

Dinâmica geoquímica em cabeceiras de drenagem da Depressão do Paraíba do Sul: subsídios à compreensão do papel morfodinâmico de nascentes e canais de baixa ordem

Geochemical dynamics in headwaters of Paraíba do Sul Depression: elements for understanding the morphodynamic role of springs and low order drainage

Miguel Fernandes Felipe

Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil

miguel.felipe@ich.ufjf.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0261-4298>

José Oliveira de Almeida Neto

Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

almeida.jose@usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2433-7612>

Luiz Otávio Marques

Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil

lotams@live.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3074-0803>

Lídia Aparecida dos Reis

Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil

lidreis95@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8008-5213>

Diogo Parreira Lapa

Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil

diogo.parreira@ich.ufjf.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1225-0894>

Antônio Pereira Magalhães Junior

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil

antonio.magalhaes.ufmg@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5327-3729>

RESUMO

As cabeceiras de drenagem configuram sistemas hidrogeomorfológicos complexos, em que a ação combinada dos cursos fluviais e das águas subterrâneas que emergem em nascentes contribui para a evolução do relevo. Essa importante relação pode se refletir em rebaixamento de topos, capturas fluviais, prolongamentos da linha de drenagem e esvaziamento geoquímico de vertentes. No intuito de auxiliar a compreensão dos processos geomorfológicos de perda de massa nesses sistemas, este trabalho tem o objetivo de investigar a dinâmica geoquímica em cabeceiras de drenagem da Depressão do Paraíba do Sul, fornecendo subsídios para a compreensão do papel de nascentes e canais de baixa ordem na morfodinâmica e na configuração do modelado local-regional. A área de estudo abarca duas cabeceiras da borda da Depressão do Paraíba do Sul, no contato com a Serra da Mantiqueira Setentrional (município de Simão Pereira, Minas Gerais, Brasil). A partir de análises laboratoriais da carga em solução das águas fluviais, nota-se uma relação interesalar evidente, em que fatores regionais e locais coadunam na explicação da desnudação geoquímica desses sistemas. Os resultados apontam para uma perda geoquímica baixa e extremamente variável (no tempo e no espaço), com valores absolutos entre 373 e 3.024 kg/km²/y, com respectivo rebaixamento do relevo calculado de 0,6m/My, em média, para a área de estudo. Há, portanto, uma relação direta entre a hierarquia fluvial das cabeceiras com a desnudação geoquímica,

mas pequenas alterações na mineralogia do substrato geológico e das coberturas pedológicas, ou nas características hidrológicas sazonais, podem representar grandes mudanças no padrão de evolução geoquímica das cabeceiras.

Palavras-chave: Cabeceira de drenagem, Desnudação, Hidrogeoquímica, Nascentes, Carga em solução.

ABSTRACT

Headwaters are complex hydrogeomorphological systems where the combined action of fluvial drainage and underground water that emerges in springs contribute to the landscape evolution. This relationship can lead to hilltops degradation, river capture, drainage network extension, and geochemical loss in slopes. Attempting to clarify the geomorphological processes of mass wasting of these systems, this work aims to investigate the geochemical dynamics in headwaters of Paraíba do Sul Depression, bring elements to understand the role of springs and low order streams on local-regional morphodynamics and morphology. The study area is two headwaters into de Paraíba do Sul Depression, next to its contact with the Northern Serra da Mantiqueira (Minas Gerais, Brazil). We analyse the dissolved load along the drainage network, to understand the inter-scale relationships between local and regional factors that contribute to explain the geochemical denudation of these systems. The results show low chemical mass wasting of great variability (in time and space), with absolute values between 373 and 3,024 kg/km²/y, what corresponds to a relief degradation of 0.6 m/My (average of study area). Therefore, that is a direct relation between geochemical denudation and the drainage hierarchy in headwaters, but little differences in the mineralogy of soils and rocks or disturbances in the seasonal hydrologic characteristics could result in great changes in the evolution pattern of headwaters.

Keywords: Headwater, Denudation, Hydrogeochemistry, Springs, Dissolved load.

1. INTRODUÇÃO

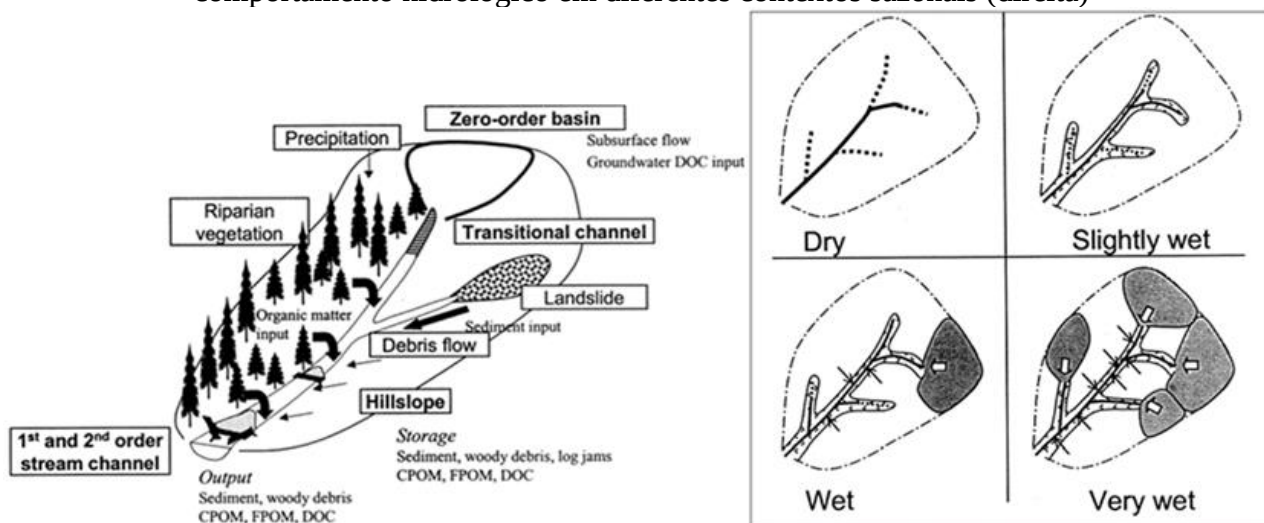
As cabeceiras de drenagem são fundamentais na produção e transporte de sedimentos, por meio de vertentes e vales fluviais. De acordo com Benda *et al.* (2005), os canais fluviais de sistemas de cabeceiras acumulam 60 a 80% de toda a extensão da rede de drenagem, todavia, a atenção dada a esses cursos d'água pela comunidade acadêmica tem sido consideravelmente menor do que aquela dispensada a grandes rios de maior ordem. Tradicionalmente, as cabeceiras são consideradas as áreas fontes de grande parte da carga física dos cursos d'água, configurando-se como sistemas de alta energia (SCHUMM, 1977). Os processos fluviais que ocorrem em cabeceiras de drenagem são profundamente distintos daqueles verificados a jusante, com destaque para o balanço entre produção e retenção de sedimentos nesses sistemas (WHITING *et al.*, 1999).

Tais sistemas se desenvolvem em áreas específicas do relevo, configurando domínios de encostas em áreas côncavas (COELHO NETTO, 2010), porém, possuindo estrutura distinta conforme o ambiente geomorfológico no qual as cabeceiras se desenvolvem (seja ele montanhoso ou de terras baixas). Sua morfologia está diretamente relacionada à característica transicional entre processos de vertente e fluviais que coadunam na morfodinâmica das cabeceiras. Em sistemas montanhosos, solos residuais coexistem com depósitos coluviais de movimentos de massa, afloramentos rochosos e alúvios mal selecionados na conformação das cabeceiras de drenagem (BENDA *et al.*, 2005).

Os canais que drenam esses sistemas ajustam-se a essa complexa configuração, sendo fortemente influenciados por degraus criados por acúmulo de sedimentos e pequenos represamentos originados da queda de material vegetal (troncos e galhos). Seus leitos são sobretudo coluviais e a sua drenagem pode ser desconexa dependendo do regime hidrológico (MONTGOMERY; BUFFINGTON, 1997; WHITING *et al.*, 1999; FARIA, 2000; BENDA *et al.*, 2005).

