

**Denudação geoquímica em zona de escarpa, alto rio das Velhas,
Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**

***Geochemical denudation in a scarp zone, upper das Velhas river, Quadrilátero
Ferrífero, Minas Gerais, Brazil***

Fernanda de Oliveira Costa¹; Luis de Almeida Prado Bacellar²; Ramon Messias Martins³; José João Lelis Leal de Souza⁴; Adriana Trópia de Abreu⁵; Edgar do Amaral Santos⁶

- ¹ Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Geologia, Ouro Preto - Minas Gerais, Brasil. Email: ferolivercosta@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5915-4551>
- ² Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Geologia, Ouro Preto - Minas Gerais, Brasil. Email: bacellar@ufop.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1670-9471>
- ³ Sorbonne Université, Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, Paris - Île-de-France, France. Email: ramon.messias_martins@sorbonne-universite.fr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9996-0156>
- ⁴ Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Viçosa - Minas Gerais, Brasil. Email: jjlelis@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4670-6626>
- ⁵ Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Geologia, Ouro Preto - Minas Gerais, Brasil. Email: adriana.abreu@ufop.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3168-4754>
- ⁶ Prefeitura Municipal de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul - Rio Grande do Sul, Brasil. Email: santos.eas@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2751-4987>

Resumo: Este estudo quantifica a denudação geoquímica no alto curso do rio das Velhas, sul do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Brasil, em área inserida na Área de Proteção Ambiental Cachoeira das Andorinhas. A geologia local é composta por rochas metamórficas dos Supergrupo Minas (Proterozoico) e Supergrupo Rio das Velhas (Arqueano). Foram coletadas 23 amostras de águas superficiais em diferentes hierarquias fluviais abrangendo os períodos seco e chuvoso. As análises incluíram Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente para quantificar os elementos maiores e traços, além das medições de precipitação, pH, Eh e vazão fluvial. As concentrações dissolvidas seguem a ordem: Na > Mg > Si > Ca > K > Al > Fe > As > Zn > Mn > Mo > Ba > Sr. A presença de gibbsita, associada aos baixos teores de Al e Fe em solução, indica estágio transicional entre a monossialização e alitização dos solos. A litologia constituiu o principal fator de controle da denudação, que apresenta de 7,27 toneladas/km²/ano e taxa de rebaixamento vertical do relevo de 2,58 metros por milhão ao ano (m/M). Os resultados evidenciam forte controle geológico sobre a dinâmica geoquímica fluvial na região e oferecem parâmetros essenciais para o entendimento da evolução do relevo.

Palavras-chave: Denudação geoquímica; Zona de escarpa; Quadrilátero Ferrífero.

Abstract: This study evaluates geochemical denudation in the upper course of das Velhas river, southern Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Brazil, within the Cachoeira das Andorinhas Environmental Protection Area. The local geology consists of metamorphic rocks from the Minas (Proterozoic) and the Rio das Velhas (Archean) Supergroups. A total of 23 surface-water samples were collected across different stream orders during both dry a wet season. Analyses included Atomic Spectrometry for major and trace elements, along with measurements of rain fall, pH, Eh and stream discharge. Elemental concentrations in solution follow the order: Na > Mg > Si > Ca > K > Al > Fe > As > Zn > Mn > Mo > Ba > Sr. The presence of gibbsite, combined with low concentrations of Al and F in solution, indicates a transitional stage between monossialitization to alitization. Lithology is the main control on denudation, with an average rate of 7.27 t/km²/year and vertical lowering of relief of 2.58 m/Ma. The results highlight the strong geological control over the relief denudation in the region and provide essential parameters for unstinting landscape evolution.

Keywords: Geochemical denudation; Scarp zone; Quadrilátero Ferrífero.

Recebido: 06/09/2025; Aceito: 08/12/2025; Publicado: 23/12/2025.

1. Introdução

A denudação geoquímica, promovida pelo transporte iônico, exerce papel central na remodelação da paisagem por meio do rebaixamento de vertentes, da formação de solos e da evolução das formas de relevo (THOMAS, 1994; ANDERSON *et al.* 2002; BALOGH-BRUNSTAD *et al.* 2008). Em ambientes tropicais, sua influência é particularmente marcante, condicionando fortemente os processos morfogenéticos (SALGADO *et al.* 2007; VARAJÃO *et al.* 2009; ARUN *et al.* 2022). Pinet & Souriau (1998) destacaram a relação direta entre a denudação química e fatores como precipitação média anual e declividade do relevo, com implicações significativas para áreas úmidas intertropicais, como a da bacia do rio São Francisco.

Nos estudos geomorfológicos, as taxas de denudação correspondem ao volume de material removido da superfície e subsuperfície ao longo do tempo, em função da alteração das rochas (CARSON & KIRKBY, 1972; LEEDER, 1991; SOUCH, 2004).

Estudos desenvolvidos em regiões tropicais brasileiras, especialmente no sudeste do país, vêm aprofundando a compreensão da dinâmica denudacional por meio da quantificação das taxas de remoção de massa superficial e subsuperficial em função da alteração das rochas (SALGADO *et al.* 2004; 2007; 2008; VARAJÃO *et al.* 2009; CHEREM *et al.* 2012; BARRETO *et al.* 2012; BERTOLINI, 2015; MARTINS, 2019). Esses trabalhos indicam que a litologia, o clima, o desnível altimétrico, a erosão mecânica, o tipo de solo e o contexto tectônico são fatores chave na variabilidade das taxas de denudação.

No contexto do Quadrilátero Ferrífero (QFe), domínio montanhoso do sudeste brasileiro, a interação entre geologia, geomorfologia e clima tem moldado uma paisagem complexa e multiescalar (ALKMIM & MARSHAK, 1998; SALGADO *et al.* 2004; VARAJÃO *et al.* 2009; UHLEIN & NOCE, 2012; BEZERRA, 2014; BARROS *et al.* 2016). A região concentra diferentes unidades litológicas, estruturadas em quatro unidades principais (ENDO *et al.* 2019): (i) embasamento cristalino, de idade Arqueana, composto por gnaisses, granitos e migmatitos; (ii) Supergrupo Rio das Velhas, de idade Arqueana, composto por quartzitos, xistos e filitos numa sequência do tipo *greenstone belt*; (iii) Supergrupo Minas, de idade Proterozoica, constituído por rochas metassedimentares como quartzitos, itabiritos, xistos, filitos e formações ferríferas e, (iv) Supergrupo Estrada Real, também de idade Proterozoica, constituído basicamente por quartzitos, metaconglomerados e xistos.

A intensa erosão que moldou o relevo do QFe ao longo de sua evolução geológica tem motivado sucessivos estudos qualitativos, iniciados com os trabalhos pioneiros de Harder & Chamberlin (1915a; b). Esses autores atribuíram aos patamares altimétricos à resistência litológica diferencial em que os quartzitos e itabiritos constituíam os substratos das terras altas, os xistos/filitos às terras médias e os granito-gnaisses representariam as terras baixas. Estudos posteriores confirmaram quantitativamente o controle litológico, com taxas de erosão variando de 1,3 a 4,0 m/Ma para quartzitos e itabiritos; 4,0 a 8,0 m/Ma para xistos e filitos; 5,5 m/Ma com granitos e gnaisses; e 25,0 m/Ma para mármore e dolomitos (SALGADO *et al.* 2004). Estudos mais recentes, baseados em dados isotópicos (^{10}Be) e modelos topográficos (índice SL), têm refinado esse entendimento, revelando que litologias supostamente resistentes, como quartzitos e itabiritos, nem sempre sustentam os compartimentos altimétricos mais elevados (SALGADO *et al.* 2007; 2008; VARAJÃO *et al.* 2009; BEZERRA, 2014).

