

## Geoquímica fluvial e balanço de denudação em Tinguaitos de Poços de Caldas, Minas Gerais

*River geochemistry and denudation balance in Tinguaites of the Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil*

Diego de Souza Sardinha<sup>1</sup>, Letícia Hirata Godoy<sup>2</sup>, Fabiano Tomazini da Conceição<sup>2</sup>, Eder Paulo Spatti Júnior<sup>2</sup>, Alexandre Martins Fernandes<sup>3</sup>, Fernando André de Castro Alves Victal<sup>4</sup>, Danilo Augusto Toledo Costa<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL, Rodovia José Aurélio Vilela, 11.999 (BR-267, km 533), CEP 37715-400, Cidade Universitária, Poços de Caldas, MG, BR (diego.sardinha@unifal-mg.edu.br)  
<sup>2</sup>Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Rio Claro, SP, BR (leticiahirata@gmail.com; ftomazini@rc.unesp.br; ederspatti@hotmail.com)

<sup>3</sup>Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Bauru, SP, BR (alefernandes1966@yahoo.com.br)

<sup>4</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL, Poços de Caldas, MG, BR (victalfca@gmail.com; danilo\_cibio@hotmail.com)

Recebido em 20 de fevereiro de 2017; aceito em 22 de fevereiro de 2018

### Resumo

A Bacia do Córrego da Ariranha, Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas, é formada por rochas alcalinas tinguaítos (fonólitos intrusivos). Como não há estudos associados à evolução do relevo em regiões com esse tipo de rocha, o presente trabalho visou à avaliação do balanço de denudação nessa bacia hidrográfica. Para isso, foram realizadas coletas e avaliados os seguintes parâmetros durante um ano hidrológico: vazão (m<sup>3</sup>/s), precipitação (mm), pH, condutividade elétrica (μS/cm), oxigênio dissolvido (mg/L), sólidos totais dissolvidos (STD) e em suspensão (STS) (mg/L). A média para vazão e temperatura foi de 0,12 m<sup>3</sup>/s e 20,80°C, respectivamente. Os valores de pH situaram-se próximos à neutralidade (6,4), a condutividade elétrica variou entre 30 e 78 μS/cm e as concentrações de oxigênio dissolvido, entre 5,4 e 7,9 mg/L. Um total de 15,5 t/km<sup>2</sup>/ano de material dissolvido foi transportado pelas águas superficiais e um aporte atmosférico de 6,0 t/km<sup>2</sup>/ano, obtendo-se um fluxo anual de material removido pela alteração química das rochas alcalinas tinguaítos de 9,5 t/km<sup>2</sup>/ano com uma taxa de alteração de 3,6 m/Ma. Quanto ao material suspenso, aproximadamente 9,9 t/km<sup>2</sup>/ano foram transportadas pelas drenagens, com um aporte pluvial de 1,2 t/km<sup>2</sup>/ano. Isso indica um fluxo anual de material removido associado à denudação dos solos da bacia de 8,7 t/km<sup>2</sup>/ano ou aproximadamente 200 mil anos para alterar 1 metro de solo nas condições climáticas atuais.

**Palavras-chave:** Denudação geoquímica; Evolução do relevo; Rochas alcalinas.

### Abstract

The Ariranha Stream basin, Poços de Caldas Volcanic Caldera, Brazil, is formed by tinguaites alkaline rocks (intrusive phonolites). There are not studies on relief evolution in regions with this type of rock, so the present work aimed to evaluate the denudate balance in this hydrographic basin. For this purpose, the following parameters were collected and evaluated during one hydrological year: flow rate (m<sup>3</sup>/s), precipitation (mm), pH, electrical conductivity (μS/cm), dissolved oxygen (mg/L), total dissolved and suspended solids (mg/L). Flow rate and temperature averages were 0.12 m<sup>3</sup>/s and 20.80°C, respectively. The pH values were close to neutrality (6.4); the electrical conductivity varied from 30 to 78 μS/cm; and the dissolved oxygen concentrations from 5.4 to 7.9 mg/L. The total of 15.5 t/km<sup>2</sup>/year of dissolved material were transported by surface waters, and the atmospheric input was of 6.0 t/km<sup>2</sup>/year, obtaining an annual removed material by the tinguaites alkaline rocks chemical alteration of 9.5 t/km<sup>2</sup>/year with weathering rate of 3.6 m/Myr. Regarding the suspended material, approximately 9.9 t/km<sup>2</sup>/year were transported by drainage, with an atmospheric input of 1.2 t/km<sup>2</sup>/year. It indicates annual flow of 8.7 t/km<sup>2</sup> of removed material associated with the basin soils denudation, or approximately 200 thousand years to change 1 soil meter in the current climatic conditions.

**Keywords:** Geochemical denudation; Relief evolution; Alkaline rocks.

## INTRODUÇÃO

O intemperismo químico das rochas e a erosão mecânica dos solos são processos importantes no sistema Terra, alterando os materiais rochosos e modelando a superfície terrestre. Assim, a determinação do balanço de denudação, o qual consiste na diferença entre as velocidades de alteração das rochas (intemperismo químico) e a remoção dos solos (erosão mecânica), é de grande interesse na evolução geológica e geomorfológica dos continentes. Pequenas bacias hidrográficas são importantes regiões para se estabelecer o estudo do balanço de denudação para litologias específicas, diferente de grandes bacias hidrográficas, que são geralmente compostas por uma grande variedade litológica (Berner e Berner, 1996).