Quatro principais unidades topográficas configuram as cabeceiras de drenagem (**Figura 1**): i) as vertentes – que fazem a ligação entre os interflúvios e a porção côncava do sistema, sendo responsáveis pela dissipação/concentração da água pluvial e sedimentos; ii) bacias de zero ordem – consideradas as bacias de contribuição das nascentes dos cursos d'água que drenam as cabeceiras, onde não há escoamento canalizado; iii) canais transicionais – cursos d'água temporários ou efêmeros que drenam as águas exfiltradas nas nascentes de modo errático e descontínuo até que se acumulem o suficiente para estabilização de um fluxo concentrado; iv) canais de primeira e segunda ordem – que configuram a porção eminentemente fluvial dos sistemas de cabeceira (HACK; GOODLETT, 1960; MONTGOMERY; BUFFINGTON, 1997; GOMI *et al.*, 2002).

Figura 1: Estrutura do sistema hidrogeomorfológico de uma cabeceira (esquerda) e seu comportamento hidrológico em diferentes contextos sazonais (direita)



Fonte: Adaptado de Gomi *et al.* (2002).

Compreende-se, assim, que as cabeceiras são elementos de primeira importância na dinâmica dos sistemas fluviais, promovendo interações entre águas subsuperficiais, meteóricas e fluviais (PALMER *et al.*, 2001; LEVISON *et al.*, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2017). As nascentes possuem um papel singular nas cabeceiras de drenagem, pois são elementos que fazem a comunicação entre os processos hidrogeomorfológicos de vertente e os processos fluviais (FELIPPE; MAGALHÃES JR, 2014). As águas das nascentes apresentam características químicas dos seus respectivos aquíferos de contribuição, passando a receber influência química do ambiente superficial a partir do momento em que exfiltram (SALGADO *et al.*, 2004; LUIZ-SILVA *et al.*, 2012; CHEVALLIER *et al.*, 2020).

As conexões entre as nascentes e a rede fluvial ocorrem em uma zona imprecisa das cabeceiras onde paulatinamente os processos fluviais dominam a morfodinâmica até que imperem nos canais de maior ordem. Deste modo, as nascentes passam a ser elementos ativos e fundamentais na evolução geomorfológica das paisagens, contribuindo para a desnudação geoquímica nas bacias hidrográficas, pois a exfiltração da água subterrânea pode resultar na significativa mobilização de matéria dissolvida que é carregada para os cursos fluviais superficiais. Como a perda geoquímica é cumulativa ao longo das bacias, o material desnudado das cabeceiras vai se somando aos dos cursos receptores. Assim, para se compreender a desnudação geoquímica em uma bacia deve-se atentar para a água que é exfiltrada nas nascentes, pois esta possui carga química própria derivada dos processos de alteração química dos aquíferos (FELIPPE; MAGALHÃES JR, 2016).

Entretanto, não é possível generalizar um desenho comum para essa transição, já que ela depende essencialmente das características estruturais das cabeceiras, as quais são distintas e dependentes de fatores locais. Todavia, trabalhos como os de Cartwright *et al.* (2018), Cartwright e Morgenstern (2018) e Chevallier *et al.* (2020) apontam para a importância da atuação do escoamento subsuperficial (água no solo/regolito) na definição da hidrogeoquímica das cabeceiras de drenagem, sem perder de vista a importância do material de origem. Assim, assume-se que a contribuição direta das chuvas na variabilidade geoquímica do escoamento fluvial em cabeceiras é menor (CARTWRIGHT e MORGENSTERN, 2018). Por esse motivo, para além das questões geológicas associadas ao embasamento litológico e ao sistema aquífero regional, fatores locais associados à variabilidade espacial das coberturas superficiais são de fundamental importância para se compreender as perdas geoquímicas promovidas pelas cabeceiras de drenagem.

O foco específico deste trabalho é a parcela química de massa transportada como carga em solução pelos elementos do sistema fluvial no interior das cabeceiras de drenagem. O objetivo é, nesse sentido, investigar a dinâmica geoquímica em cabeceiras de drenagem da Depressão do Paraíba do Sul, fornecendo subsídios para a compreensão do papel de nascentes e canais de primeira ordem na configuração geomorfológica local-regional. Para tanto, foram selecionadas duas cabeceiras localizadas no flanco norte dessa unidade geomorfológica, no município de Simão Pereira, MG. Em cada uma, pontos de monitoramento foram distribuídos na rede de drenagem (hierarquicamente). O artigo não visa estabelecer regras gerais para a Depressão do Paraíba do Sul, mas ilustrar a evolução das cabeceiras da referida depressão com casos empíricos.

2. ÁREA DE ESTUDO

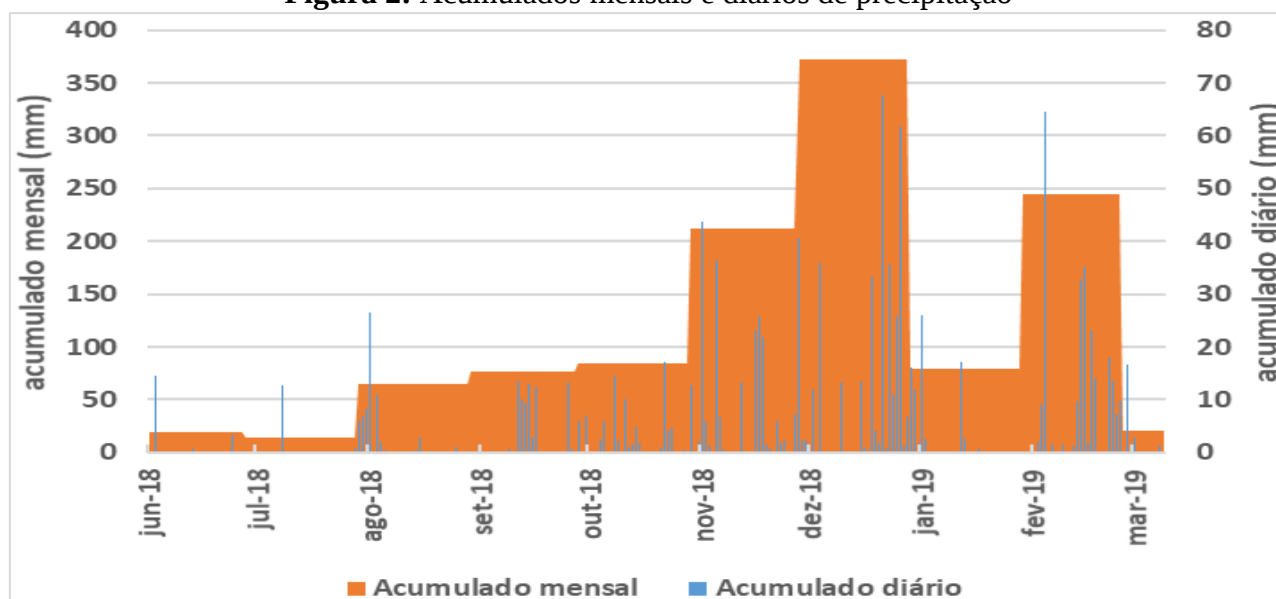
A área de estudo circunscreve-se em um conjunto de vertentes florestadas, com baixo grau de interferência antrópica, que conformam a face sul de modelados de dissecção (morros) com influência estrutural, na periferia da cidade de Simão Pereira, MG. Com orientação vulgarmente SE, as vertentes são definidas por um topo alongado, marcado por um lineamento NE-SW, coincidente com as principais linhas de falha regionais. Localiza-se na borda da Depressão do Paraíba do Sul, em contato gradual com a Serra da Mantiqueira Setentrional, unidades geomorfológicas herdadas do arcabouço geotectônico regional, associado aos dobramentos brasileiros.

A Província Mantiqueira é composta pelas faixas Ribeira, Araçuaí, Dom Feliciano e São Gabriel. As faixas Ribeira e Araçuaí não apresentam estruturas marcantes que possam limitar as diferentes evoluções tectônicas e ainda apresentam muitas semelhanças em suas unidades litológicas. A Faixa Ribeira é geológica e geomorfologicamente complexa, pois abarca o denominado Rift Continental do Sudeste do Brasil (RICCOMINI, 1989). Segundo Riccomini *et al.* (2004), este Rift é um agrupamento de fendas desenvolvidas em decorrência da elevação e redução de blocos crustais relacionados à evolução tectônica da Serra do Mar. Tal processo contribuiu ainda para elevação da Serra da Mantiqueira e formação da Depressão do Paraíba do Sul. Na Faixa Ribeira ocorrem os terrenos tectono-estratigráficos Oriental, Ocidental, Paraíba do Sul, Embu e Cabo Frio. Ora são separados por zonas de cisalhamento oblíquas transgressivas, ora por falhas de empurrão. A área de estudo está inserida na unidade complexo Juiz de Fora, caracterizada por ortognaisses granulíticos ácidos a básicos, com ortognaisses tonalíticos subordinados (DUARTE, 1998; HEIBRON *et al.*, 2004; CPRM/CODEMIG, 2014).