Estudos desenvolvidos por Bacellar (2000), Lipski (2002), Santos & Varajão (2004), Figueiredo *et al.* (2004), Bacellar *et al.* (2005) e Varajão *et al.* (2009) indicam que a neotectônica e as flutuações climáticas cenozoicas influenciaram a evolução geológica e geomorfológica do QFe. Esses processos também repercutiram na evolução de coberturas pedológicas, especialmente por meio de mecanismos como o coluvionamento (COSTA *et al.* 2013, 2014; COSTA, 2018). Contudo, a influência das formas do relevo sobre o desenvolvimento dos mantos pedológicos permanece pouco explorada em escala de topossequência, sobretudo no que se refere às taxas de denudação geoquímica e ao rebaixamento vertical das vertentes escarpadas.

Neste contexto, o presente estudo tem como foco analisar a evolução de um sistema pedológico em vertentes escarpadas, tomando como base as investigações prévias de Costa *et al.* (2014) considerando os processos de longo termo que controlam a denudação geoquímica e o rebaixamento do relevo. A abordagem adotada fundamenta-se na quantificação química elementar da cobertura pedológica e da assinatura geoquímicas das águas superficiais no alto curso do córrego São Bartolomeu, afluente do alto rio das Velhas. Assim, o estudo buscar aprimorar o entendimento das interações entre pedogênese e morfogênese nas terras altas e médias, por meio da determinação das taxas de denudação geoquímica no domínio escarpado do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.

2. Área de Estudo

A área de estudo abrange uma zona escarpada, com altitude de 1.345 m e declividade de 36%, situada na bacia do córrego São Bartolomeu (alto rio das Velhas), setor sul do QFe (Figuras 1 e 2a). A região está inserida na Área de Proteção Ambiental da Cachoeira das Andorinhas (APA das Andorinhas), no município de Ouro Preto (MG), e é composta por rochas metamórficas do Proterozoico com idade de 2,5 Ga (Supergrupo Minas), e por unidades Arqueanas com idades entre 2,6 a 2,7 Ga (Supergrupo Rio das Velhas) (ALKMIM & MARSHAK, 1998; ENDO *et al.* 2019).

Nas cabeceiras da bacia (Figura 1) afloram quartzitos e filitos do Grupo Caraça, além de itabiritos do Grupo Itabira, ambos pertencentes ao Supergrupo Minas (BALTAZAR *et al.* 2005). Essas litologias são comumente recobertas por canga ferruginosa, que constitui a superfície cimeira regional, sobretudo sobre os itabiritos do Grupo Itabira (ZUCCHETTI *et al.* 1998; BALTAZAR *et al.* 2005). Esse domínio é separado, por uma quebra de relevo negativa, do domínio de cristas alinhadas e ravinadas (IEF/UFV, 2005), sustentadas por xistos do Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas). Na área de estudo, esses xistos foram subdivididos em duas unidades: a Unidade Catarina Mendes; constituída por (i) metagrauvacas homogêneas com rochas subordinadas, como lentes de metaconglomerados, tremolita-xistos e metarenitos; e a (ii) Unidade Córrego da Paina, composta por metargilitos, metassiltitos e metagrauvacas.

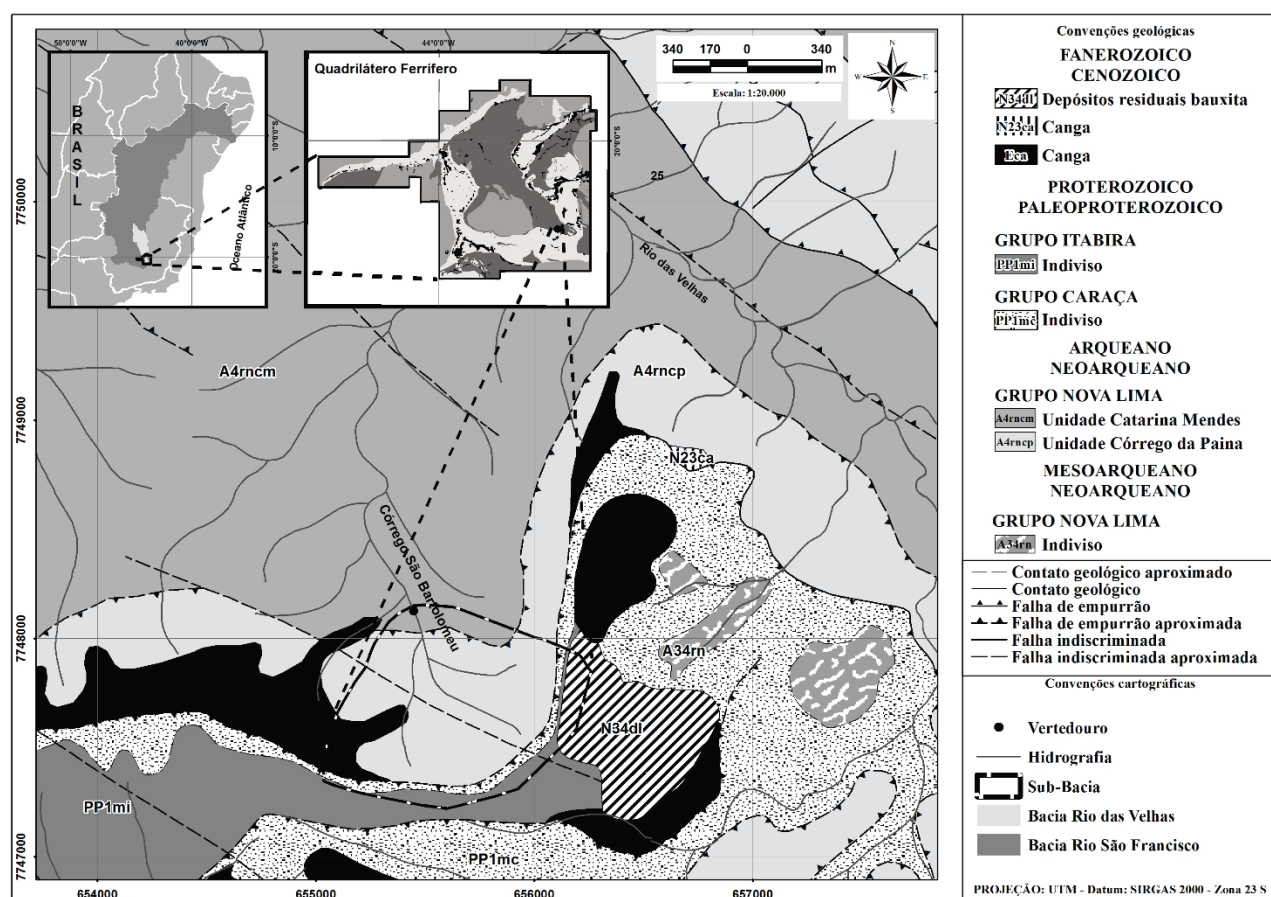


Figura 1 – Mapa geológico da bacia do córrego São Bartolomeu, afluente do alto Rio das Velhas, no Quadrilátero Ferrífero.

Fonte: Adaptado de Baltazar *et al.* (2005) e Costa *et al.* (2014).