O intemperismo químico ocorre quando o equilíbrio do conjunto de átomos que constituem os minerais é rompido e ocorrem reações químicas que conduzem o mineral a um arranjo mais estável, transformando os minerais primários da rocha original em minerais secundários, que passam a constituir um complexo de alteração (Salomão e Antunes, 1998). O intemperismo químico está relacionado ao transporte de materiais dissolvidos pelos rios, tendendo a um aprofundamento do perfil de alteração do solo (Mortatti e Probst, 2003). A erosão mecânica age principalmente na superfície, nivelando o relevo continental e transportando a matéria solúvel e em suspensão por meio dos rios para o oceano (Tardy, 1971). Na base do perfil, os minerais mais resistentes das rochas são alterados pelo ataque químico, transformação que é efetuada geralmente sem mudança de volume e conservação da estrutura da rocha; na parte superficial, a estrutura se destrói principalmente pelo ataque de agentes biológicos, uma parte é removida e o produto residual consiste no solo propriamente dito (Probst, 1986).

O interesse na avaliação das taxas de intemperismo e de erosão de solos em bacias hidrográficas ocorre desde os trabalhos propostos por Gibbs (1967), Johnson et al. (1968) e Tardy (1968, 1969, 1971), sendo amplamente difundidos no final da década de 1980, principalmente pela importância no planejamento e no manejo de bacias hidrográficas (Probst e Tardy, 1987; Nkounkou e Probst, 1987; Probst et al., 1992; Amiotte-Suchet e Probst, 1993; Clow e Drever, 1996; Millot et al., 2002, 2003; Tardy et al., 2004; Price et al., 2008; Wang et al., 2016). No Brasil, desde os trabalhos de Moreira-Nordemann (1980, 1984), as pesquisas relacionadas à avaliação das taxas de intemperismo das rochas ajudam a entender o processo água-rocha/solo em diferentes áreas de estudo (Tardy et al., 1993a, 1993b; Mortatti et al., 1997; Bortoletto Júnior et al., 2002; Mortatti et al., 2003; Salgado e Valadão, 2003; Conceição e Bonotto, 2004; Conceição et al., 2007; Mortatti et al., 2008; Sardinha et al., 2010; Conceição et al., 2015; Fernandes et al., 2016).

Todos os estudos relacionados anteriormente são associados aos basaltos, granitos, xistos e gnaisses. Recentemente, estudos envolvendo o balanço de denudação de rochas sedimentares siliciclásticas da Bacia Sedimentar do Paraná foram efetuados por Spatti Júnior et al. (2014) e Couto Júnior et al. (2016). Contudo, ainda não existem estudos do balanço de denudação de rochas alcalinas no Brasil, com exceção do realizado por Bonotto et al. (2007), o qual somente avaliou as taxas de intemperismo químico das rochas descritas no depósito de Th e elementos terras raras (ETR) do Morro do Ferro. Associações de rochas alcalinas, como as encontradas na Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas — constituída principalmente por fonólitos intrusivos, nefelina sienitos, seguidos de lavas fonolíticas, rochas piroclásticas, chibinitos e lujauritos —, não são abundantes no Brasil. Entre essas rochas, os tinguaitos (fonólitos intrusivos) destacam-se por formarem o dique anelar, que ocorre quase continuamente ao longo de todo esse complexo alcalino.

Assim, a Bacia do Córrego Ariranha torna-se uma área de estudo ideal para se estimar o balanço de denudação em regiões com rochas alcalinas, pois é composta por tinguaitos e não é afetada por esgotos domésticos ou industriais, sendo somente necessária a correção dos aportes atmosféricos no fluxo anual de sólidos totais dissolvidos e de sólidos totais em suspensão transportados anualmente. Para isso, utilizou-se da geoquímica fluvial como fonte de dados para os modelos de balanço de massa propostos para avaliar o balanço de denudação. Finalmente, os resultados deste estudo proporcionam novos conhecimentos em relação ao balanço de denudação em áreas com rochas alcalinas, os quais podem ser usados para complementar o conhecimento em relação aos processos de interação água-rocha/solo em bacias hidrográficas sobre diferentes condições climáticas em futuros estudos.

## Características da área de estudo

A Bacia do Córrego da Ariranha possui uma área de aproximadamente 6,3 km<sup>2</sup> e situa-se entre os paralelos 21°47'55" e 21°49'07" S e meridianos 46°38'27" e 46°40'17" W, na região noroeste da Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas, Minas Gerais (Figura 1). Segundo Zalan e Oliveira (2005), a evolução da região da Caldeira Vulcânica está relacionada ao soerguimento epirogenético no embasamento Pré-Cambriano da Região Sudeste, em reposta à possível passagem da Placa Sul-Americana de leste para oeste sobre uma anomalia térmica. Essa anomalia iniciou-se em aproximadamente 89 Ma, acarretando em domeamento da região, abatimento do conduto vulcânico e estruturação da caldeira até cerca de 54 Ma (Ulbrich e Ulbrich, 2000).