Os modelados de dissecação mamelonar do relevo contemporâneo estão associados à evolução geomorfológica em clima úmido, no qual a ação do intemperismo químico, lixiviação e processos de vertente associados a ação hídrica são preponderantes (AB'SÁBER, 1970; SALGADO *et al.*, 2015). Isso é explicado pela circunscrição da área na Zona Térmica Tropical (CONTI, 1989), com notada influência da continentalidade, apresentando clima do tipo Cwa, conforme a classificação de Köppen. A distância em linha reta até o Oceano Atlântico é pouco maior que 100 Km, o que permite que as massas de ar ainda preservem elevada umidade. O sistema atmosférico mais frequente e predominante na área é a Massa Tropical Atlântica (mTa), seguido da Massa Polar Atlântica (mPa) e dos sistemas frontais que, regionalmente, estão atrelados a mudanças de temperatura e eventos chuvosos (FERREIRA, 2002). A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) fornece umidade e é responsável pelas precipitações no final da primavera e no verão.

Oliveira e Ferreira (2017) apontam que a área apresenta sazonalidade bem definida e diferenciada em duas estações: uma mais quente, úmida e irradiada – de outubro a março; e a outra mais fria, seca e menos irradiada – de abril a setembro. O acumulado médio anual das precipitações na bacia hidrográfica do rio Preto gira em torno de 1.536 mm e a amplitude térmica anual média gira em torno de 5°C (OLIVEIRA, 2016). Os acumulados de precipitação mensais e diários para o período de monitoramento do trabalho são apresentados na **Figura 2**. Foi registrado um total de 1.187,6 mm em 118 dias chuvosos, com maiores acumulados mensais entre os meses de novembro e fevereiro.

Figura 2: Acumulados mensais e diários de precipitação



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2020).

A dialógica entre o substrato geológico e os fatores climáticos configuram a paisagem dos “Mares de Morros” (AB’SABER, 1970), recobertos originalmente pelo bioma da Mata Atlântica. Nesta, destaca-se a fitofisionomia da Floresta Estacional Semidecidual Montana (IBGE, 1992), com dossel variando de aberto a semiaberto. Até o limiar do século XIX, a área se caracterizava por apresentar uma densa vegetação e consequente menor intensidade de processos morfodinâmicos que esculpem a paisagem atual. Esta condição foi mantida por muitos séculos por conta da presença de populações indígenas dadas como hostis, da falta de recursos tecnológicos de acesso à mata densa e de políticas restritivas do período colonial para ocupação dos então chamados Sertões Proibidos do Leste (VALVERDE, 1958; CARNEIRO; MATOS, 2010).

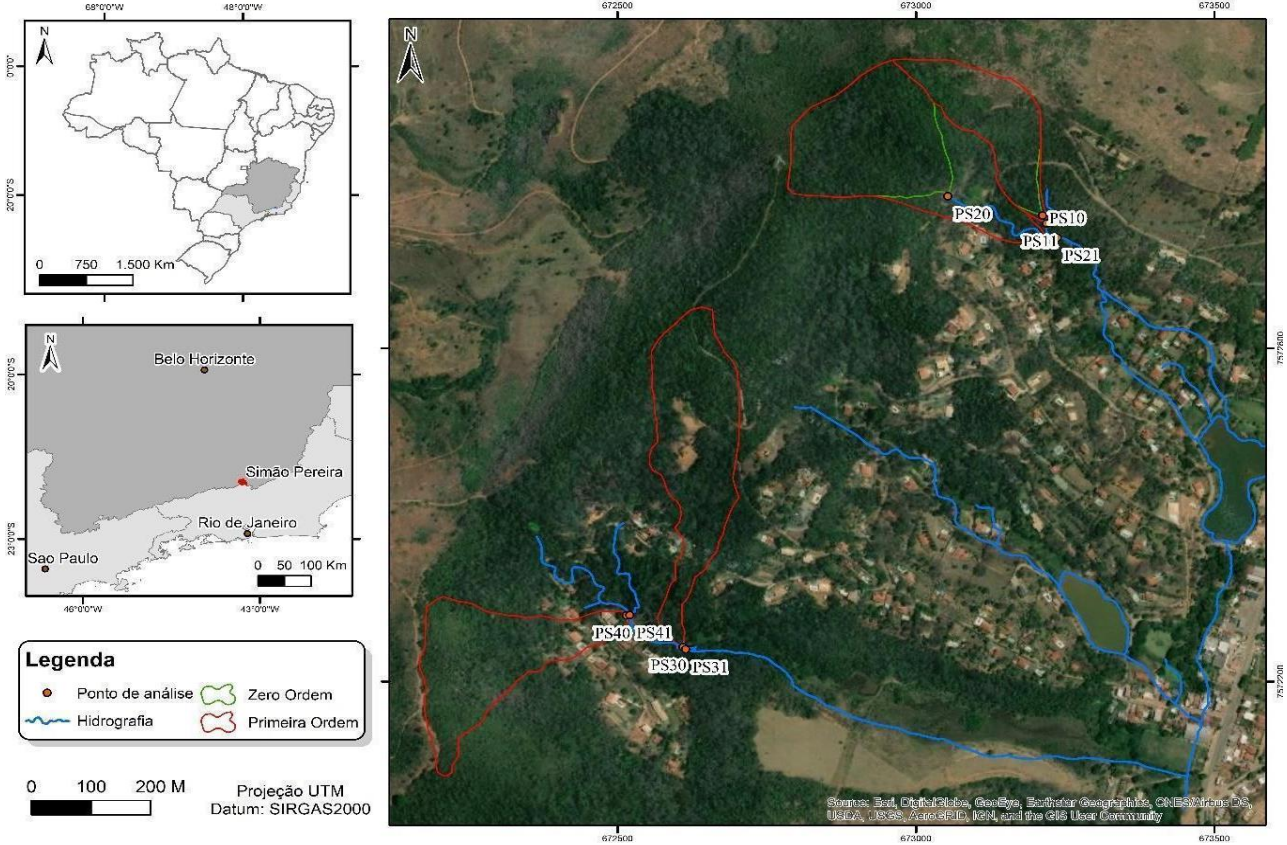
Não há como ignorar a influência do Ciclo do Café na evolução morfodinâmica regional moderna, dadas as intensas mudanças ambientais derivadas da substituição da cobertura vegetal original. A evolução da dinâmica de ocupação e a implementação de atividades econômicas promoveu transformações espaciais atreladas ao surgimento de rotas comerciais e de novas cidades, intensificando o desmatamento e a fragmentação da Mata Atlântica. Atualmente, o Médio Vale do Paraíba do Sul é marcado por paisagens heterogêneas com um complexo quadro de fragilidades e instabilidades derivadas das alterações ambientais. A região apresenta altas taxas de erosão das vertentes e de deposição nas planícies causadas pela agropecuária extensiva, bem como movimentos de massa, como deslizamentos e voçorocamentos, nas encostas mais íngremes (COELHO NETTO, 2010).

Baseando-se no conhecimento prévio do contexto fisiográfico-ambiental regional, foram selecionadas duas cabeceiras inseridas na Depressão do Paraíba do Sul, município de Simão Pereira (**Figura 3**). A seleção foi balizada pelos seguintes pré-requisitos: i) localização na referida Depressão; ii) grau de conservação ambiental satisfatório; iii) cabeceiras com configuração morfológica característica do panorama regional, ou seja, que não se configurem em exceções; iv) concessão do direito de acesso e pesquisa; v) facilidade logística para a realização dos trabalhos de campo. As cabeceiras da região apresentam, comumente, nascentes, proto-canais e canais (temporários e perenes) que fazem a conexão com os vales fluviais de maior hierarquia fluvial (STRAHLER, 1957; DUNNE, 1980; ALMEIDA NETO *et al.*, 2017). Em escala local, as cabeceiras vertem seus fluxos hídricos superficiais para o Córrego da Serra, afluente do Rio do Peixe na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. A seleção das duas cabeceiras buscou ilustrar o panorama local e fornecer subsídios para a compreensão da morfodinâmica regional, mas o conjunto amostral poderá ser enriquecido por futuras investigações.