Do ponto de vista pedológico, a região apresenta Neossolos Litólicos distróficos nas porções mais elevadas, formados a partir do intemperismo de Quartzitos e Itabiritos. Já nas áreas mais baixas, predominam Cambissolos Háplicos distróficos, desenvolvidos sob xistos (IEF/UFV, 2005; COSTA *et al.* 2014). Em uma topossequência, estudada por Costa *et al.* (2014), composta por cinco perfis, foram identificados dois tipos distintos de Cambissolos Háplicos desenvolvidos na meia e baixa vertente sobre unidades do Supergrupo Rio das Velhas. A alta vertente não foi incluída no estudo por ser um segmento

com rocha aflorante, do Supergrupo Minas, ou com depósito de tálus. O primeiro tipo, mais antigo, formou-se sobre colúvio e é separado do material *in situ* por uma linha de pedras (LP), cuja idade datada por luminescência opticamente estimulada (LOE), varia entre 6.000 ± 940 e 2.880 ± 465 anos AP. O segundo, mais recente, não apresenta LP e possui horizontes Bi e C litodependentes ao xisto, ou seja, desenvolvidos diretamente do intemperismo da rocha matriz. A deposição diferencial de colúvios ao longo da topossequência foi atribuída a eventos tectônicos e climáticos que alteraram a dinâmica morfogenética local ao longo do Quaternário (BACELLAR, 2000; FIGUEIREDO, 2000).

Análises químicas e micromorfológicas evidenciam diferenças claras na gênese dos horizontes superficiais acima e abaixo da LP (Costa et al. 2013; 2014). Esses estudos também revelam um sistema de transformação vertical do xisto, sem transferência interna lateral de matéria, para os horizontes Bi e C. Os autores identificaram baixos valores das relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ki) e $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Kr) nos horizontes acima e abaixo da LP, indicando intenso processo de dessilicatização. Do ponto de vista mineralógico (Costa et al. 2014), a fração argila é composta principalmente por moscovita, caulinita e goethita. A presença de caulinita em todos os perfis estudados representa um ambiente pedogenético dominado pelo processo de monossilatização.

O clima predominante na região, segundo a classificação de Köppen, é tropical com duas estações alternadas (Cwb), apresentando pluviosidade média de 1.610mm/ano (série 1988-2004), com estação chuvosa entre os meses de outubro e março (CASTRO, 2006). Essas condições são compatíveis com o desenvolvimento de solos monossilatizados. A cobertura vegetal é composta por campo rupestre nos topos das superfícies geomórficas elevadas, nos domínios de serras e escarpas, e por mata tropical, nas encostas do domínio das cristas alinhadas e ravinadas) (IEF/UFV, 2005).

3. Materiais e Métodos

3.1 Vazão Fluvial e Precipitação

Com o objetivo de obter dados hidrológicos consistentes, foi instalado no curso do córrego São Bartolomeu (UTM 655468,92 E; 7748118,86 N; Zona 23K) um vertedouro retangular de parede delgada, com contração lateral e lâmina livre (Figura 2C). O equipamento foi construído em aço galvanizado, seguindo o modelo proposto pela USGS (United States Geological Survey) (RANTZ, 1982). O dispositivo foi posicionado em um canal fluvial de segunda ordem segundo a classificação de Strahler (1957), em área isenta de interferência antrópica.

A medição da lâmina d'água foi realizada a cada duas horas por meio de datalogger Schlumberger CTD-Diver[®] acoplado à parede do vertedouro (Figura 2C). As vazões diária e mensal foram calculadas utilizando a Equação 1, conforme recomendações de EPA (1997), Porto (2006) e Feitosa et al. (2008):

Equação 1:

$$Q = 1,83 * (L - 0,2 h) h^{3/2}$$

Em que:

Q= vazão em m³/s;

L= largura do vertedouro (m);

h= altura da água sobre a base do vertedouro (m).

Os dados de precipitação foram coletados a cada duas horas em estação meteorológica modelo Tracom-Watchdog 2900ET (Figura 2B), seguindo as recomendações técnicas sugeridas por Garcez & Alvarez (1988).

3.2 Coleta e Processamento das Amostras

Foram coletadas 23 amostras de água superficial para análises químicas entre a estação úmida (1º de outubro de 2011 a 31 de março de 2012) e a estação seca (1º de abril a 30 de setembro de 2011). As amostras foram coletadas no centro do canal e nas imediações do vertedouro, utilizando seringas de 25 mL. Em seguida, foram filtradas em membranas de éster-celulose de 0,45 µm e acidificadas com ácido nítrico (HNO₃) concentrado até pH < 2, conforme preconiza Greenberg et al. (1992). Após à coleta, as amostras foram armazenadas a 4°C.

As análises *in situ* de parâmetros físico-químicos potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (EC), potencial redox (Eh) e temperatura foram realizadas utilizando-se sonda multiparâmetro Myron-L Company[®] 6PII-CE (Figura 2E), previamente ambientada com água do local por três ciclos consecutivos antes de cada medição.

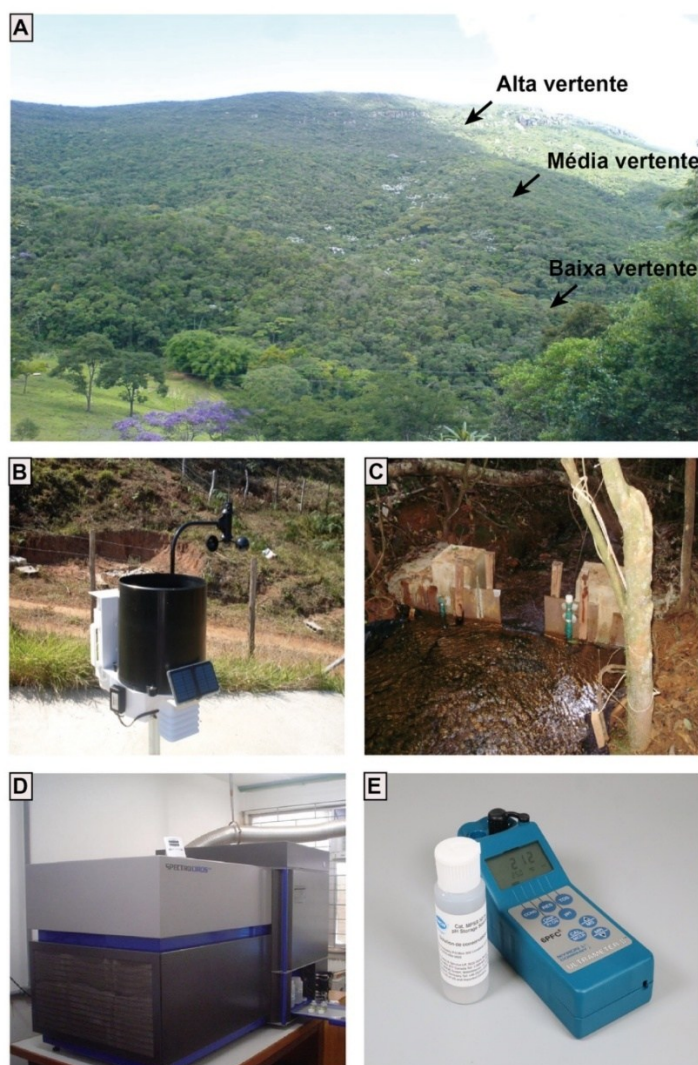


Figura 2 – Documentação ilustrativa dos procedimentos metodológicos: A) Vertente estudada; B) Estação meteorológica; C) Vertedouro instalado no córrego São Bartolomeu onde as amostras de água foram coletadas; D) ICP-OES, onde as amostras de águas foram analisadas e os teores dos elementos quantificados e; E) Aparelho multiparâmetro utilizado nas coletas de dados.

