Acaiaca
Sistema Aquífero Mantiqueira	Ortognaisses intercalados com rochas metabásicas, metapiroxenitos e pegmatitos.	Complexo Metamórfico Mantiqueira
Sistema Aquífero Santa Bárbara	Gnaisses migmatíticos e granitos, tonalitos, anfibolitos, e intrusões máficas e ultramáficas.	Complexo Metamórfico Santa Bárbara

Figura 8: Mapa Hidrogeológico da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, modificado de CPRM (1993) e Brandalise (1991).

Figura 9 – Vista geral do curso do Rio Gualaxo do Norte com os depósitos de lama de rejeitos nas planícies de inundação. Fonte: Google Earth (2019).

Figura 10 – Detalhe dos depósitos da lama sobre os aluviões nas margens do Rio Gualaxo do Norte. Fonte: Saadi e Campos (2015)

Figura 11: Hidrograma comparativo das descargas médias 2013, 2014, 2015 e 2019. Fonte: Autores (2019).

Figura 12 A - Gráficos de Precipitação na área estudada para os anos de 2013 e 2014. Fonte: Autores (2019).

Figura 12 B - Gráficos de Precipitação na área estudada para os anos de 2015 e 2019. Fonte: Autores (2019).

O ano de 2013 foi o qual se obteve os maiores registros de precipitação, como também maiores descargas, chegando a aproximadamente a 260 mm de chuva para o mês de janeiro, dentro do intervalo analisado, e chegando a aproximadamente 460 mm para o mês de dezembro, o que contribuiu para o acúmulo de água na área de estudo para o período. As descargas praticamente acompanharam os valores de chuva acumulada, sendo que somente no mês de fevereiro houve menor registro de chuva. Em 2013 pode-se

perceber que os valores de descargas superficiais foram muito maiores que no ano de 2015, mas ambos os anos acompanharam os dados de precipitação, se iniciando o período de estiagem em março/abril.

Para as descargas médias mensais no ano de 2014, pode se observar que as mesmas acompanharam os valores de precipitação, porém os valores foram menores do que no ano de 2013, chegando ao valor máximo de aproximadamente 140 mm no mês de março, para o intervalo

analisado, e com registros maiores para os meses de novembro e dezembro, chegando ao pico de 240 mm em novembro.

Comparando os anos de 2014 e 2015, as descargas em ambos os anos começaram a reduzir em abril, com exceção de um pico de descarga que ocorreu no mês de janeiro, com redução em fevereiro no ano de 2014, esse fato pode ser devido a algum evento esporádico, mas acompanhou os índices de precipitação. As descargas nesses anos foram bem próximas, sendo que no ano de 2014 pode-se perceber valores um pouco maiores, mas já bem reduzidos com relação a 2013.

Para o ano de 2019, os valores de precipitação tiveram um registro de aproximadamente 30 mm no mês de janeiro, com grande aumento em fevereiro, chegando a 180 mm, e começando a reduzir em março e abril, retornando ao período úmido a partir de setembro e outubro. Para a comparação de 2015 e 2019, em 2015 as descargas médias continuaram acompanhando os regimes de precipitação do ano, aumentando em janeiro com queda a partir do mês de abril. No ano de 2019, houve um aumento dos valores das descargas médias mensais apesar do regime de precipitação ter sido menor.

Com a análise dos dados, pode-se perceber que o rompimento da barragem não interferiu diretamente na redução do escoamento total da área de estudo. Como existe ausência de registros entre novembro de 2015 até janeiro de 2019, não foi possível realizar uma análise mais concreta do período após o rompimento da barragem. Porém, os anos anteriores que foram analisados apresentaram maiores registros de descargas superficiais.

Dentre os fatores que influenciam o escoamento superficial, estão os fatores climáticos (intensidade e duração da chuva e chuva antecedente), os fatores fisiográficos da bacia (forma e área da bacia, topografia, permeabilidade e capacidade de infiltração) e obras hidráulicas (construção de barragens, canalização ou retificação, derivação ou transposição), (Costa e Lança, 2011).

Assim, conforme a análise dos dados de precipitação para os anos citados pode-se perceber que as ocorrências e intensidades das chuvas não vêm mantendo a mesma sequência no passar dos anos, sendo que de um ano para o outro pode haver aumento e no seguinte redução, muito disso devido aos diversos problemas de mudanças climáticas que o planeta vem passando.