No total, foram monitoradas quatro nascentes e seus respectivos canais de primeira ordem, distribuídos nas duas cabeceiras, totalizando oito pontos amostrais. Para referenciar os pontos amostrais, foi realizada uma codificação, em que a unidade do código de mapeamento ‘0’ refere-se a nascente e a unidade ‘1’ representa o ponto amostral do canal de primeira ordem (a montante da confluência com o canal de ordem hierárquica superior). A dezena do código de mapeamento é utilizada para diferenciar as microbacias entre si.

As áreas de contribuição de cada ponto amostral foram mapeadas, sendo as bacias de zero ordem (SIDLE *et al.*, 2018) referentes a nascentes; e as de primeira ordem, à área de drenagem total das microbacias de primeira ordem. As nascentes PS10 e PS20 encontram-se localizadas na cabeceira 1 e as nascentes PS30 e PS40 na cabeceira 2. A **Tabela 1** apresenta informações básicas sobre as nascentes estudadas. As nascentes PS10 e PS30 são condicionadas por afloramentos rochosos, enquanto a PS20 e a PS40 possuem afloramentos e blocos em suas imediações. A maioria possui exfiltração pontual, com exceção da PS10, que tem exfiltração múltipla. Todas as quatro nascentes exfiltram em locais de contato lítico entre rochas e solo ou outras coberturas superficiais.

Figura 3: Área de estudo



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2020).

Tabela 1: Nascentes estudadas

Nascente	Springer e Stevens (2009)	Felippe e Magalhães Jr. (2014)	Exfiltração	Altitude
PS10	Hillslope	Dinâmica-Flutuante	Múltipla	575 m
PS20	Rheocrene	Dinâmica	Pontual	645 m
PS30	Rheocrene	Dinâmica	Pontual	550 m
PS40	Helocrene	Freática	Pontual	555 m

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2020).

3. PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS

Após a definição da área foi realizada a caracterização das cabeceiras estudadas e a restituição de drenagem. Tais procedimentos técnicos foram realizados em expedições de campo, nas quais foram percorridos todos os canais existentes de jusante para montante e marcados todos os pontos de interesse - como lagos, represamentos, afloramentos rochosos, áreas úmidas, confluências entre canais e nascentes - com o auxílio de receptor GPS. Em gabinete, os pontos coletados foram plotados no *software ArcGIS 10.2 ERSI®* e sobrepostos com imagens aéreas de alta resolução e com o modelo digital de terreno (a partir de imagens SRTM/USGS - *Shuttle Radar Topography Mission / United States Geological Survey*) para reconstituição cartográfica da rede de drenagem.

Estas etapas foram seguidas das mensurações em campo, com o intuito de caracterizar os hidrossistemas, determinar a vazão instantânea e coletar as amostras para análises laboratoriais. O monitoramento da vazão e dos parâmetros geoquímicos foi realizado com periodicidade trimestral ao longo de um ano hidrológico, totalizando quatro campanhas de campo: 04/06/2018, 18/09/2018,

11/12/2018 e 12/03/2019. A vazão foi calculada através de técnica expedita de utilização de sacos plásticos para a coleta de água, no leito do canal, de modo a captar todo o seu fluxo. A coleta foi realizada em triplicata com tempos cronometrados distintos a fim de minimizar eventuais erros e diminuir o desvio-padrão dos resultados. O volume coletado é medido em provetas graduadas com resolução de 0,001 L e seringas graduadas com mesma precisão. A vazão foi calculada conforme a **Equação (1)**. A técnica de mensuração da vazão respeitou os preceitos defendidos por diversos outros trabalhos em canais de baixa ordem e nascentes (PINTO *et al.*, 2004; FELIPPE; MAGALHÃES JR., 2009).

$$Q = (v1 + v2 + v3)/(t1 + t2 + t3) \quad (1)$$

Sendo: Q a vazão (L/s); v o volume (L); t o tempo (s).

Em cada campanha de campo foi coletado 1 L de água em cada ponto de monitoramento, seguindo as recomendações de Baird *et al.* (2012) para análises laboratoriais. A coleta foi realizada com a utilização de seringas e as amostras foram acondicionadas em frascos de polipropileno devidamente identificados, os quais foram enviados sob refrigeração, ao final de cada campanha, para o Laboratório de Geomorfologia e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Os parâmetros laboratoriais analisados foram estabelecidos respeitando-se as características hidrogeológicas da unidade de estudo, assim como as considerações apresentadas por Hindi *et al.* (2003), Salgado e Valadão (2003) e Feitosa *et al.* (2008). Em termos técnicos, os procedimentos seguiram as recomendações dos *Standard methods for the examination of water and wastewater* (BAIRD *et al.*, 2012).

Para os parâmetros pH e condutividade elétrica (EC) foram utilizadas amostras *in natura*, sem a necessidade de filtragem ou acidificação. O pH foi medido com pHmetro de bancada com precisão de leitura de 0,01. A EC foi medida em condutivímetro da marca Tecnopon (modelo mCa-150), equipado com célula de condutividade k=0,1 e calibrado com solução padrão na concentração de 84 µS/cm.

Os ensaios para a determinação das concentrações de alumínio, ferro, manganês, nitrato, nitrito, ortofosfato, potássio, sódio e sulfato foram realizados via análise fotolorimétrica. Foram feitas as leituras em triplicata em fotolorímetro modelo Superfoto AT 100PBS II.

Antes da realização das demais análises químicas, as amostras foram filtradas em um sistema de filtração a vácuo, com vidro borossilicato e membrana estéril de filtração 0,45 µm. A alcalinidade foi mensurada com a utilização de titulador potenciométrico HANNA HI902, com titulante HCL 0,1 N padronizado.

As quantidades de cálcio e magnésio foram obtidas por meio de testes de titulação química, usando solução de Ácido Etileno Diamino Tetracético de 0,01 mg/L, com 2mL de solução tampão e uma pequena dose do indicador preto de eriocromo, todos dispostos junto às amostras de águas em um erlenmeyer graduado. A verificação foi realizada com bureta de 25 mL. Posteriormente, a titulação química de cálcio foi feita com a adição de uma solução de hidróxido de potássio e um indicador calcon. Com base nos resultados, foi possível obter a concentração de cálcio em cada amostra e os valores foram subtraídos dos valores dos testes anteriores, permitindo, consequentemente, a definição dos quantitativos de cálcio e magnésio separados de cada uma das amostras dos pontos de monitoramento.

Para a determinação do TDS (total de sólidos dissolvidos) optou-se por seguir a recomendação de Baird (2012), utilizando-se a análise gravimétrica. Uma alíquota de 100 mL de cada amostra foi seca na estufa por 24 horas a 180°C. A diferença da massa final e a massa inicial do cadinho indica o peso do soluto. Foi utilizada uma balança analítica com escala de 0,001 mg e os resultados estão expressos em mg/L.

A análise estatística dos dados hidrogeoquímicos foi realizada e comparada aos cálculos de vazão para viabilizar a obtenção das taxas de desnudação geoquímica, conforme indicações de Salgado e Valadão (2003), Rezende *et al.* (2010), Leão *et al.* (2012) e Felipe e Magalhães Jr (2016). Considera-se que a carga química total dos sistemas hidrogeomorfológicos, ao longo do tempo, corresponde à perda geoquímica desses sistemas e quando relacionada à área de contribuição e à densidade do material de origem, fornece a desnudação geoquímica e o rebaixamento do relevo (SUMMERFIELD, 1991; THOMAS, 1994). Os resultados de TDS (em mg/L) foram ponderados pela vazão (L/s) e área de contribuição (km²), para expressar os resultados da desnudação geoquímica (kg/km²/y), conforme as **Equações (2), (3), (4) e (5)**.

$$PG_{inst} = TDS_{inst} \cdot Q_{inst} \quad (2)$$

$$PG_{total} = (\Sigma(TDS_{inst})_n) \cdot Q_m \cdot d \quad (3)$$

$$DG = PG_{total} / A \quad (4)$$

$$R = DG/\rho \quad (5)$$

Sendo: PG_{inst} a perda geoquímica instantânea, TDS_{inst} a carga geoquímica instantânea e Q_{inst} a vazão instantânea (**Equação (1)**). A perda geoquímica anual (PG_{total}) é dada pela média da carga geoquímica instantânea pela vazão média anual (Q_m) no período de monitoramento (d), conforme a **Equação (2)**. Pela **Equação (3)**, chega-se à desnudação geoquímica (DG), ponderando-se a perda geoquímica total pela área da bacia de contribuição (A). Por fim, o rebaixamento do relevo é dado pela relação da desnudação geoquímica com a densidade média do substrato (ρ) (**Equação (4)**). Os dados de área de contribuição foram obtidos a partir da vetorização das bacias de contribuição dos pontos amostrais, na base de dados topográfica pré-existente (equidistância de 5 m), com apoio de fotointerpretação. Já os dados de densidade das rochas foram obtidos a partir de revisão da literatura.