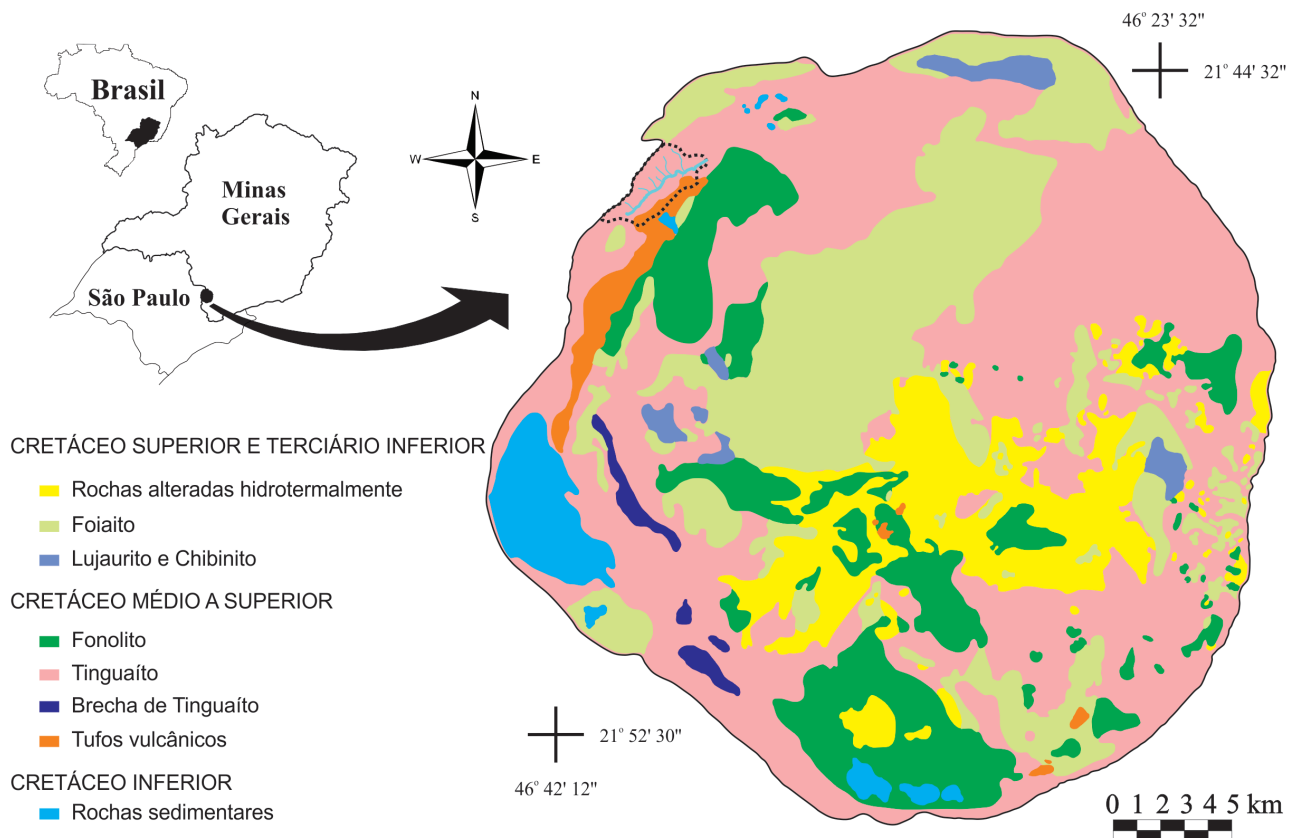
Segundo Franco et al. (2005), a evolução da Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas partiu de uma etapa de domeamento, causado por uma intumescência térmica, em cerca

de 89,3 Ma, com a intrusão de rochas básicas/ultrabásicas, seguida de derrames de magmas alcalinos, até cerca de 65,0 Ma. A partir de 60 Ma houve uma tendência ao resfriamento lento e gradual, indicativo de intensos ciclos de soerguimento/erosão até aproximadamente 50 Ma, quando ocorre um pequeno aquecimento, de até ~5 Ma (Doranti-Tiritan et al., 2014). A Caldeira Vulcânica, com uma área de aproximadamente 800 km<sup>2</sup>, é formada por fonólitos intrusivos e nefelina sienitos, seguidos de lavas fonolíticas e rochas piroclásticas, que incluem tufos, aglomerados e brechas (Figura 1).

Na Bacia do Córrego da Ariranha afloram tinguaitos e tufos vulcânicos (Figura 2). Os tinguaitos (fonólitos hipohabissais) correspondem à maior parte das rochas expostas no Complexo Alcalino de Poços de Caldas (Figura 1), ocorrendo na maioria dos afloramentos da Bacia do Córrego Ariranha com coloração acinzentada, sendo observáveis amígdalas e vênulas em algumas amostras. São rochas equigranulares, porfiríticas, mais grossas do que os fonólitos vulcânicos. Os tufos vulcânicos e/ou brechas de tinguaito apresentam feições associadas a vulcanismos com lançamentos de

cinzas vulcânicas. Na bacia é possível observar brechas caóticas maciças, com fragmentos angulosos e acessórios de tamanhos extremamente variados rodeados concentricamente por material muito fino de coloração cinza.