O fluxo da lama de rejeitos oriundo do rompimento da barragem de Fundão assoreou o Rio Gualaxo do Norte, removeu toda a vegetação e soterrou uma grande área no leito do rio,

devastando matas ciliares. Os rejeitos de mineração de ferro também têm potencial para afetar o solo ao longo do tempo, se trata de material inerte sem matéria orgânica, causando desestruturação química e afetando o pH do solo (Fernandes, 2017).

Parte da quantidade da precipitação é interceptada pela cobertura vegetal, e o solo pode absorver a água da chuva até certa intensidade, acima do qual se dá o escoamento superficial, onde ocorre o escoamento da água restante das precipitações (Le et al., 2018). Com isso, acredita-se que os fatores que levam ao aumento do escoamento total após o rompimento da barragem se deve principalmente devido a remoção da cobertura vegetal e a presença material sedimentado ao longo das margens dos rios, que é um material extremamente fino que prejudica a capacidade de infiltração da água, aumentando o escoamento.

O conhecimento do sistema de drenagem do rio também é um fator de importância no estudo das bacias hidrográficas, dependendo do tipo do regime do curso de água que a região está drenando, os resultados obtidos podem levar a classificar o Rio Gualaxo do Norte com base na constância do seu escoamento, que tende a ser do tipo perene, onde o lençol freático mantém uma alimentação continua, não descendo abaixo do leito do rio, mantendo a contribuição do subterrâneo para o escoamento total, mesmo nos períodos de estiagem, correndo durante o ano todo.

Armazenamento Subterrâneo

Para a caracterização hidrogeológica da área de estudo, tratou-se de forma especial da correlação existente entre as águas superficiais e subterrâneas, da qual extraíram-se alguns parâmetros que possibilitaram, em primeira mão, um prévio entendimento do comportamento hidrogeológico das unidades aquíferas da região. A relativa complexidade desse assunto justificou uma abordagem mais detalhada e que permitisse a conceituação dos eventos envolvidos (Sarno et al. 2017).

A natureza dos depósitos aquíferos e a localização das reservas subterrâneas impedem, quase sempre, nas situações práticas, a observação direta dos parâmetros e grandezas necessárias para a quantificação dessas reservas (Keshavarzi et al., 2017). Com o objetivo de quantificá-las, lança-se mão de métodos indiretos que consideram os efeitos das reservas subterrâneas sobre o regime fluvial observado na superfície. Portanto, o entendimento e a pesquisa da capacidade reguladora dos aquíferos sobre a descarga natural dos rios oferecem subsídios que auxiliam na estimação das reservas exploráveis.

Ao se conhecer o quanto é restituído das águas subterrâneas aos rios, pode-se determinar em que proporção as águas subterrâneas participam do escoamento superficial total, permitindo ainda a determinação do escoamento subterrâneo unitário, sendo esses equivalentes à capacidade de armazenamento subterrâneo das bacias (Keshavarzi et al., 2017).

O estudo da capacidade de armazenamento subterrâneo numa bacia hidrográfica é feito com base no deflúvio do período de esgotamento ou recessão hidrológica que, no caso da região estudada, se inicia em abril estendendo-se até fins de setembro. O esgotamento significa a diminuição da água armazenada nos diversos sistemas aquíferos da bacia, denotando, assim, o regime dos cursos de água em período de déficit pluviométrico. Esses parâmetros e suas correlações foram estudados a partir da construção do hidrograma, (Killian et al., 2019).

A regularização dos fluxos de base (fluxo no subsolo) não depende, exclusivamente, das

reservas hídricas armazenadas, mas também das descargas dessas reservas para os cursos d'água. Tais descargas estão condicionadas a um diferencial de carga hidráulica entre os depósitos subterrâneos e os canais fluviais para que ocorra o deslocamento da água entre os meios. A relação entre a carga hidráulica e a vazão transportada é geralmente denominada de curva de esgotamento (Gonçalves et al., 2019). A curva de esgotamento caracteriza o período de esgotamento dos aquíferos da bacia pela redução da água armazenada.

A análise do hidrograma construído com a série histórica dos anos de 1939 a 2014 (Figura 13), a partir da quantificação das componentes superficiais e subterrâneas do escoamento para o Rio Gualaxo do Norte, utilizando-se dados da Estação Fazenda Ocidente, observou-se que é bem caracterizado o regime fluvial do rio, destacando um período de esgotamento que tem início em abril e estende-se até fins de setembro e um período de cheias que vai do mês de outubro até o mês de abril.