Considerando a necessidade de minimizar a influência humana na geoquímica das águas estudadas, a seleção das unidades de estudo preconizou cabeceiras de alta integridade ambiental, as quais apresentassem cobertura florestal em elevado estado de conservação. Nas vistorias de campo, assegurou-se que não havia focos de contaminação dentro das bacias de contribuição dos pontos amostrais.

Cabe ressaltar que, na literatura, alguns trabalhos abordam a influência de águas pluviais na geoquímica da água fluviais (WHITE; BLUM, 1995). Entretanto, na maior parte dos casos, os balanços geoquímicos e a modelagem de massa envolvidos referem-se a bacias hidrográficas e a abordagens estritamente hidrológicas. Ademais, trabalhos realizados no Brasil apontam que a influência da precipitação na geoquímica das águas fluviais é sazonal, sendo relevante em períodos chuvosos (MARKEWITZ *et al.* 2001; KARMANN *et al.* 2007). Assim, neste trabalho a definição das datas de coleta das amostras teve o cuidado para minimizar as contribuições pluviais nas águas das nascentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados das vazões e da área de contribuição de cada ponto são apresentados na **Tabela 2**. De maneira geral, a vazão diminui de junho para setembro e aumenta sucessivamente de dezembro a março, seguindo a dinâmica do balanço hídrico. Todos os pontos de monitoramento são perenes e apresentam uma grande estabilidade no volume de água exfiltrada, característica muito bem representada pela PS40, indicando uma forte influência do escoamento de base. Os valores não mensuráveis (NM) apresentados são decorrentes de um fluxo superficial por demasiado espraído, o que impediu a coleta do volume total de água do ponto monitorado, sendo uma limitação da técnica utilizada.

A vazão dos pontos de primeira ordem é superior à das suas respectivas nascentes em quase todas as medições, com exceção do par PS30/31 no mês de dezembro. A vazão média das nascentes

é de 0,024 L/s e dos canais de primeira ordem 0,037 L/s. A vazão média da cabeceira 1 (0,026 L/s) é inferior à vazão média da cabeceira 2 (0,035 L/s).

A vazão específica dos pontos varia mais de 400% entre si, tendo a cabeceira 2 valores superiores à cabeceira 1. O maior valor é encontrado na cabeceira 1 (PS11). A vazão específica aumenta da nascente para o canal de primeira ordem em valores que variam de 14% (PS40/41) a 97% (PS10/11). Dois fatores condicionam esse comportamento: i) a pequena variação no tamanho das áreas de contribuição dos pontos, decorrente do reduzido tamanho dos canais de primeira ordem e; ii) o deflúvio ao longo dos canais de primeira ordem associado ao aquífero livre e granular da área. A exfiltração da água meteórica não ocorre unicamente na nascente, mas também nos locais onde o nível da água do aquífero intercepta a superfície topográfica (TODD; MAYS, 2005).

Tabela 2: Área de contribuição e dados de vazão por ponto de monitoramento

Ponto	A (km ²)	Q _{jun} (L/s)	Q _{set} (L/s)	Q _{dez} (L/s)	Q _{mar} (L/s)	Q̄ (L/s)	Q _{Esp} (L/s/km ²)
PS10	0,030	0,006	0,004	0,038	0,031	0,020	0,664
PS11	0,030	0,013	0,007	0,056	0,083	0,040	1,306
PS20	0,050	0,014	0,002	0,019	0,027	0,015	0,310
PS21	0,072	NM	0,014	0,040	0,038	0,031	0,432
PS30	0,056	0,001	0,044	0,014	NM	0,020	0,349
PS31	0,056	NM	0,058	0,009	0,027	0,031	0,559
PS40	0,047	0,047	0,038	0,040	NM	0,042	0,881
PS41	0,047	NM	0,042	0,061	0,040	0,048	1,007

Obs.: A – área; Q_{jun} – vazão do mês de junho; Q_{set} – vazão do mês de setembro; Q_{dez} – vazão do mês de dezembro; Q_{mar} – vazão do mês de março; Q̄ – vazão média; Q_{Esp} – vazão específica; NM – não mensurável.

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2020).

Nas **Tabela 3 e 4** são apresentados os resultados dos parâmetros químicos analisados. Todas as amostras apresentam caráter levemente ácido, conforme esperado para o contexto regional. Os valores de alcalinidade mostram que os pontos PS20 e PS21 são os mais suscetíveis a mudanças de pH. Valores superiores a 10 mg/L de CaCO₃ funcionam como tampão, o que promove uma maior estabilidade nos valores de pH.

Tabela 3: Valores dos parâmetros pH, alcalinidade, CE, sílica e TDS

Ponto	Ph	Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃)	CE (μS/cm)	Sílica (mg/L)	TDS (mg/L)
PS10	6,95	20,00	38,63	21,78	51,50
PS11	6,48	19,75	40,27	17,20	48,25
PS20	6,19	10,00	22,42	14,43	35,25
PS21	6,46	9,25	21,33	15,18	35,50
PS30	6,30	19,75	43,63	27,35	82,75
PS31	6,06	19,00	46,00	27,43	84,25
PS40	6,71	40,25	84,46	38,45	91,75
PS41	6,90	38,25	82,38	35,53	93,50

Obs.: pH – potencial hidrogeniônico; CE – condutividade elétrica; TDS – total de sólidos dissolvidos.

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2020).

A concentração de sílica varia de 14,53 mg/L (PS20) a 38,45 mg/L (PS41), tendo a cabeceira 2 maior êxito nos processos químicos de dissolução e hidrólise. Cabe ressaltar que a sílica não é proveniente unicamente do quartzo (mineral resistente ao intemperismo químico), mas também, da alteração do ortopiroxênio, plagioclásio e outros minerais que ocorrem secundariamente.

O TDS representa o somatório de todos os compostos solubilizados na água. O intenso processo de lixiviação típico de clima tropical úmido tende a retirar grande parte dos minerais mais solúveis das cabeceiras, aumentando assim, a participação relativa dos parâmetros sílica e alcalinidade na composição do TDS. Os valores variam de 35,25 a 93,50 mg/L, tendo a cabeceira 2 valor médio 207% superior a cabeceira 1. Fatores locais condicionam a diferença do TDS entre as cabeceiras, como o maior declive do terreno na cabeceira 1 (menor tempo de residência para águas subsuperficiais) e a presença de áreas úmidas (*depressional wetlands*) na cabeceira 2, aumentando assim, a quantidade de matéria orgânica em decomposição.

Tabela 4: Geoquímica da água

Ponto	Ortof.	Fe total	Al	Mg	K	Mn	Ca	Na	Nitrito	Nitrato
PS10	0,79	0,66	0,07	3,67	0,78	0,13	1,68	4,23	0,01	1,00
PS11	0,63	0,60	0,22	4,73	0,48	0,30	1,03	4,33	0,02	0,71
PS20	0,95	0,67	0,22	4,17	0,96	0,17	1,28	2,87	0,15	0,61
PS21	1,01	1,91	0,22	3,70	0,99	0,31	1,15	2,87	0,09	2,47
PS30	0,99	0,67	0,11	4,03	0,34	0,78	0,95	5,53	0,01	0,73
PS31	0,40	1,32	0,25	4,13	0,89	0,41	2,15	6,00	12,33	0,63
PS40	0,59	0,28	0,15	4,60	0,43	0,73	2,68	7,90	0,53	3,87
PS41	0,66	0,98	0,16	5,50	0,61	0,00	1,60	7,23	0,10	5,17

Obs.: Ortofosfato (mg/L); Fe – ferro total (mg/L); Al – alumínio (mg/L); Mg – magnésio (mg/L); K – potássio (mg/L); Mn – manganês (mg/L); Ca – cálcio (mg/L); Na – sódio (mg/L); nitrito (mg/L); nitrato (mg/L).

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2020).

Nota-se que nem todos os possíveis solutos foram mensurados neste trabalho, tendo sido priorizados aqueles relatados na literatura especializada como os mais relevantes em termos da assinatura geoquímica dessas águas. Por esse motivo, a soma dos compostos analisados não é matematicamente equivalente ao valor encontrado de TDS, sendo o residual relacionado a solutos não mensurados nesta investigação.