Fonte: Autores (2025).

3.3 Espectrometria por Plasma Acoplado Indutivamente

As concentrações dos elementos Al, As, Ba, Ca, K, Fe, Mg, Li, Mn, Mo, Na, Sc, Si e Zn foram determinadas por Espectrometria de Emissão Óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES, SPECTRO CIROSCCD® modelo 25000), no Laboratório de Geoquímica Ambiental (LQQA) do Departamento de Geologia, Escola de Minas/UFOP (Figura 2D). O controle de qualidade analítico foi realizado com material de referência certificado (SRM) para águas naturais, padrão NIST 1643e.

3.4 Taxa de Denudação Geoquímica e Rebaixamento do Relevo

A taxa de denudação química anual foi estimada com base na equação adaptada de Thomas (1994), que considera a somatória da carga iônica dissolvida em ambas as estações climáticas (úmida e seca), em função da área da bacia, da vazão e do tempo amostrado:

Equação 2:

$$D = \frac{\left(\frac{CQ_u \times V_u}{A} \times T_u \right) + \left(\frac{CQ_s \times V_s}{A} \times T_s \right)}{d}$$

Em que:

D = taxa de denudação (ton./km²/ano);

CQ = carga química dissolvida em ton./m³;

u = estação úmida;

s = estação seca;

V = vazão em m³/s;

A = área da bacia em km²;

T = tempo convertido em segundos;

d = densidade da rocha.

As taxas de denudação foram determinadas com base na carga química medida por ICP-OES. Concentrações abaixo do limite de quantificação (LQ) tiveram seu valor igualado à metade do LQ para a execução dos cálculos. A taxa de rebaixamento do relevo (m/Ma) foi calculada utilizando-se densidade de 2,81 g/cm³, conforme Telford et al. (1990). A taxa de rebaixamento local foi estimada a partir das taxas calculadas para toda a alta bacia.

4. Resultados

4.1 Monitoramento Hidroquímico

A vazão aumentou de até três vezes nos meses de novembro e dezembro de 2011 e janeiro de 2012, coincidindo com os períodos de maior precipitação (Figura 3). A vazão variou entre 16,95 e 89,89 m³/s durante o período monitorado, com valores entre 16,95 e 36,12 m³/s de abril a setembro e entre 22,57 e 89,89 m³/s de outubro a março. A precipitação quinzenal apresentou valores entre 0 e 15,9 mm no período seco e entre 1,4 e 436,9 mm na estação úmida. A condutividade elétrica oscilou entre 12,84 e 22,41 µS/cm (Figura 3).

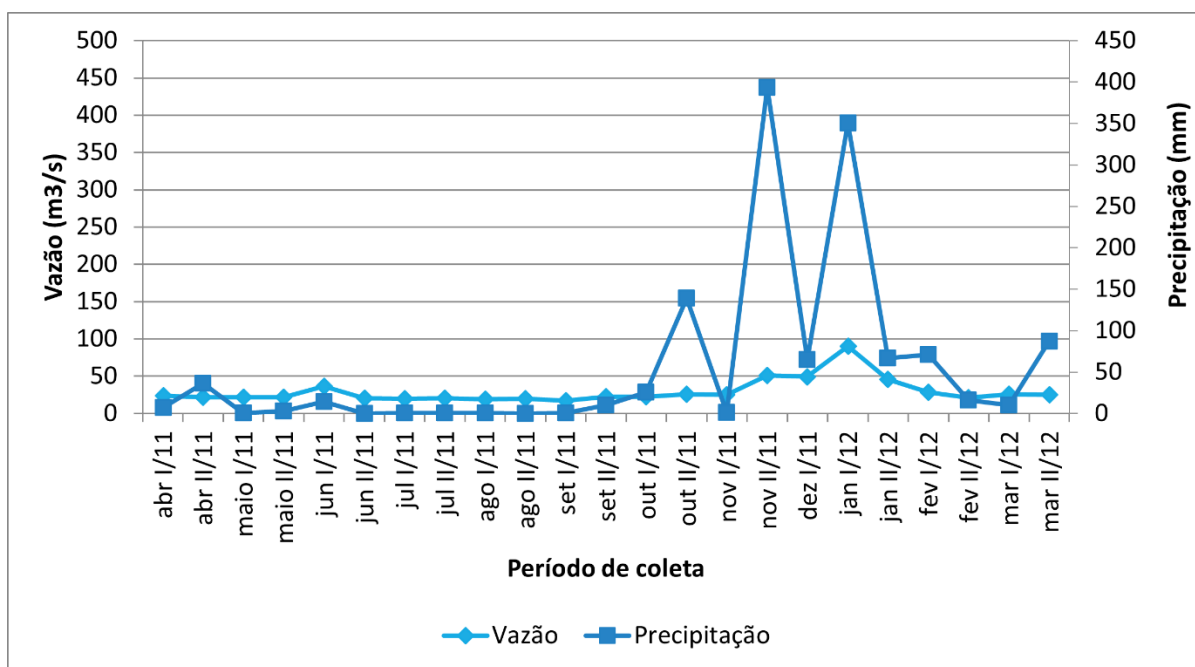


Figura 3 – Vazão e precipitação quinzenais na alta bacia do córrego São Bartolomeu.
Fonte: Autores (2025).

4.2 Taxas de Denudação e Rebaixamento Vertical do Relevo

As amostras de água apresentam, predominantemente, pH neutro com leve tendência à alcalinidade, e potenciais de oxirredução entre 68 mV e 279 mV, caracterizando ambiente redutor. As concentrações de metais e metalóides mantiveram-se, de modo geral, abaixo de $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Tabela 1). A concentração em solução decresce na ordem: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Si}^{4+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{2+} > \text{As}^{5+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Mo}^{6+} > \text{Ba}^{2+}, \text{Sr}^{2+}$.

Os elementos Na e K demonstraram variação sazonal expressiva, com concentrações até 2,5 e 2,3 vezes maiores, respectivamente, na estação seca (Tabela 1). Para o Na, os valores oscilaram entre $0,5510 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e $0,8160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ na seca, e entre $0,3384 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e $0,5880 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ na úmida, refletindo relação inversa com a vazão. O K também apresentou menores concentrações no período úmido, variando entre $0,1838 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e $0,4173 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. O cálcio (Ca) e o magnésio (Mg), associados à litologia xistosa da área, mostraram concentrações maiores com Ca entre $0,680 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e $1,1670 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, especialmente na estação chuvosa, indicando maior solubilidade. O Mg, por sua vez, manteve valores que variaram entre $0,808 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e $1,246 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ durante todo o ano hidrológico, sem diferenças sazonais expressivas.

A taxa de denudação química durante o período úmido foi de $2,051 \text{ ton/km}^2/\text{mês}$, superando em $0,464 \text{ ton/km}^2/\text{ano}$ os valores do período seco, que registrou $1,5870 \text{ ton/km}^2/\text{mensal}$ (Figura 4). A influência da vazão sobre a carga iônica foi evidente, com a menor taxa observada na segunda quinzena de setembro ($0,1016 \text{ ton/km}^2/\text{quinzenal}$), e a maior na primeira quinzena de janeiro ($0,4233 \text{ ton/km}^2/\text{quinzenal}$) (Tabela 2). A taxa de rebaixamento vertical do relevo determinada para a área foi de $2,58 \text{ m/Ma}$.