A região da Caldeira Vulcânica situa-se na província geomorfológica denominada Planalto Sul de Minas, que é subdividido em três unidades: Superfície do Alto Rio Grande, Planalto de São Pedro de Caldas e Planalto de Poços de Caldas (CPRM, 1979). Na estrutura circular da caldeira há montanhas com topos restritos e domínio de tálus nas encostas. Morros e morrotes de topos arredondados e colinas, planícies aluviais e rampas de colúvio nas proximidades de rios ocorrem na área interna do maciço alcalino. Na bacia ocorrem latossolos profundos, com pouca diferenciação entre horizontes e em relevos levemente ondulados e suavizados. Solos rasos, cambissolos com sequência de horizontes A, Bi e C ocorrem em relevos mais acidentados no dique anelar, região noroeste onde se localizam as principais nascentes da bacia. Solos indiferenciados de várzea ocorrem em relevos planos, pouco profundos, com características associadas com encharcamento e/ou deposição



Fonte: adaptado de Ellert (1959); Ulbrich (1984); INB (2011).

**Figura 1.** Mapa de localização da Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas, Minas Gerais, com destaque para a Bacia do Córrego da Ariranha.

de material orgânico e arenoso. Solos de brecha vulcânica, com pedogênese controlada pelo material de origem, com coloração cinza-escuro ocorrem na região leste da Bacia do Córrego Ariranha.

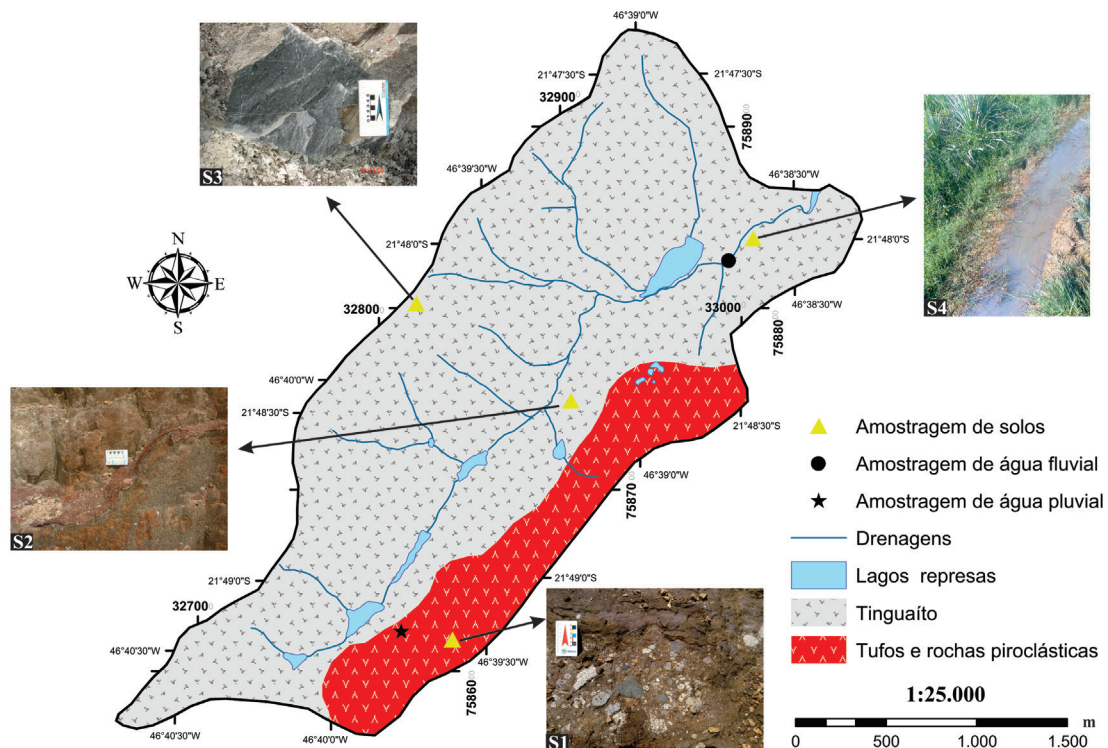
A região da Caldeira Vulcânica possui uma cobertura vegetal caracterizada por contatos transicionais da floresta estacional semidecidual à floresta ombrófila mista, com a ocorrência de cerrado gramíneo lenhoso e, em áreas restritas, florestas estacionais (IBAMA, 1990). A bacia possui uso do solo com silvicultura de eucaliptos e pinheiros, atividade agrícola (milho), pastos e matas nativas, além das recentes instalações do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas (ICT-UNIFAL) (Figura 3).

O clima da região, segundo a classificação de Koppen (1948), é mesotérmico (C), caracterizando-se por apresentar pequenas variações térmicas e pluviométricas, com predomínio de dois subtipos, Cwb (clima úmido com inverno seco e verão brando) e Cwa (mesotérmico de inverno seco, com verões quentes e estação chuvosa no verão) (PMPC, 2007). A precipitação média anual entre os anos de 2003 e 2016 foi de 1.627 mm (CBA, 2016), sendo janeiro o mês mais chuvoso (média de 339 mm) e agosto o mês mais seco (média de 25 mm) (Figura 4).

O ano mais chuvoso durante esse período foi 2009 (2.373 mm) e o menos chuvoso, 2014 (1.300 mm). A precipitação total observada no período de estudo — junho de 2014 a maio de 2015 — foi de 1.494 mm, valor inferior em somente 8% da média histórica anual. Apesar das variações observadas, a precipitação total no período de estudo pode ser considerada próxima à média histórica da região (Figura 4).

## MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de quantificar as taxas de intemperismo químico e remoção de solo na Bacia do Córrego Ariranha e, conseqüentemente, o balanço de denudação em Tinguaitos da Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas, Minas Gerais, realizaram-se coletas de águas fluviais e pluviais na Bacia do Córrego da Ariranha (Figura 2) durante um ano hidrológico. As águas pluviais foram coletadas entre 27 de julho de 2014 e 11 de maio de 2015, totalizando 18 amostras. Para as águas fluviais foram realizadas amostragens mensais entre 04 de junho de 2014 e 11 de maio de 2015, sendo o ponto de amostragem localizado próximo ao exutório da Bacia do Córrego Ariranha.



S1: solo de brecha vulcânica de matriz cinza; S2: latossolos profundos com lateritas; S3: afloramento de tinguaitos sobreposto por cambissolos; S4: solos indiferenciados de várzea com material orgânico e arenoso.

**Figura 2.** Mapa geológico da Bacia do Córrego da Ariranha com pontos de amostragem de águas pluviais, fluviais e solos.

Para a amostragem das águas pluviais foi utilizado coletor do tipo bulk (deposição seca e úmida), sendo composto de um recipiente de polietileno cilíndrico de 2.600 mL, acoplado a um funil de aproximadamente 14 cm de diâmetro coberto por uma malha de 0,075 mm de abertura, ambos fixados a 1,50 m do solo, próximo ao pluviômetro semiautomático Delta OHM 2013-DB. Para as águas fluviais foram coletadas amostras em três pontos na calha do Córrego Ariranha — margens direita e esquerda e eixo principal da corrente —, que foram compostas em uma única alíquota ainda em campo.

As amostras de águas fluviais foram analisadas em relação à temperatura, ao pH, à condutividade elétrica, ao oxigênio dissolvido e aos sólidos totais dissolvidos (STD) diretamente no local da coleta. Somente pH, condutividade elétrica e STD foram caracterizados nas águas pluviais após suas coletas. Para isso, foi utilizado o equipamento com eletrodos de leitura direta, medidor portátil U-50 Multiparameter Water Quality Checkers (Horiba).

Amostras também foram coletadas e armazenadas em garrafas de polietileno, previamente lavadas, e encaminhadas ao laboratório da UNIFAL, para análise de sólidos totais em suspensão (STS) em triplicata (Equação 1) com filtros de 0,45 µm, de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, segundo metodologia gravimétrica (APHA, 2012).

$$STS = \frac{M_1 - M_2}{V_{amostra}} \quad (1)$$

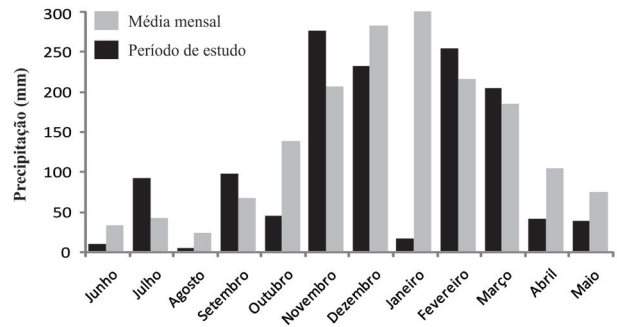
Em que:

STS = concentração de sólidos totais em suspensão (mg/L);

M<sub>1</sub> = massa do filtro pesado após a filtração (mg);

M<sub>2</sub> = massa do filtro pesado antes da filtração (mg);

V = volume da amostra de água filtrada (L).



**Figura 4.** Precipitação média mensal entre 2003 e 2016 na região da Bacia do Córrego da Ariranha e precipitação mensal durante o período de estudo, junho de 2014 a maio de 2015.



Fonte: Google Earth Pro (2015).

**Figura 3.** Mapa de uso da terra na Bacia do Córrego da Ariranha.

A vazão foi determinada utilizando-se uma régua milimétrica graduada para medida de nível da água, trena de aço graduada para largura e micromolinetete Flow Rate Sensor Vernier para velocidade. A vazão foi estimada de acordo com a Equação 2:

$$Q = H.L.V \quad (2)$$

Em que:

Q = vazão (m<sup>3</sup>/s);

H = profundidade do canal (m);

L = largura do canal (m);

V = velocidade de escoamento no canal (m/s).

Para a determinação da remoção dos solos na área de estudo, torna-se de fundamental importância conhecer a densidade dos solos. Para isso, amostras de solos foram identificadas e descritas em afloramentos representativos da Bacia do Córrego da Ariranha (Figura 2). Amostras indeformadas foram coletadas a aproximadamente 30 cm de profundidade com anel volumétrico do tipo *Kopecky* para a determinação da densidade, por meio da Equação 3:

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_c} \quad (3)$$

Em que:

D<sub>s</sub> = densidade do solo (g/cm<sup>3</sup>);

M<sub>ss</sub> = massa do solo seco em estufa por 48 horas a 105°C (g);

V<sub>c</sub> = volume do cilindro (cm<sup>3</sup>).