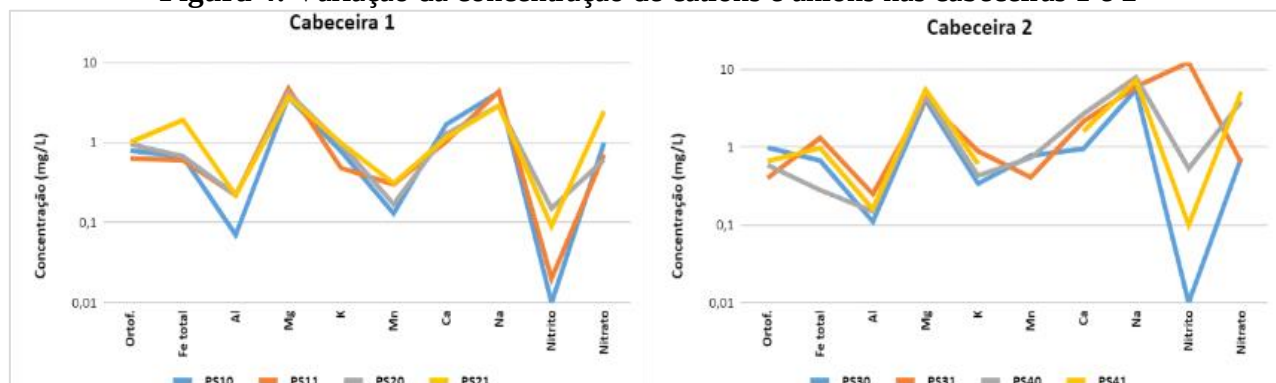
A condutividade elétrica (CE) indica o grau de mineralização da amostra, sendo que quanto maior o valor absoluto encontrado, maior é a concentração de íons capazes de conduzir uma corrente elétrica (BATISTA; FELIPE, 2007). Os valores variam 396% entre os pontos PS21 (21,33 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e PS40 (84,46 $\mu\text{S}/\text{cm}$). A cabeceira 2 possui CE média 200% maior que a cabeceira 1. Não há diferença expressiva entre o ponto de ordem zero e seu respectivo canal de primeira ordem. Também não foi observada uma correlação linear geral para a área de estudo entre os parâmetros TDS e CE tão significativa como no estudo de Felipe e Almeida Neto (2019). Porém observa-se uma dinâmica própria de cada segmento da drenagem devido a diferença na condutivância específica dos elementos químicos presentes em cada ponto de análise e em suas diferentes concentrações. Ainda assim, as áreas com os maiores valores de TDS são aquelas que possuem os maiores valores de CE.

Não há expressiva diferenciação na assinatura geoquímica das águas entre as cabeceiras estudadas, como observado na **Figura 4**. Porém, o valor absoluto de alguns elementos é consideravelmente superior na cabeceira 2, como no caso do sódio e do manganês. Essa variação está provavelmente relacionada à diferenciação entre minerais acessórios do material de origem e a um maior tempo de residência das águas subsuperficiais, refletindo maiores concentrações de outros metais e metalóides.

Dentre os metais, como esperado, os alcalinos e alcalinos-terrosos (Na, Mg e Ca) apresentam as maiores concentrações. A baixa concentração de K é decorrente da pouca disponibilidade do elemento no substrato geológico. Os metais metálicos possuem menores concentrações e relativamente mais uniformes (além do já mencionado caso do Mn), mas ainda assim importantes, com maior representatividade do Fe. O valor de nitrito no ponto PS31 indica acúmulo de matéria

orgânica em decomposição (não excluindo a possibilidade de contaminação), uma vez que esse elemento faz parte da cadeia de decomposição dos hidrocarbonetos nitrogenados.

Figura 4: Variação da concentração de cátions e ânions nas cabeceiras 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2020).

Os indicadores de evolução geoquímica do relevo são apresentados na **Tabela 5**. A perda geoquímica anual (PG_{total}) tem o menor valor no ponto PS20 (18,6 kg/y) e o maior valor em PS41 (142,8 kg/y). A variação entre os pontos chega a 265%, com uma evidente concentração dos maiores resultados na cabeceira 2. A PG_{inst} é constantemente maior nos canais de primeira ordem do que nas suas respectivas nascentes. Pode-se observar o efeito da sazonalidade em cada ponto em relação a PG_{inst} , com os menores valores no período seco. Poucos trabalhos discutem a PG_{total} em nascentes e canais de pequena hierarquia fluvial, porém, Felipe e Magalhães Jr. (2016) relatam que nascentes inseridas no contexto de rochas quartzíticas possuem perda geoquímica inferior a 10 kg/y, enquanto em ambientes carbonáticos essa perda pode superar 45.000 kg/y. Os resultados aqui encontrados, portanto, corroboram essa assertiva.

Tabela 5: Perda geoquímica, desnudação geoquímica e rebaixamento do relevo

Ponto	PG_{inst} jun (mg/s)	PG_{inst} set (mg/s)	PG_{inst} dez (mg/s)	PG_{inst} mar (mg/s)	PG_{total} (kg/y)	DG (kg/km ² /y)	RR (m/My)	RR (mm/y)
PS10	0,238	0,221	1,142	2,240	30,287	1025,923	0,395	0,000395
PS11	0,416	0,352	2,644	5,156	67,541	2217,272	0,853	0,000853
PS20	0,421	0,073	0,691	1,175	18,602	373,046	0,143	0,000143
PS21	NM	0,549	1,371	1,571	36,699	512,949	0,197	0,000197
PS30	0,102	4,461	1,046	NM	58,960	1053,181	0,405	0,000405
PS31	NM	6,980	0,626	2,298	104,117	1858,710	0,715	0,000715
PS40	3,972	3,108	3,757	NM	113,925	2415,132	0,929	0,000929
PS41	NM	3,929	5,652	4,005	142,810	3024,173	1,163	0,001163

Obs: PG_{inst} – perda geoquímica instantânea; PG_{total} – perda geoquímica total; DG – desnudação geoquímica; RR – rebaixamento do relevo; NM – não mensurável.

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es) (2020).

A desnudação geoquímica (DG) média sinaliza um esvaziamento das cabeceiras da ordem de 1.560 kg/km²/y, variando de 373 a 3.024 kg/km²/y entre os pontos amostrais e com os menores valores concentrados na cabeceira 1. A DG aumenta da nascente para o canal de primeira ordem, com um acréscimo médio pouco maior que 150%, tendo o par PS10/11 o maior aumento significativo.

Na literatura, é comum que os valores de rebaixamento do relevo (RR) sejam apresentados em m/My, mais usual em estudos geomorfológicos, ou mm/y, levando em conta as variações dos elementos climáticos ao longo do Quaternário (SUGUIO, 2010) e a dinâmica hidrológica das nascentes e canais de pequena ordem fluvial em médio e longo termos. Os dados de RR variaram de

0,000143 (PS20) a 0,001163 mm/y (PS41) e apontam que os canais de primeira ordem são mais eficazes no rebaixamento do relevo do que as nascentes.

Os resultados obtidos de DG e RR são baixos, semelhantes à magnitude dos encontrados por Rezende *et al.* (2010) para terrenos com alta proporção de rochas quartzíticas (quimicamente mais resistentes). Cherem *et al.* (2012) encontraram taxas de rebaixamento da ordem de 8 a 20 m/My em unidades planálticas cristalinas, na região dos campos das vertentes, em Minas Gerais. Barreto *et al.* (2013) apontam para taxas consideravelmente menores em serras quartzíticas (entre 3 e 4 m/My), mas ainda assim, muito superiores às do presente trabalho. Deve-se ressaltar que os resultados absolutos baixos deste trabalho são referentes a áreas bastante pequenas e que grande parte dos estudos publicados são desenvolvidos em medias e grandes bacias hidrográficas com inúmeras cabeceiras.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos de taxas de desnudação geoquímica são uma importante ferramenta para a compreensão da evolução do modelado do relevo. No Brasil Tropical Atlântico tal perspectiva ganha ainda mais importância, uma vez que o intemperismo químico possui papel de destaque na evolução da paisagem. Entretanto, o desconhecimento do significado das cabeceiras de drenagem nesse conjunto de processos limita as possibilidades de compreensão da heterogeneidade espacial e temporal da morfogênese e morfodinâmica.

Foi possível perceber que o regime hidrológico cumpre uma função preponderante na desnudação de cabeceiras, pois a vazão dos hidrossistemas oscila muito, tanto sazonalmente, quanto espacialmente, ao longo da rede de drenagem. A variação da vazão específica mostra que a ponderação do débito pela área não é muito realista para cabeceiras, pois os interflúvios subterrâneos não necessariamente correspondem aos superficiais; além disso, linhas de fluxo subterrâneo e subsuperficial de diferentes magnitudes e origens atuam concomitantemente na exfiltração.