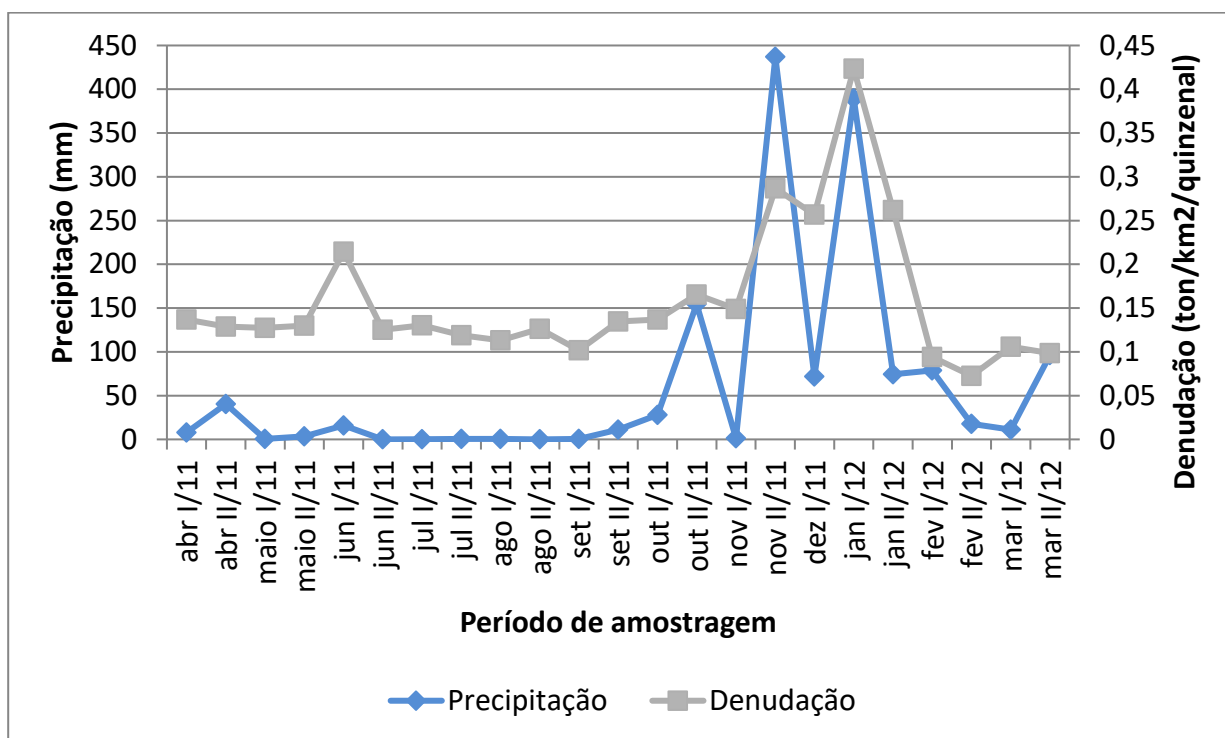


Figura 4 – Relação entre precipitação e denudação (ton/km²/quinzena) nas estações seca e úmida.
Fonte: Autores (2025).

Tabela 1 – Concentração de cátions, pH e Eh no alto córrego São Bartolomeu.

Estação	Período (quinzenal)	pH	Eh	Al	Fe	Na	Ca	K	Mg	As	Ba	Mn	Mo	Li	Si	Sr	Zn	Σ
		m/V			mg/L													
Seca	Abril I ¹	6,32	279	0,0136	0,0606	0,5510	0,6150	0,2427	1,064	0,028	0,0050	0,0258	0,0058	0,0004	2,200	0,0026	0,0017	4,8372
	Abril II ¹	6,83	216	0,0031	0,0249	0,5850	0,6420	0,2453	1,133	0,028	0,0053	0,0130	0,0058	0,0004	2,200	0,0028	0,0017	4,9436
	Maio I	6,92	165	0,0031	0,0187	0,5770	0,6080	0,2495	1,153	0,028	0,0050	0,0042	0,0058	0,0004	2,200	0,0027	0,0017	4,8940
	Maio II	7,80	140	0,0031	0,0190	0,5810	0,6150	0,2548	1,156	0,028	0,0048	0,0025	0,0058	0,0004	2,200	0,0026	0,0017	4,9422
	Junho I	7,45	80	0,0031	0,0155	0,5780	0,6410	0,2401	1,182	0,028	0,0049	0,0023	0,0058	0,0004	2,200	0,0027	0,0017	4,9442
	Junho II	7,85	68	0,0031	0,0206	0,5760	0,6720	0,2813	1,206	0,028	0,0050	0,0025	0,0058	0,0004	2,200	0,0028	0,0017	5,0660
	Julho I	6,93	157	0,0031	0,0135	0,6480	0,8660	0,4752	1,246	0,075	0,0058	0,0037	0,0058	0,0004	2,200	0,0028	0,0017	5,6079
	Julho II	7,75	167	0,0031	0,0203	0,5560	0,6690	0,2400	1,117	0,028	0,0046	0,0024	0,0058	0,0004	2,201	0,0026	0,0017	4,8129
	Agosto I	7,51	164	0,0031	0,0234	0,5630	0,6800	0,2484	1,133	0,028	0,0048	0,0021	0,0058	0,0004	2,193	0,0027	0,0017	4,8503
	Agosto II	6,42	221	0,0031	0,0262	0,8160	0,7340	0,4061	1,132	0,028	0,0047	0,0036	0,0058	0,0004	2,196	0,0028	0,0040	5,3253
	Setembro I	6,56	216	0,0031	0,0202	0,5810	0,7410	0,2607	1,152	0,028	0,0047	0,0025	0,0058	0,0004	2,210	0,0028	0,0017	4,9748
	Setembro II	6,53	211	0,0031	0,0187	0,5600	0,7220	0,2654	1,137	0,028	0,0045	0,0016	0,0118	0,0004	2,216	0,0027	0,0017	4,9398
Úmida	Outubro I	6,65	243	0,0031	0,0259	0,5700	0,7490	0,2968	1,185	0,028	0,0049	0,0024	0,0058	0,0004	2,259	0,0029	0,0017	5,0958
	Outubro II	6,53	193	0,0120	0,0335	0,5880	0,9880	0,3038	1,140	0,058	0,0048	0,0034	0,0058	0,0004	2,216	0,0030	0,0096	5,3607
	Novembro I	6,65	198	0,0031	0,0177	0,5720	0,8030	0,2545	1,182	0,028	0,0045	0,0025	0,0058	0,0004	2,193	0,0029	0,0017	5,0320
	Novembro II	7,10	209	0,0031	0,0256	0,5480	0,7780	0,3369	1,030	0,028	0,0043	0,0043	0,0058	0,0004	2,007	0,0026	0,0017	4,7367
	Dez I	6,36	211	0,0031	0,0307	0,5290	0,7160	0,2467	0,973	0,028	0,0045	0,0047	0,0058	0,0004	1,863	0,0025	0,0057	4,3757
	Dez ² II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Janeiro I	7,25	96	0,0092	0,0382	0,4835	0,7580	0,1838	0,808	0,028	0,0051	0,0047	0,0058	0,0004	1,644	0,0022	0,0195	3,9562
	Janeiro II	6,78	111	0,0124	0,0386	0,5960	0,9200	0,3478	0,920	0,028	0,0048	0,0042	0,0058	0,0009	1,821	0,0027	0,0170	4,8404
	Fevereiro I	6,89	131	0,0031	0,0412	0,3384	0,9000	0,3255	0,994	0,028	0,0063	0,0112	0,0058	0,0008	2,000	0,0023	0,0017	4,7971
	Fevereiro II	6,73	-	0,0031	0,0255	0,4927	0,8900	0,2426	1,079	0,028	0,0054	0,0030	0,0058	0,0009	2,000	0,0027	0,0017	4,8850
	Março I	6,56	231	0,0031	0,0354	0,4291	1,1670	0,4026	1,208	0,028	0,0055	0,0084	0,0058	0,0010	2,000	0,0030	0,0151	5,4914
	Março II	7,13	187	0,0031	0,0381	0,4356	0,9980	0,4173	1,211	0,028	0,0054	0,0076	0,0058	0,0011	2,000	0,0027	0,0017	5,2617