## RESULTADOS

### Águas fluviais

Os resultados obtidos para os parâmetros físico-químicos nas águas fluviais da Bacia do Córrego da Ariranha são apresentados na Tabela 1. A média ponderada pela vazão para os parâmetros oxigênio dissolvido, STD e STS foi obtida pela Equação 4:

$$C_E = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (4)$$

Em que:

C<sub>E</sub> = concentração média ponderada pela vazão do parâmetro (mg/L);

C<sub>i</sub> = concentração do parâmetro para a quantificação *i* (mg/L);

Q<sub>i</sub> = vazão do rio no dia da quantificação *i* (m<sup>3</sup>/s).

A média de vazão de Córrego Ariranha foi de 0,12 m<sup>3</sup>/s, com os menores e os maiores valores de vazão registrados nos meses secos e chuvosos, respectivamente, mostrando que esse parâmetro possui influência sazonal. Quanto aos dados de temperatura da água, os menores valores foram observados em julho (15,9°C) e os maiores, em fevereiro (23,2°C), com média de 20,8°C. Os valores de pH situaram-se próximos à neutralidade (6,4), com valor mínimo de 5,9 e máximo de 7,1. Houve variação dos valores de condutividade elétrica ao longo ao ano (entre 30 e 78 µS/cm), com os menores valores

**Tabela 1.** Vazão e parâmetros físico-químicos quantificados nas águas fluviais da Bacia do Córrego Ariranha.

Data de amostragem	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Temperatura (°C)	pH	CE (µS/cm)	OD (mg/L)	STD (mg/L)	STS (mg/L)
04/06/2014	0,07	17,6	6,2	30	7,4	30	6
23/07/2014	0,07	15,9	5,9	30	7,6	31	6
22/08/2014	0,05	16,7	6,8	50	7,5	33	6
23/09/2014	0,04	19,9	6,6	60	5,4	35	8
14/10/2014	0,05	18,5	6,3	50	5,5	37	10
11/11/2014	0,12	22,4	5,9	40	6,9	22	14
17/12/2014	0,30	21,1	6,1	33	7,9	21	21
15/01/2015	0,29	21,8	6,2	33	7,7	22	20
11/02/2015	0,20	23,2	7,0	35	6,7	22	18
17/03/2015	0,12	21,6	7,1	38	6,9	25	14
27/04/2015	0,10	20,6	7,1	35	6,9	33	12
11/05/2015	0,08	19,1	5,9	78	6,4	28	14
Média	0,12	20,8	6,4	38	-	-	-
Média ponderada	-	-	-	-	7,2	25	16

CE: condutividade elétrica; OD: oxigênio dissolvido; STD: sólidos totais dissolvidos; STS: sólidos totais em suspensão.

obtidos no período de chuva. A média ponderada pela vazão da concentração de oxigênio dissolvido foi de 7,2 mg/L, com variação entre 5,4 e 7,9 mg/L. O Córrego da Ariranha está enquadrado como Classe 2, segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357 (Brasil, 2005), e os valores desses parâmetros devem estar entre as faixas de 6 e 9 e > 5 mg/L, respectivamente. Todos os valores de pH e oxigênio dissolvido caracterizados estiveram inseridos e/ou muito próximos aos intervalos preconizados para rios de Classe 2.

As águas da Bacia do Córrego Ariranha apresentam uma variação na concentração de STD entre 37,0 mg/L (outubro) e 21,0 mg/L (dezembro), enquanto que para os STS a variação foi entre 6,0 mg/L (junho, julho e agosto) e 21,0 mg/L (dezembro). As médias ponderadas pela vazão das concentrações de STD e STS foram de 25 e 16 mg/L, respectivamente. Os valores de STS indicam que nos meses chuvosos ocorreu um maior aporte de sedimentos para as águas fluviais da Bacia do Córrego da Ariranha, devido à erosão laminar (Figura 5A). Por outro lado, a concentração de STD diminuiu nos meses chuvosos devido ao processo de diluição nas águas fluviais pela contribuição das águas pluviais (Figura 5B). O fluxo diário instantâneo de STS e STD pode ser obtido por meio das concentrações de STS e STD no Córrego da Ariranha e as respectivas vazões registradas nos dias de amostragem (Tabela 1). Esse parâmetro está em função da vazão, sendo a maior parte do material sólido transportado durante a época de verão (Figura 5C), em acordo com a maioria dos rios mundiais (Berner e Berner, 1996).

### Águas pluviais

A Tabela 2 apresenta os resultados de precipitação e dos parâmetros físico-químicos das águas pluviais coletadas na Bacia do Córrego da Ariranha durante o período de estudo. A média ponderada pela precipitação para os parâmetros STD e STS foram obtidas pela Equação 5.

$$CC_E = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (5)$$

Em que:

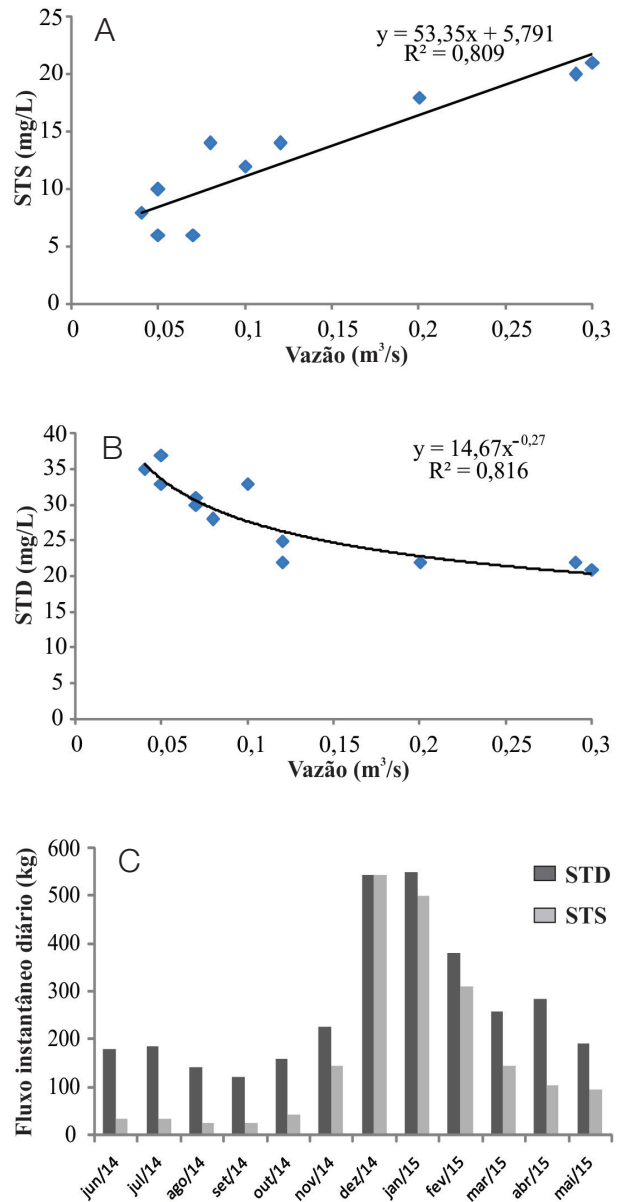
$CC_E$  = concentração média ponderada pela precipitação do parâmetro (mg/L);

$C_i$  = concentração do parâmetro para a quantificação  $i$  (mg/L);

$P_i$  = precipitação  $i$  (mm).

Os valores de pH das amostras coletadas variam entre 4,70 e 6,90, com média de 5,80. O valor de pH de 5,6 em

águas de chuva “limpas” é função da solubilização parcial do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e pelo equilíbrio de dissolução parcial do ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) formado (Galloway et al., 1982). Contudo, águas pluviais com valores de pH inferiores a 5,0 podem ser consideradas chuva ácida (Galloway et al., 1982). Algumas amostras apresentam valores de pH acima e/ou muito próximos aos valores das águas de chuva ácidas.



STS: sólidos totais em suspensão; STD: sólidos totais dissolvidos.

**Figura 5.** (A) Correlação entre vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e sólidos totais em suspensão (mg/L); (B) correlação entre vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e sólidos totais dissolvidos (mg/L); (C) fluxo instantâneo diário de sólidos totais dissolvidos e sólidos totais em suspensão (kg) para o Córrego da Ariranha.

Os resultados de condutividade elétrica mantiveram-se praticamente constantes e baixos por todo o ano, com média de 10,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , sendo os maiores valores caracterizados no período chuvoso. Quanto à concentração de sólidos, as águas pluviais da Bacia do Córrego Ariranha apresentaram uma variação na concentração de STD entre 12,0 mg/L (outubro) e 1,0 mg/L (dezembro), enquanto que para os STS a variação foi entre 0,3 e 2,7 mg/L (início e final de novembro, respectivamente). Os valores indicam que nos meses chuvosos há um maior aporte de STS para as águas de chuva devido à erosão laminar. Por outro lado, a concentração de STD é maior no período seco, seguindo o padrão das águas superficiais.

### Densidade dos solos

A densidade média dos solos da Bacia do Córrego da Ariranha (Tabela 3) foi obtida a partir das densidades dos solos presentes na área de drenagem (Figura 2), calculadas pela Equação 3, sendo: S1 = 1,84  $\text{g}/\text{cm}^3$  para os solos de brecha vulcânica, com coloração cinza-escura, localizados na região sudeste da bacia; S2 = 1,48  $\text{g}/\text{cm}^3$  para latossolos, com pouca diferenciação entre horizontes aflorando no centro, sul e nordeste da bacia; S3 = 1,84  $\text{g}/\text{cm}^3$  para cambissolos derivados de tinguaitos, principalmente na região oeste da bacia, no dique anelar da Caldeira Vulcânica; S4 = 1,80  $\text{g}/\text{cm}^3$  para solos indiferenciados de várzea (arenosos e orgânicos), localizados próximos às principais drenagens da bacia.

Os valores médios (1,74  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) encontrados para a Bacia do Córrego da Ariranha são maiores que os apresentados por Brasil (1983) para a densidade média de latossolos na Bacia do Médio Tietê (1,47  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), por Bortoletto Júnior (2004) para a densidade média dos solos da Bacia do Rio Tietê (1,40  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e Piracicaba (1,50  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), por Fernandes (2012) para os solos da Bacia do Rio Sorocaba (1,47  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), e por Moraes (2015) para Argissolos (1,66  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) da Bacia do Rio Jundiá.