Figura 13 - Hidrograma representativo de 1939 a 2014 para a área de estudo. Fonte: Autores (2019).

Quadro 1: Resultados dos Deflúvios Total e Subterrâneo para a área de estudo.

Deflúvio Total (m ³ /ano)	Deflúvio Subterrâneo (m ³ /ano)
1 - 22,2393 x 10 ⁶	13 - 22,2393 x 10 ⁶
2 - 33,1776 x 10 ⁶	14 - 23,3280 x 10 ⁶
3 - 52,1510 x 10 ⁶	15 - 23,8464 x 10 ⁶
4 - 58,3200 x 10 ⁶	16 - 25,1424 x 10 ⁶
5 - 47,6928 x 10 ⁶	17 - 25,4456 x 10 ⁶
6 - 44,8416 x 10 ⁶	18 - 25,9200 x 10 ⁶
7 - 32,9184 x 10 ⁶	19 - 25,7254 x 10 ⁶
8 - 26,1792 x 10 ⁶	20 - 24,8854 x 10 ⁶
9 - 22,8096 x 10 ⁶	21 - 22,8096 x 10 ⁶
10 - 20,9952 x 10 ⁶	22 - 20,9952 x 10 ⁶
11 - 18,9216 x 10 ⁶	23 - 18,9216 x 10 ⁶
12 - 18,8697 x 10 ⁶	24 - 17,6256 x 10 ⁶

Conclusões

Foram identificados e mapeados os aquíferos aluvionares ao longo do Rio Gualaxo do Norte cobertos pela lama proveniente do reservatório da barragem rompida.

Pode-se verificar que, com os dados disponíveis, o rompimento da barragem não interferiu diretamente na redução do escoamento total da área de estudo. Como existe ausência de registros entre novembro de 2015 até janeiro de 2019, não foi possível realizar uma análise mais concreta do período após o rompimento da barragem. Porém, os anos anteriores que foram analisados apresentaram maiores registros de descargas superficiais.

Foi constatado que a capacidade reguladora dos aquíferos sobre a descarga natural dos rios, mesmo que em pequena escala, oferece subsídios que auxiliam na estimativa das reservas exploráveis, visando melhor conduzir o processo de gestão dos aquíferos.

Para a área de estudo, o resultado do Deflúvio total foi de $399,12 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, o deflúvio subterrâneo foi de $276,92 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ e assim, o deflúvio superficial foi de $122,19 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. O percentual do deflúvio subterrâneo com relação ao deflúvio total, dentro da área de estudo, apresenta valores bastante elevados, chegando a quase 70%.

O estudo da capacidade de armazenamento subterrâneo de uma bacia hidrográfica é realizado com base no deflúvio no período do esgotamento, que significa um período sem recarga significativa dos aquíferos e a consequente diminuição da descarga natural de restituição dos aquíferos aos rios (condições de rio efluente), que se verifica ao longo do período de estiagem ou recessão, caracterizando o regime dos cursos de água em período de déficit pluviométrico (Gonçalves et al., 2005).

Pode se observar que durante o período de estiagem para a área de estudo, que vai de abril a setembro, os valores para o deflúvio subterrâneo não sofrem muitas alterações, apesar da redução do deflúvio total, o que indica a condição de rio efluente, que são os rios que não sofrem com os períodos de seca, visto que sempre recebem a água do subsolo.

Agradecimentos

Agradecimentos a Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira, ao Programa de Pós Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - PROFÁGUA Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- Alkmim, F.F.; Marshak S.; 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90, 29-58.
- ANA. Agencia Nacional de Águas. 2019. Panorama das Águas. Disponível em: <https://www.ana.gov.br>. Acesso em: 22 set. 2019.
- Alencar, D.B.S.; Silva, C.L.; Oliveira, C.A. S. 2006. Influência da Precipitação no Escoamento Superficial em uma Microbacia Hidrográfica do Distrito Federal. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, 26, 103-112.
- Batsaikhan, N.; Lee, J. M.; Nemer, B.; Woo, N. C. 2018. Water Resources Sustainability of Ulaanbaatar City, Mongolia. *Water* 10, no. 6: 750.
- Bernard-Jannin, L.; Brito, D.; Sun, X.; Jauch, E.; Neves, R.; Sauvage, S.; Pérez, J. M. S. 2016. Spatially distributed modelling of surface water-groundwater exchanges during overbank flood events – a case study at the Garonne River, *Advances in Water Resources*, Volume 94, Pages 146-159, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.008>.
- Bicudo, C.E.M.; Tundisi, J.G.; Scheuenstuhl, M.C.B. (Org.). 2011. Águas do Brasil: análises estratégicas. São Paulo: Academia Brasileira de Ciências.
- Bensusan, Nurit. De Mariana a Abrolhos, a pedagogia da lama em dez lições. 2016. Disponível em: <https://www.socioambiental.org/pt-br/blog/blog-do-ppds/de-mariana-a-abrolhos-a-pedagogia-da-lama-em-dez-licoes>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- Blom, A.; Arkesteijn, L.; Chavarrías, V.; Viparelli, E. 2017a. The equilibrium alluvial river under variable flow and its channel-forming discharge. *J. Geophys. Res., Earth Surface* 122