¹ I e II: primeira e segunda quinzena; ²Coleta não realizada.

Fonte: Autores (2025).

Tabela 2 – Vazões e taxas totais de denudação química.

Estação	Quinzena	Vazão (m ³ /s)	Denudação (ton/km ² /quinzenal)
Seca	Abril I	23.601,952	0,1369
	Abril II	21.692,409	0,1286
	Maio I	21.664,939	0,1272
	Maio II	21.882,341	0,1297
	Junho I	36.122,357	0,2143
	Junho II	20.582,520	0,1251
	Julho I	19.469,024	0,1302
	Julho II	20.497,343	0,1190
	Agosto I	19.332,751	0,1131
	Agosto II	19.692,674	0,1263
	Setembro I	16.945,627	0,1016
	Setembro II	22.606,060	0,1345
Úmida	Outubro I	22.574,866	0,1369
	Outubro II	25.916,020	0,1653
	Novembro I	24.883,400	0,1490
	Novembro II	50.851,245	0,2867
	Dezembro I	49.227,233	0,2566
	Dezembro II ²	35.178,830	-
	Janeiro I	89.885,513	0,4233
	Janeiro II	45.455,827	0,2619
	Fevereiro I	28.262,316	0,0941
	Fevereiro II	21.141,893	0,0726
	Março I	25.449,635	0,1057
	Março II	25.330,657	0,0983

¹ I e II: primeira e segunda quinzena; ²Coleta não realizada.

Fonte: Autores (2025).

5. Discussões

Os solos da região Sudeste brasileira caracterizam-se pela intensa atuação do intemperismo químico e biológico, envolvendo dissolução incongruente de minerais primários em secundários, pH ligeiramente ácido e baixa concentração de metais alcalinos e alcalino-terrosos (DUNNE, 1978; EVANGELOU, 1998; KAMPF et al. 2009).

A elevada concentração de Si em solução sugere sua solubilização (Tabela 1). Sob condições de intemperismo profundo, silicatos do tipo 1:1 são dissolvidos e o Si é lixiviado (PEDRO & MELFI, 1977). A dessilicação, por sua vez favorece o aumento relativo dos teores de Al e Fe no regolito. As baixas concentrações de Al e Fe em solução indicam que esses elementos permanecem majoritariamente retidos no regolito, possivelmente sob a forma de (hidr)óxidos, sobretudo em pH acima de 5,6 (Tabela 1) e condições oxidantes (THOMAS, 1994). A presença de gibbsita (Al(OH)₃) nos solos da área junto à caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄), detectada em todos os perfis, sugere um estágio de transição entre os processos de monossilicificação e alitização (COSTA et al. 2014). Em geral, feldspatos e micas presentes no material parental controlam a concentração de Si (na forma de sílica) em estágios iniciais de intemperismo. A hidrólise parcial de minerais silicatados primários em ambientes úmidos e bem drenados favorece a presença de argilas 1:1 em solos, tais como as caulinitas. Este argilomineral foi detectado em todos os perfis (P1 a P5) da topossequência descritos por Costa et al. (2014). A persistência da caulinita nos solos da área de estudo pode ser atribuída a: incorporação de material coluvial recém-exposto (ESPINDOLA, 2013).

Movimentos de massa são frequentes no Sudeste brasileiro em função do relevo declivoso e desflorestamento nos últimos 250 anos. Consequentemente, solos desenvolvidos nas encostas, terraços e planícies recebem material erodido a

montante (VIEIRA *et al.* 2025); e/ou ciclagem biogeoquímica (FAURE, 1991; JOBBÁGY & JACKSON, 2004; FONTES, 2012). Fitólitos produzidos ao longo de toda a vida da maioria das plantas são incorporados ao solo após a morte do vegetal. Após incorporação, os fitólitos são parcialmente ou completamente decompostos, repondo silício no solo (BENVENUTO *et al.* 2025). Animais, como as térmitas, também ciclam Si no solo através da bioturbação. A seleção e mistura de partículas de argila dos horizontes mais profundos na superfície garante a reposição de Si (JOUQUET *et al.* 2020).

A concentração de metais alcalinos e alcalinos terrosos como o Ca, Mg, K e Na é mantida pelo intemperismo de feldspatos, quando presentes e em estágios avançados de intemperismo pela fraca adsorção em argilas silicatadas ou complexadas à compostos orgânicos do solo (KABATA-PENDIAS, 2011; ALLOWAY, 2013). O processo de intemperismo conduz à destruição de minerais que contêm bases, como o Na, e a lixiviação desse cátion reduz seu teor médio em rochas frescas de 1,30 % em peso para apenas 0,02 % em peso em regolitos totalmente intemperizados (FAURE, 1991).

Solos de grau incipiente de desenvolvimento, como no caso dos Cambissolos, possuem composição química estritamente associada ao material parental (BURAK *et al.* 2010; SOUZA *et al.* 2015) e na área de estudo, tais classes são derivadas do intemperismo principalmente dos xistos, rocha cujo conteúdo de plagioclásio é baixo (PEDROSA-SOARES *et al.* 1994; DARDENNE & SCHOBENHAUS, 2001). Reforçando esta constatação, análises químicas realizadas por Varajão *et al.* (2009), em amostras de rocha não alterada do xisto do Grupo Nova Lima (Unidade Córrego da Paina), unidade correlata à Catarina Mendes, evidenciaram teores mais baixos de cálcio, sódio e potássio e concentrações elevadas de silício, ferro, alumínio, manganês e magnésio. Logo, os solos desenvolvidos sobre esses materiais apresentam distrofia herdada do material parental, conforme foi apontado inicialmente por Costa *et al.* (2014), em análises químicas de rotina. Nesse contexto, Varajão *et al.* (2009) observaram associação entre a concentração de certos elementos nos perfis de alteração com suas concentrações nas águas no QFe. De maneira geral os autores verificaram um enriquecimento dos elementos Fe, Al e Mn e um empobrecimento em K ao longo dos perfis de alteração.

Em concordância com o que foi observado nos perfis de alteração por Costa (2018), o Fe, Al e o Mn apresentaram baixas concentrações nas águas. Já a distribuição dos elementos Na, Ca e Mg nos perfis é irregular, não existindo uma tendência linear, o que refletiria as variações mineralógicas nos litotipos e a baixa maturidade dos solos. Os teores desses elementos apresentam elevadas concentrações nas águas, atestando sua alta mobilidade, fato que corrobora as tendências também observadas nesta pesquisa (Tabela 1).