Assim como a vazão, a mineralização das águas é distinta entre as cabeceiras, mostrando que fatores locais são importantes. Esta última, porém, não pode ser explicada pela sazonalidade climática, mas por diferenças no material geológico-pedológico com o qual as águas entram em contato. Oscilações locais podem estar relacionadas a especificidades pedológicas, presença de depósitos sedimentares ou acúmulos de matéria orgânica (estes últimos, muito comuns em hidrossistemas de cabeceiras sob vegetação florestal). A relação entre a carga dissolvida nas nascentes e seus respectivos canais de primeira ordem, por outro lado, é relativamente estável, ficando os valores de TDS dentro do retratado pela literatura para as características geológicas e climáticas regionais.

Apesar de ambas as cabeceiras serem próximas, condicionadas pelo mesmo contexto geológico-geomorfológico regional, é possível diferenciar a assinatura geoquímica de suas águas. Isso poderia ser mais bem refinado com a detecção de alguns outros solutos em nível traço (sobretudo ânions). De um modo geral, a sílica é o composto de maior concentração nas águas, o que é explicado pelo contexto regional que propicia intensa lixiviação das coberturas superficiais. Por conseguinte, os cátions maiores (alcalinos e alcalinos terrosos) refletem concentrações relativamente baixas, pois a hidrólise favorece a sua liberação, de modo que grande parte já foi lixiviada ao longo do tempo. Com mantos em que predominam argilas oxídicas, os metais metálicos têm baixa concentração relativa na água. Porém, fatores locais podem promover a redução do ferro (como em áreas encharcadas) e sua consequente solubilização na água, o que aumenta a concentração.

Nesse contexto, a perda geoquímica anual é pequena, resultado da baixa vazão típica dos sistemas estudados. Os valores obtidos estão dentro da normalidade encontrada em outros estudos em contextos similares. A desproporção na perda geoquímica entre as cabeceiras é justificada pelo fato da cabeceira 2 ter maior vazão e carga em solução ao mesmo tempo (ambos os parâmetros que conformam a perda geoquímica).

Ponderando pela área, a desnudação geoquímica mostra valores expressivos, indicando uma retirada de massa média de 1,5 ton. para cada quilômetro quadrado de área por ano (sendo o máximo valor superior a 3 ton.). Percebe-se uma relação direta com a hierarquia fluvial, já que a desnudação geoquímica aumenta da nascente para o canal de primeira ordem. Isso já era esperado, pois há uma forte tendência ao aumento de vazão ao longo da drenagem fluvial, mas a proporção desse incremento na desnudação geoquímica chama atenção (chegando a mais que o dobro em alguns casos). Este cenário pode ser explicado pelo fato da vazão e do TDS serem maiores nos canais de primeira ordem, desmistificando a ideia de que as nascentes têm a maior carga química da rede de drenagem.

O rebaixamento do relevo apresentou valores absolutos baixos quando comparado a outros estudos no Brasil Tropical Atlântico, o que já era esperado para o contexto das cabeceiras de drenagem. Porém, os resultados oscilam dez vezes entre os pontos amostrados, o que ao longo do tempo ajuda a compreender a evolução mamelonar do relevo regional, em que a linha de interflúvios possui oscilações altimétricas constantes. Por fim, merece ser lembrado que não estão incluídos nesses valores a massa retirada por processos físicos. Estudos futuros que associem a desnudação geoquímica à perda de matéria por processos erosivos e movimentos de massa podem clarear a evolução das cabeceiras de drenagem em diferentes unidades geomorfológicas.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais, pelo apoio financeiro ao projeto que originou este artigo. Ao CNPq pela bolsa de pesquisa do último autor.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. **Províncias Geológicas e Domínios Morfoclimáticos no Brasil**. São Paulo: USP, 1970.

ALMEIDA NETO, J. O.; FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JR., A. P.; COSTA, F. C. Caracterização Hidrogeoquímica de Cabeceiras de Drenagem na Serra da Mantiqueira. In: XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 17., 2017, Campinas. **Anais [...]**, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2017. p. 6003-6015. ISBN: 978-85-85369-16-3.

BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; CLESCERI, L. S. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Ed. Eugene W. Rice. V. 10. Washington, DC: American Public Health Association, 2012.

BATISTA, E.; FELIPE, E. Influência da Variação da Condutividade e Densidade da Água na Calibração Gravimétrica. In: II Conferência Nacional de Metrologia e Inovação, 2., 2007. **Anais[...]**, Funchal: Sociedade Portuguesa de Metrologia, 2007.

BARRETO, H. N.; VARAJÃO, C. A.; BRAUCHER, R.; BOURLÈS, D. L.; SALGADO, A. A.; VARAJÃO, A. F. Denudation rates of the Southern Espinhaço Range, Minas Gerais, Brazil, determined by in situ-produced cosmogenic beryllium-10. **Geomorphology**, v. 191, p. 1-13, 2013.

BENDA, L.; HASSAN, M. A.; CHURCH, M.; MAY, C. L. Geomorphology of Steepland Headwaters: the transition From Hillslopes to Channels. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 4, p.835-851, 2005. DOI: :10.1111/J.1752-1688.2005.TB04466.X.

CARNEIRO, P. A. S.; MATOS, R. E. S. Geografia Histórica da Ocupação da Zona da Mata Mineira: acerca dos mitos das “áreas proibidas”. XIV Seminário sobre a Economia Mineira, 14., 2010. **Anais[...]**, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FELIPPE, M. F.; ALMEIDA NETO, J. O. DE; MARQUES, L. O.; REIS, L. A. DOS; LAPA, D. P.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Dinâmica geoquímica em cabeceiras de drenagem da Depressão do Paraíba do Sul: subsídios à compreensão do papel morfodinâmico de nascentes e canais de baixa ordem. **Boletim de Geografia**, v. 39, p. 422-439, e61000, 14 abr. 2022.

CARTWRIGHT, I.; ATKINSON, A. P.; GILFEDDER, B. S.; HOFMANN, H.; CENDÓN, D. I.; MORGENSTERN, U. Using geochemistry to understand water sources and transit times in headwater streams of a temperate rainforest. **Applied Geochemistry**, v. 99, p. 1-12, 2018.

CARTWRIGHT, Ian; MORGENSTERN, Uwe. Using tritium and other geochemical tracers to address the “old water paradox” in headwater catchments. **Journal of Hydrology**, v. 563, p. 13-21, 2018.

CHEREM, L. F. S; VARAJÃO, C. A. C.; BRAUCHER, R.; BOURLÉS, D.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. C. Long-term evolution of denudational escarpments in southeastern Brazil. **Geomorphology**, v. 173, p. 118-127, 2012.

CHEVALLIER, P.; SEIDEL, J. L.; TAUPIN, J. D.; PUSCHIASIS, O. Headwater Flow Geochemistry of Mount Everest (Upper Dudh Koshi River, Nepal). **Frontiers in Earth Science**, v. 8, article 351, 2020.

COELHO NETTO, A. L. Evolução de Cabeceira de Drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4. n. 2, p. 69-100, 2010. DOI: 10.20502/rbg.v4i2.25.

CONTI, J. B. O meio ambiente Tropical. **Geografia**, Rio Claro, v. 14, n. 18, p. 69-79, 1989.

CPRM/CODEMIG. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais**. Escala: 1:1.000.000. 2014.

DUARTE, B. P. **Evolução Tectônica dos Ortognaisses dos Complexos Juiz de Fora e Mantiqueira na Região de Juiz de Fora, MG**: geologia, petrologia e geoquímica. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 280p.

DUNNE, T. Formation and controls of channel networks. **Progress in Physical Geography**, v. 4, n. 2, p. 211-239, 1980. DOI: 10.1177/030913338000400204.

FARIA, A. P. Influência da Vegetação nos Processos Fluviais de Bacias de Primeira Ordem. **Revista Brasileira de Recursos hídricos**, v. 5, n. 3, p. 59-68, 2000. DOI: 10.21168/rbrh.v5n3.p59-68.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL-FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3. ed., Rio de Janeiro: CPRM, LABHID, 2008.