- (10), 1924–1948.
<https://doi.org/10.1002/2017JF004213>.
- Blom, A.; Chavarrias, V.; Ferguson, R.I.; Viparelli, E. 2017b. Advance, retreat, and halt of abrupt gravel-sand transitions in alluvial rivers. *Geophys. Res. Lett.* 44 (19), 9751–9760.
<https://doi.org/10.1002/2017GL074231>.
- Bonsor, H.C.; MacDonald, A.M.; Ahmed, K.M. 2017. Hydrogeological typologies of the Indo-Gangetic basin alluvial aquifer, South Asia. *Hydrogeology Journal* 25, 1377–1406.
<https://doi-org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-017-1550-z>
- Brandalise L.A. 1991. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil – PLGB; Carta Geológica, Carta Metalogenético-Previsional da Folha de Ponte Nova (SF.23-XBII), escala 1:100.000. Belo Horizonte.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (Org.). 2007. Águas Subterrâneas: Um recurso a ser conhecido e protegido. Brasília: Agência Crio - Comunicação e Negócios.
- Brasil. Instituto Brasileiro de Mineração IBRAM. Água e Mineração: fatos e verdades. 2015.
http://www.ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD_CHAVE=241456 Acesso em: 27 out. 2019
- Brasil. Instituto Brasileiro de Mineração IBRAM. 2014. Informações sobre a Economia Mineral do Estado de Minas Gerais. Disponível em:
<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00004355.pdf> Acesso em: 15 jun. 2019.
- Brasil. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (Org.). A Bacia. 2019.
<http://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>. Acesso em: 30 out. 2019.
- Brasil. Instituto Brasileiro Meio Ambiente Recursos Naturais Renováveis. Rompimento da Barragem de Rejeito Fundão Mariana/MG. Brasília: MMA, 2015. 42 p.
- Castany, G. 1967. *Traité pratique des eaux souterraines*. 2. ed. Paris: Dunod, 661 p.
- Castro, L.S.; Almeida, E.S. 2019. Desastres e Desempenho Econômico: Avaliação do Impacto do Rompimento da Barragem Mariana.
<https://periodicos.ufsc.br/index./geosul/article/view/2177>. 14 jun. 2019.
- Chiaudani, A.; Di Curzio, D.; Palmucci, W.; Pasculli, A.; Polemio, M.; Rusi, S. 2017. Statistical and Fractal Approaches on Long Time-Series to Surface-Water/Groundwater Relationship Assessment: A Central Italy Alluvial Plain Case Study. *Water* 9, no. 11: 850.
- Correa, S.W.; Mello, C.R. 2014. Determinação e separação do escoamento superficial direto do escoamento base na sub-bacia Paraopeba, rio Ribeirão da Ajuda, mediante os métodos de Barnes e dos filtros de Eckhardt. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 43., 2014, Campo Grande. Campo Grande: CONBEA.
- Costa, A.T. 2001. Geoquímica das Águas e dos Sedimentos da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, Quadrilátero Ferrífero (MG): Estudo de uma Área Afetada por Atividades de Extração Mineral. 2001. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Costa, F.M.; Bacellar, L.A.P. 2010. Caracterização Hidrogeológica de Aquíferos a Partir do Fluxo de Base. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Ouro Preto, 15, 173.
- Costa, T.; Lança, R. 2011. Hidrologia de Superfície. Faro: Instituto Superior de Engenharia Universidade do Algarve, 303 p.
- CPRM, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. 1993. Levantamentos geológicos básicos do Brasil, Mariana – Folha SF.23-XB-1. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Org. por Orivaldo Ferreira Baltazar e Frederico Ozanam Raposo. Brasília, DNPM/CPRM. 196p.
- Custódio, E.; Llamas, M.R. 1983. Hidrologia Subterrânea. 2. ed. Barcelona: Omega, 2 v.
- Engecorps Engenharia S.A. (Brasil) (Org.). Relatório Final do Plano Municipal de Saneamento Básico, Município: Mariana. Engecorps Engenharia S.A., 2014. 358 p.
- Fernandes, K.N. 2017. Qualidade das Águas nos Rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e do Carmo, Afluentes do Alto do Rio Doce: Metais, Metaloides e Índice de Qualidade das Águas antes e após o Rompimento da Barragem de Rejeitos Fundão, Mariana, MG. 224 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Fitts, C.R. 2015. Águas Subterrâneas. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Fuentes-Arreazola, M. A.; Ramírez-Hernández, J.; Vázquez-González, R. 2018. Hydrogeological Properties Estimation from Groundwater Level Natural Fluctuations Analysis as a Low-Cost Tool for the Mexicali Valley Aquifer. *Water* 10, Pages 19-28.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.004>.
- Gonçalves, J.A.C. 2001. Contribuição à Hidrogeologia e Hidroquímica do Leste da Zona da Mata de Minas Gerais e Extremo

- Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Gonçalves, J.A.C. 2005. Reservas Renováveis e Caracterização dos Aquíferos Fissurais do Leste da Zona da Mata de Minas Gerais e Adjacências. *Revista do Instituto de Geociências – USP* 5, 19-27. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2005000100002>
- Gonçalves, J.A.C.; Almeida, M.S.L.; Ferreira, M.A.M.; Paiva, B.L.F. 2019. Disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas na bacia do Rio do peixe – Itabira-MG. *Research., Society and Development*. 2019; 8(12). <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v8i12.1904>
- Hirata, R.; Zoby, J.L.G.; Oliveira, F.R. (Org.). 2010. Água Subterrânea: Reserva Estratégica ou Emergencial. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências.
- Hao, A.; Zhang, Y.; Zhang, E. 2018. Review: Groundwater resources and related environmental issues in China. *Hydrogeology Journal* 26, 1325–1337 (2018). <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-018-1787-1>
- Huang, T.; Pang, Z.; Li, J. 2017. Mapping groundwater renewability using age data in the Baiyang alluvial fan, NW China. *Hydrogeology Journal* 25, 743–755. <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-017-1534-z>
- Izbicki, J.A.; Teague, N. F.; Hatzinger, P. B.; Böhlke, J. K.; Sturchio, N.C. 2015. Groundwater movement, recharge, and perchlorate occurrence in a faulted alluvial aquifer in California (USA). *Hydrogeology Journal* 23, 467–491. <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-014-1217-y>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Folhas Topográficas. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/folhas-topograficas/15809-folhas-da-carta> Acesso em: 15 nov. 2019.
- Jerbi, H. 2018. Consideration of the use of direct recharge in analytical models of flood-wave response: a case study of the Merguellil alluvial aquifer, central Tunisia. *Hydrogeology Journal* 26, 2395–2409. <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-018-1811-5>
- Keshavarzi, M.; Baker, A.; Kelly, B. F. J. 2017. River-groundwater connectivity in a karst system, Wellington, New South Wales, Australia. *Hydrogeology Journal* 25, 557–574. <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-016-1491-y>
- Killian, C.D.; Asquith, W. H.; Barlow, J.R.B. 2019. Characterizing groundwater and surface-water interaction using hydrograph-separation techniques and groundwater-level data throughout the Mississippi Delta, USA. *Hydrogeology Journal* 27, 2167–2179. <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-019-01981-6>
- King, A.C.; Raiber, M.; Cox, M.E. 2017. Comparison of groundwater recharge estimation techniques in an alluvial aquifer system with an intermittent/ephemeral stream (Queensland, Australia). *Hydrogeology Journal* 25, 1759–1777. <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-017-1565-5>
- Knauer, L.G. 2007. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. *Geonomos* 1, 81 - 90.
- Ladeira, E.A. 1980. Metallogenesis of gold at the Morro Velho mine and in the Nova Lima district, Quadrilátero Ferífero, Minas Gerais, Brasil. Ph.D. Thesis. Univ. Ontario, Canada. 272 p.
- Le, T.B.; Crosato, A.; Uijtewaald, W. S. J. 2018. Long-term morphological developments of river channels separated by a longitudinal training wall, *Advances in Water Resources*, Volume 113, Pages 73-85, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.01.007>
- Lopes, L.C.F.L. 2014. Investigação dos Depósitos Fluviais e de Encosta em Bacias de Cabeceira do Alto Rio das Velhas (MG) - Subsídios para Avaliação da Suscetibilidade a Fluxos de Detritos. 2014. 150 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Maharjan, M.; Donovan, J. J. 2016. Groundwater response to serial stream stage fluctuations in shallow unconfined alluvial aquifers along a regulated stream (USA). *Hydrogeology Journal* 24, 2003–2015. <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-016-1443-6>
- Maréchal, J.; Bouzit, M.; Rinaudo, J.; Moiroux, F.; Desprats, J.; Caballero, Y. 2020. Mapping Economic Feasibility of Managed Aquifer Recharge. *Water* 12, no. 3: 680.
- Minas Gerais. Governo de Minas Gerais. 2016. Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em