A taxa de denudação geoquímica apresentou algumas variações substanciais em algumas quinzenas do período úmido e seco (Tabela 2). Por exemplo, a taxa de denudação em janeiro foi significativamente maior (0,4233 e 0,2619 ton/km²/quinzenal) do que a de fevereiro (0,0941 e 0,0726 ton/km²/quinzenal), ambos na estação úmida. Portanto, deve-se calcular a denudação anual com base em amostragens mais frequentes. Com relação aos estudos das taxas de denudação química, a pesquisa desenvolvida por Barreto *et al.* (2012) em substratos rochosos similares (quartzito e xisto) na bacia do Rio São Francisco (Serra do Espinhaço), área localizada a norte da área deste estudo, revelaram um valor médio de denudação de 3,10 ton/km²/ano (bacia São Francisco 7- SF7), menor do que o desta pesquisa, que é de 7,27 ton/km²/ano (Tabela 2). Uma vez que ambas as áreas se encontram sob regime climático similar, tal diferença pode ser explicada pelo fato da microbacia deste estudo estar localizada em uma zona de cabeceira, logo, de maior energia erosiva.

Já em estudos desenvolvidos por Salgado *et al.* (2004), em bacias cujos litotipos pertencem ao Supergrupo Rio das Velhas e ao Supergrupo Minas (Bacias Córrego da Esperança e Cata Branca), foram constatadas taxas de rebaixamento do relevo que variam entre 3,69 e 3,91 m/Ma em regiões do QFe classificadas como terras altas e médias por Harder & Chamberlin (1915). Considerando as semelhanças litológicas, geomorfológicas, climáticas e pedológicas entre tais regiões, permite-se fazer uma comparação com o resultado aqui obtido de 2,84 m/Ma. Portanto, tais dados estão em consonância com os valores médios gerais de rebaixamento do relevo para as litologias mais resistentes e medianamente resistentes ($\approx$ 1,3-8 m/Ma) postulados por Salgado *et al.* (2004).

Ferrier & Kirchner (2008) sugeriram que a taxa de denudação química apresenta relação linear com a taxa de erosão física até certo ponto, devido à constante exposição de rocha fresca na superfície, a partir da qual a taxa de denudação química diminui. Os autores também sugerem que eventos periódicos de erosão, intercalados por estabilidade e formação de solo, garantem taxas baixas de denudação química, mas acima de zero, como foi verificado neste estudo em que a taxa de denudação geoquímica apresentou um valor total de 7,27 ton/km²/ano. Esse cenário poderia favorecer o aprofundamento do manto de alteração, embora com características de um solo distrófico, pouco evoluído macromorfológicamente (COSTA *et al.* 2014) e micromorfológicamente (COSTA *et al.* 2013), como verificado em Cambissolos.

6. Considerações finais

Buscando compreender as relações entre a pedogênese e a morfogênese em zona escarpada no alto córrego São Bartolomeu, tributário do alto Rio das Velhas, foram determinadas as taxas de denudação química, constatando-se um valor de 7,27 ton/km²/ano e de 2,58 m/Ma para a taxa de rebaixamento vertical do relevo. Tal taxa se assemelha aos resultados de outros estudos na região Sudeste do Brasil, em que a litologia e as condições climáticas são similares.

Os resultados revelaram ainda que a taxa de denudação química durante o período úmido é superior em 0,714 ton/km²/ano em comparação à taxa do período seco. Como estas taxas de denudação podem variar significativamente ao longo das estações, recomenda-se uma frequência de amostragem elevada para obter taxas anuais mais reais. Verificou-se também uma baixa concentração de metais e metalóides em águas superficiais, atribuída à pobreza química do material de origem dos solos e ao profundo intemperismo do manto de alteração.

Os dados hidroquímicos revelaram também uma maior solubilidade de Si e bases em comparação com Al, Fe e Mn, confirmando o processo de dessilicização na área estudada, resultados que corroboram as interpretações geoquímicas realizadas anteriormente em cursos d'água no alto rio das Velhas e que atestam que as águas fluviais são capazes de marcar a assinatura geoquímica dos litotipos que drenam e até mesmo dos solos que elas drenam.

Esse conjunto de evidências confirma a influência direta dos processos erosivos diferenciais, aqui abordados sob uma perspectiva geoquímica, e da taxa de rebaixamento vertical do relevo sobre a pedogênese local. A entrada ou saída de matéria no sistema interfere diretamente na incompletude dos processos pedogenéticos que caracterizam as coberturas de vertentes em áreas escarpadas. Nessas condições, os solos mantêm-se quimicamente pobres e pedogeneticamente imaturos (distróficos).

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa (Projetos CRA PPM0271-10 e APQ-01613-22), ao Instituto Estadual de Florestas (IEF), à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte institucional e técnico prestado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- ANDERSON, S. P.; DIETRICH, W.E.; BRIMHALL JR.G.H. Weathering profiles, mass-balance analysis, and rates of solute loss: Linkages between weathering and erosion in a small, steep catchment. **GSA Bulletin**. v.114 (9), 1143-1158, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2002\)114<1143:WPMBAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<1143:WPMBAA>2.0.CO;2).
- ALKMIM, F.F., MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidences for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**. 90, 29-58, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00032-1).
- ALLOWAY, B. J. **Heavy Metals in Soils - Trace metals and metalloids in soils and their Bioavailability**. Third ed. [s.l.] Springer-Verlag GmbH & Company KG, 2013.
- ARUN, K. et al. Chemical denudation in a small mountainous coastal river in the tropics: Insights from Kali River, Southwestern India. **Applied Geochemistry**, v. 137. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105198>.
- BACELLAR, L.A.P. **Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do rio Macacujá, Ouro Preto, MG**. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brazil. 2000.
- BACELLAR, L.A.P., COELHO NETTO, A.L., LACERDA, W.A. Controlling factors of gullying in the Maracujá Catchment, Southeastern Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms**. 30, 1369-1385, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1193>.
- BALOGH-BRUNSTAD, Z. et al. Chemical weathering and chemical denudation dynamics through ecosystem development and disturbance. **Global Biogeochemical Cycles**. v. 22. GB 1007, 2008. DOI:10.1029/2007GB002957.