FELIPPE, M. F.; ALMEIDA NETO, J. O. Comparação de Técnicas de Obtenção de Sólidos Totais Dissolvidos nas Águas: contribuições para os estudos de desnudação geoquímica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 1, p. 19-33, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i1.1440.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JR., A. P. Análise da Variabilidade da Vazão das Nascentes no Parque das Mangabeiras (Belo Horizonte-MG) em Relação aos seus Condicionantes Ambientais. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 13., 2009, Viçosa-MG. **Anais[...]**, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2009.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JR., A. P. Desenvolvimento de uma Tipologia Hidrogeomorfológica de Nascentes Baseada em Estatística Nebulosa Multivariada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 15, v. 3, p. 393-409, 2014. DOI: 10.20502/rbg.v15i3.463.

FELIPPE, M. F.; ALMEIDA NETO, J. O. DE; MARQUES, L. O.; REIS, L. A. DOS; LAPA, D. P.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Dinâmica geoquímica em cabeceiras de drenagem da Depressão do Paraíba do Sul: subsídios à compreensão do papel morfodinâmico de nascentes e canais de baixa ordem. **Boletim de Geografia**, v. 39, p. 422-439, e61000, 14 abr. 2022.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JR., A. P. A Contribuição das Nascentes na Desnudação Geoquímica: borda oeste da Serra do Espinhaço Meridional (Minas Gerais, Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 1, p. 79–92, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i1.878.

FERREIRA, C. C. M. **Tipos de tempo de categorias climáticas na Bacia do Rio Paraíba – MG**. 2002. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GOMI, T.; SIDLE, R. C.; RICHARDSON, J. S. Understanding Processes and Downstream Linkages of Headwater Systems: headwaters differ from downstream reaches by their close coupling to hillslope processes, more temporal and spatial variation, and their need for different means of protection from land use. **BioScience**, v. 52, n. 10, p. 905-916, 2002. DOI: 10.1641/0006-3568(2002)052[0905:UPADLO]2.0.CO;2.

HACK, J. J.; GOODLETT, J. C. Geomorphology and Forest Ecology of a Mountain Region in the Central Appalachians. **United States Geological Survey**, p. 347-366, 1960. DOI: 10.3133/pp347.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. C.; SILVA, L. C., TROUW, R. A. J.; JANASI, V. A. (2004). A Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. Beca, São Paulo: p. 203-234.

HINDI, E. C.; ROSA FILHO, E. F.; BITTENCOURT, A. V. L.; XAVIER, J. M. Características Hidrogeológicas do Aquífero Costeiro da Ilha dos Valadares, PR (Brasil) e sua Utilização para Abastecimento Público. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, n.3, p. 19-31, 2003. DOI: 10.5380/hg.v3i0.2633.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.

KARMANN, I.; CRUZ JR, F. W.; VIANA JR, O; BURNS, S. J. Climate influence on geochemistry parameters of waters from Santana–Pérolas cave system, **Brazil**. **Chemical Geology**, 244(1-2), 232-247. 2007.

LEÃO, M. R.; REZENDE, É. A.; SALGADO, A. A. R.; NALINI JR., H. A. Erosão, Denudação e Evolução do Relevo da Média Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 2012. DOI: 10.20502/rbg.v13i2.369.

LEVISON, J., LAROCQUE, M., FOURNIER, V., GAGNÉ, S., PELLERIN, S., OUELLET, M. A. Dynamics of a headwater system and peatland under current conditions and with climate change. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 17, p. 4808-4822, 2014. DOI: 10.1002/hyp.9978.

LUIZ-SILVA, W.; MATOS, R. H. R.; MACHADO, W.; NIZOLI, É. C. Taxas de Sedimentação em Estuário do Sudeste do Brasil, Baseadas em Assinatura Geoquímica e Histórico Industrial. **Geociências**, v. 31, n. 1, p. 69-78, 2012.

MARKEWITZ, D.; DAVIDSON, E. A.; FIGUEIREDO, R. D. O.; VICTORIA, R. L.; KRUSCHE, A. V. Control of cation concentrations in stream waters by surface soil processes in an Amazonian watershed. **Nature**, 410(6830), 802-805, 2001.

MORE. **Mecanismo online para referências, versão 2.0**. Florianópolis: UFSC: Rexlab, 2013. Disponível em: <http://www.more.ufsc.br/>. Acesso em: 03/03/2022.

MONTGOMERY, D. R.; BUFFINGTON, J. M. Channel-reach Morphology in Mountain Drainage Basins. **GSA Bulletin**, v. 109, n.5, p. 596-611, 1997. DOI: 10.1130/0016-7606(1997)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2.

OLIVEIRA, D. E. **Participação dos Sistemas Atmosféricos na Gênese e Ritmo das Chuvas na Bacia Hidrográfica do Rio Preto, MG/RJ, nos anos de 2006, 2007 e 2008**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Ciências Humanas, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. 2016. 149p.

OLIVEIRA, D. E.; FERREIRA, C. C. M. Aspectos climáticos da bacia hidrográfica do rio Preto, MG/RJ, Brasil, influência dos fatores geográficos na formação desse clima regional. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, n. 11, p. 283-307, 2017. DOI: 10.17127/got/2017.11.013.

PALMER, M.; HOPE, D.; BILLETT, M. F.; DAWSON, J. J.; BRYANT, C. L. Sources of organic and inorganic carbon in a headwater stream: evidence from carbon isotope studies. **Biogeochemistry**, v. 52, n. 3, p. 321-338, 2001. DOI:10.1023/A:1006447706565.

PINTO, L. V. A., BOTELHO, S. A.; DAVIDE, A. C.; FERREIRA, E. (2004). Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 197-206, 2004. ISSN: 1413-9324.

REZENDE, É. A.; LEÃO, M. R.; SALGADO, A. A. R.; OLIVEIRA, C. K. R.; NALINI JR., H. A. A Influência Litológica nas Taxas de Denudação Geoquímica do Médio Espinhaço Meridional-MG. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 3, p. 503-514, 2010. ISSN: 1982-4513.

RICCOMINI, C. **O Rift Continental do Sudeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. 319p.

RICCOMINI C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. (2004) Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Ed). **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. Beca, São Paulo, p. 383-406.

SALGADO, A. A. R.; VALADÃO, R. C. Contribuição da Desnudação Geoquímica na Evolução da Erosão Diferencial no Espinhaço Meridional – MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n.2, p. 31-40, 2003. DOI: 10.20502/rbg.v4i2.22.

SALGADO, A. A. R.; COLIN, F.; NALINI JUNIOR, H. A.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; VARAJÃO, C. A. C. O Papel da Denudação Geoquímica no Processo de Erosão Diferencial no Quadrilátero Ferrífero/MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 5, n. 1, p. 55-69, 2004. DOI: 02/rbg.v5i1.32.

SALGADO, A. A. R.; BUENO, G. T.; DINIZ, A. D.; MARENT, B. R. Long-Term Geomorphological Evolution on the Brazil Territory. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. (Eds.). **Landscapes and Landforms of Brazil**. Dordrecht: Springer, p. 19-32, 2015.

SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. New York: Wiley - Interscience, 1977.

SIDLE, R. C.; GOMI, T.; TSUKAMOTO, Y. Discovery of Zero-order Basins as Important Link for Progress in Hydrogeomorphology. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 19, p. 3059-3065, 2018. DOI: 10.1002/hyp.13246.

SPRINGER, A. E.; STEVENS, L. E. Spheres of discharge of springs. **Hydrogeology Journal**, v. 17, n. 1, p. 83-93, 2009. DOI: 10.1007/s10040-008-0341-y.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957. DOI: 10.1029/TR038i006p00913.

SUGUIO, K. **Geologia do Quaternário e mudanças ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

SUMMERFIELD, M. A. **Global Geomorphology**: an introduction of the study of landforms. New York: Longman Scientific & Technical, 1991.

THOMAS, M. **Geomorphology in the Tropics**: a study of weathering and denudation in low latitudes. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.

TODD, D. K.; MAYS, L. W. **Groundwater hydrology**. John Wiley & Sons, 2005.

VALVERDE, O. Estudo regional da Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 20, n. 1, p. 3-79, 1958.

WHITING, P. J.; STAMM, J. F.; MOOG, D. B.; ORNDORFF, R. L. Sediment-transporting flows in headwater streams. **Geological Society of America Bulletin**, v. 111, n. 3, p. 450-466, 1999. DOI: 10.1130/0016-7606(1999)111<0450:STFIHS>2.3.CO.

WHITE, A. F.; BLUM, A. E. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 59, n. 9, p. 1729-1747, 1995. DOI: 10.1016/0016-7037(95)00078-E.



Informações sobre a Licença

Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.

License Information

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which allows for unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, as long as the original work is properly cited.