- Mariana-MG. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional.
- Mourão, M.A.A. 2007. Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 297 P.
- Obodovskyi, O.; Habel, M.; Szatten, D.; Rozlach, Z.; Babiński, Z.; Maerker, M. 2020. Assessment of the Dnieper Alluvial Riverbed Stability Affected by Intervention Discharge Downstream of Kaniv Dam. *Water* 12, no. 4: 1104.
- Ohmer, M.; Liesch, T.; Goeppert, N.; Goldscheider, N. 2017. On the optimal selection of interpolation methods for groundwater contouring: An example of propagation of uncertainty regarding inter-aquifer exchange, *Advances in Water Resources*, Volume 109, Pages 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.08.016>.
- Okakita, N.; Iwatake, K.; Hirata, H. 2019. Contribution of precipitation to groundwater flow systems in three major alluvial fans in Toyama Prefecture, Japan: stable-isotope characterization and application to the use of groundwater for urban heat exchangers. *Hydrogeology Journal* 27, 345–362. <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-018-1850-y>
- Orrú, C.; Blom, A.; Chavarrias, V.; Ferrara, V.; Stecca, G. 2016a. A new technique for measuring the bed surface texture during flow and application to a degradational sand-gravel laboratory experiment. *Water Resour. Res.* 52, 7005–7022. <https://doi.org/10.1002/2016WR018938>.
- Orrú, C.; Blom, A.; Uijtewaalt, W.S.J. 2016b. Armor breakup and reformation in a degradational laboratory experiment. *Earth Surface Dyn.* 4 (2), 461–470. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-461-2016>.
- Renger, F.E., Noce, C.M., Romano, A.W., Machado, N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos* 1, 1-11.
- Saadi, A.; Campos, J.C.F. 2015. Geomorfologia do caminho da lama: contexto e consequências da ruptura da Barragem do Fundão, Mariana-MG). *Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico - UFMG*, 24, 63-103.
- Santos, G.R. 2018. Técnica de reconhecimento de padrões para a avaliação de corpos hídricos afetados por rejeitos do rompimento da Barragem de Fundão. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais. 155f.
- Sarno, L.; Carravetta, A.; Martino, R.; Papa, M.; Tai, Y. C. 2017. Some considerations on numerical schemes for treating hyperbolicity issues in two-layer models. *Adv. Water Resour.* 100 (Supplement C), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.12.014>.
- Souza, P.I. (Org.). 2010. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce – PIRH Doce. Minas Gerais: Consórcio Ecoplan-Lume, 472 p.
- Stefano, L.; Amena F.; Nicoletta, T. 2018. River banks and channel axis curvature: Effects on the longitudinal dispersion in alluvial rivers, *Advances in Water Resources*, Volume 113, Pages 55-72. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.033>.
- Tundisi, J. G. (Org.). 2014. Recursos hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências.
- Tazioli, A.; Colombani, N.; Palpacelli, S.; Mastrocicco, M.; Nanni, T. 2020. Monitoring and Modelling Interactions between the Montagna dei Fiori Aquifer and the Castellano Stream (Central Apennines, Italy). *Water* 12, no. 4: 973.
- Wirth, S. B.; Carlier, C.; Cochand, F.; Hunkeler, D.; Brunner, P. 2020. Lithological and Tectonic Control on Groundwater Contribution to Stream Discharge During Low-Flow Conditions. *Water* 12, no. 3: 821.
- Vergnes, J.; Habets, F. 2018. Impact of river water levels on the simulation of stream-aquifer exchanges over the Upper Rhine alluvial aquifer (France/Germany). *Hydrogeology Journal* 26, 2443–2457. <https://doi.org.ez38.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10040-018-1788-0>