- BARROS, L.F.P. et al. Paleobiogeoclimatic scenarios of the late Quaternary inferred from fluvial deposits of the Quadrilátero Ferrífero (Southeastern Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**. 67, 71-88, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.02.004>.
- BARRETO, H. N. et al. Estudo das taxas de denudação química da Serra do Espinhaço Meridional (MG), com base na carga catiônica dissolvida. **Geociências**. (São Paulo. Online), v.31, p. 534-552, 2012.
- BENVENUTO, M.L.; RITO, M.; OSTERRIETH, L.; HONAINÉ, M.F. Analysis of phytolith inputs from natural plant communities and crops and soil silicon availability (Southeastern Papean region, Argentina). **Flora**, v. 322, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2024.152640>.
- BERTOLINI, W.Z. **A alta bacia do rio Piranga (MG): estudo geomorfológico a propósito da condição de equilíbrio do relevo**. 207f. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. 2015.
- BEZERRA, D.P. **Quadrilátero Ferrífero: Fatores Condicionantes de Relevô**. *Dissertação* (mestrado em Geografia). 148f. Programa de pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.
- BÜDEL, J. **Climatic Geomorphology**. Princeton: Princeton Univ. Press. 1982.
- BURAK, D.L. et al. Geochemistry and spatial distribution of heavy metals in Oxisols in a mineralized region of the Brazilian Central Plateau. **Geoderma**, v. 160, n. 2, 131-142, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.007>.
- CARSON, M.A., KIRKBY, M.J. **Hillslope form and process**. Cambridge, University Press, 1972. 475p.
- CASTRO, J.M.G. **Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil, 2006.
- COSTA, F.O. et al. **Morphological, micromorphological and analytical properties in a toposequence with haplic cambisols in the Nova Lima Group - Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais state, Brazil**. 8th IAG International Conference on Geomorphology. Paris, Anais...France. 2013.
- COSTA, F.O. et al. Morfopedogênese de zona escarpada na alta bacia Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG: Análise integrada de dados físicos, químicos e mineralógicos. **Revista de Geociências**. 33, 403-415, 2014.
- COSTA, F.O. **Evolução morfopedológica de uma topossequência de Cambissolos, alta bacia do rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 149f. Tese (Geologia-Ciências Naturais). Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- CHEREM, L.F. et al. Long-Term evolution of denudacional escarpments in southeastern Brazil. **Geomorphology**. 173, 118-127, 2012. DOI:10.1016/j.geomorph.2012.06.002.
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. **Metalogênese do Brasil**. Brasília: Editora UnB, 2001.
- DUNNE, T. Rates of chemical denudation of silicate rocks in tropical catchments. **Nature**, 274 (5668): 244-246, 1978. DOI: <https://doi.org/10.1038/274244a0>.
- ENDO I.; et al. **Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. *Escala 1:150.000*. Ouro Preto, Departamentode Geologia, Escola de Minas – UFOP -Centro de Estudos Avançados do QuadriláteroFerrífero, 2019. Disponível em: www.qfe2050.ufop.br.
- EPA. Stream Flow. In: EPA (ed.) **Volunteer Stream Monitoring: a methods manual**. Washington: EPA. p.134-138, 1997.
- ESPINDOLA, C.R. **Gênese e evolução das formações superficiais nos trópicos**. 1ª Ed. São Paulo: Editora Beca. 2013. 364 p.

-
- EVANGELOU, V.P. **Enviromental soil and water chemistry: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1998. 557p.
- FAURE, G. **Principles and applications of inorganic geochemistry**. New York: Macmillan Publishing Company, 1991.
- FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J; FEITOSA, E.C. DEMETRIO, J.C. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3ª ed. CPRM - Serviço Geológico Brasileiro. 2008. 811p.
- FERRIER, K.L.; KIRCHNER, J.W. Effetes of physical erosion on chemical denudation rates: A numerical modeling study of soil-mantled hillslopes. **Earth and Planetary Science Letters**. 272, 591-599, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.05.024>.
- FIGUEIREDO, M.A. et al. Alteração superficial e pedogeomorfologia no sul do Complexo Bação-Quadrilátero Ferrífero (MG). *Revista Brasileira de Ciência dos Solos*. 28, 713-729, 2004.
- FONTES, M. P. F. Intemperismo de rochas e minerais. *In*: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (Eds.). **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa: SBCS. 171–205, 2012.
- GARCEZ, L.N.; ALVAREZ, G.A. **Hidrologia**. 2ª ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo. 1988. 289 p.
- GREENBERG, A. E; CLESCERI, LENORE S; EATON, ANDREW D. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, D.C.:American Public Health Association, 1992. 1056p. <https://archive.org/details/standardmethods0018amer>.
- HARDER, E.C.; CHAMBERLIN, R.T. The Geology of Central Minas Gerais, Brazil. **Journal of Geology**. 23, 340-384, 1915 a.
- HARDER, E.C.; CHAMBERLIN, R.T. The Geology of Central Minas Gerais, Brazil. **Journal of Geology**. 23, 385-424, 1915 b.
- INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS- IEF; Universidade Federal de Viçosa-UFV. Zoneamento ecológico da área de proteção ambiental estadual Cachoeira da Andorinhas, Ouro Preto, Minas Gerais. **Relatório do Meio Físico**. Viçosa, UFV. 2005.94p.
- JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The uplift of soil nutrients by Plants. **Ecology**, v. 85, n. 9, 2380–2389, 2004.
- JOUQUET, P. et al. J.D. The distribution of silicon in soil is influenced by termite bioturbation in South Indian forest soils. **Geoderma**, v. 372, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114362>.
- KABATA-PENDIAS, A. **Trace Elements in Soils and Plants**. Fourth ed. [s.l.] Taylor & Francis. 2011.
- LEEDER, M.R. Denudation, vertical crustal movements and sedimentary basin infill. **Geologische Rundschau**, 80 (2): 441-458, 1991.
- LIPSKI, I. L. **Tectonismo Cenozóico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. 2002.
- MARTINS, R. M. **Denudação geoquímica em sistemas fluviais de cabeceira de drenagem da borda sul do Quadrilátero Ferrífero – MG**. 165 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.
- NIST. National Institute of Standards & Technology. Certificate of Analysis. **Standard Reference Material 1643e**. Trace Elements in Water, 2009.
- PEDROSA-SOARES, A. C. et al. A. **Nota explicativa dos mapas geológico, metalogenético e de ocorrências minerais do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: [s.n.]. 1994.

PINET, P.; SOURIAU, M. Continental erosion and large-scale relief. **Tectonics**, v. 7, n. 3, 563-582, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1029/TC007i003p00563>.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 2ª ed. São Paulo: EESC USP. 2006. 519 p.

RANTZ, S.E. **Measurement and Computation of Streamflow**. 1ª ed. Washington. Measurement of Stage and Discharge. Geological Survey Water-Supply. paper 2175. Washington, 1982.

SALGADO, A. A. R. et al. O papel da Denudação Geoquímica no processo de erosão diferencial no Quadrilátero Ferrífero/MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 5, n. 1, 55-69, 2004. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v5i1.32>.

SALGADO, A. A. R. et al. Estimativa das taxas de erosão das terras altas da alta bacia do Rio das Velhas no Quadrilátero Ferrífero: implicações para a evolução do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 2, 1-8, 2007. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v8i2.89>.

SOUCH, C. Chemical denudation. In: Goudie, A. S. (Ed): **Encyclopedia of Geomorphology**. London: Routledge, v.1, 144-148, 2004.

SOUZA, J. J. L. L. et al. Geochemistry and spatial variability of metal(loid) concentrations in soils of the state of Minas Gerais, Brazil. **The Science of the Total Environment**, v. 505, 338-49, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.098>.

STRAHLER, A.N. **Quantitative analysis of watershed Geomorphology**. America Geoph. Union Trans. v. 38, p. 913-920, 1957.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. Cambridge University Press, 2nd Ed., Cambridge, 1990.

TRICART, J.; CAILLEUX, A. **Introduction to climatic Geomorphology**. Longmans, Londres. 1972. 295p.

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

VARAJÃO, C. A. C. et al. Estudo da Paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (¹⁰Be) e da pedogênese. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 33, 1409-1425, 2009. DOI: 10.1590/s0100-06832009000500032.

VIEIRA, A.A. et al. Genesis, paleoenvironmental history and landscape interplays of Holocene buried soils in Minas Gerais, Southeastern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 41, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00967>.