## DISCUSSÃO

### Intemperismo químico

O intemperismo químico corresponde às reações químicas de minerais primários das rochas em minerais

**Tabela 3.** Densidade dos solos amostrados na Bacia do Córrego da Ariranha.

Amostra	$\rho$ natural ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
S1 – Solo de brecha vulcânica	1,84
S2 – Latossolos	1,48
S3 – Cambissolos	1,84
S4 – Solos indiferenciados de várzea	1,80
Média	1,74

**Tabela 2.** Precipitação e parâmetros físico-químicos quantificados nas águas pluviais da Bacia do Córrego Ariranha.

Data de amostragem	Precipitação (mm)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	STD (mg/L)	STS (mg/L)
27/07/2014	45	5,3	4	3	0,5
26/10/2014	26	6,3	18	12	0,6
03/11/2014	40	5,8	10	6	0,2
08/11/2014	58	5,7	6	4	0,3
24/11/2014	27	5,5	4	3	0,7
25/11/2014	44	4,7	4	3	0,9
26/11/2014	22	4,9	8	5	2,7
30/11/2014	41	6,3	7	4	1,2
11/12/2014	28	5,6	3	2	2,0
13/12/2014	49	4,9	10	6	1,2
22/12/2014	58	5,2	32	1	0,1
02/02/2015	27	5,8	15	1	1,1
05/02/2015	40	6,9	10	6	0,9
19/02/2015	87	6,5	6	4	1,4
09/03/2015	31	6,3	15	4	0,8
15/03/2015	68	6,6	7	6	0,3
17/03/2015	33	6,6	4	3	1,3
11/05/2015	30	4,7	12	8	0,3
Média	42	5,8	10	–	–
Média ponderada	–	–	–	4	0,8

CE: condutividade elétrica; STD: sólidos totais dissolvidos; STS: sólidos totais em suspensão.



secundários, introduzindo elementos químicos solúveis lixiviados do manto de alteração por meio da água e que são drenados pelo exutório da bacia hidrográfica (White e Blum, 1995). Segundo os mesmos autores, além da composição mineralógica das rochas, as condições climáticas possuem papel fundamental na variação da intensidade do intemperismo químico. A Bacia do Córrego da Ariranha está inserida em uma região onde o clima (pluviosidade de 1.627 mm e temperatura média de 17°C) causa uma alteração química moderada nos minerais primários por hidrólise parcial (monossilatização ou bissilatização), com a geração de minerais secundários e a liberação de elementos químicos para as águas fluviais.

A abundância e a proporção relativa de íons dissolvidos em águas superficiais podem ser modeladas usando um balanço de massa (Garrels e Mackenzie, 1967; White e Blum, 1995). A quantidade total de material alterado removido por unidade de área e tempo ( $t/km^2/ano$ ) pode ser determinada pelo uso da metodologia apresentada por Moreira-Nordemann (1980, 1984). A contribuição advinda do intemperismo químico das rochas pode ser obtida pela concentração de STD e pela vazão da bacia hidrográfica de estudo, descontando-se somente o aporte atmosférico em áreas onde a poluição pontual ou difusa não é significativa (Lerman, 1988), como é o caso da Bacia do Córrego da Ariranha (Equação 6). Usando a densidade ( $\rho$ , em  $g/cm^3$ ) das rochas e o fluxo anual de material removido pelo Córrego Ariranha ( $Wq$ , em  $t/km^2/ano$ ), pode-se determinar a taxa de intemperismo químico dos tinguaitos ( $Hq$ , em  $cm/ano$ ) nessa bacia hidrográfica (Equação 7).

$$Wq = \frac{STD_{rio} \times Q_{anual}}{S} - STD_{chuva} \times P_{anual} \quad (6)$$

$$Hq = \frac{10^{-4} \times Wq}{\rho} \quad (7)$$

Em que:

$STD_{rio}$  e  $STD_{chuva}$  = concentração média ponderada de sólidos totais dissolvidos nas águas fluviais e pluviais ( $g/L$ ), respectivamente;

$Q_{anual}$  = vazão média anual ( $L/ano$ );

$S$  = área da bacia ( $m^2$  ou  $km^2$ );

$P_{anual}$  = precipitação anual ( $L/m^2/ano$ ).

A concentração média ponderada de STD nas águas fluviais na Bacia do Córrego da Ariranha foi de 25,0 mg/L. Considerando a vazão média durante um ano hidrológico de 0,12  $m^3/s$  e a área da bacia de 6,3  $km^2$ , obtêm-se um total de 15,5  $t/km^2/ano$  de material dissolvido transportado pelas águas do Córrego da Ariranha no

período de estudo. Para a correção dos aportes atmosféricos no cálculo do fluxo anual de material removido pelo intemperismo químico dos tinguaitos, considerou-se a concentração média ponderada de STD nas águas pluviais de 4,0 mg/L e a precipitação de 1.494,0 mm, o que resultou num aporte atmosférico de 6,0  $t/km^2/ano$  durante o período de estudo. Com isso, por meio da Equação 6 é possível obter um fluxo anual de material removido dos tinguaitos de 9,5  $t/km^2/ano$  ou 60,0  $t/ano$ . Considerando a densidade média das rochas alcalinas da Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas, de 2,61  $g/cm^3$  (Guarda, 1990), chega-se a uma taxa de intemperismo químico associada aos tinguaitos de 0,0036  $mm/ano$  ou 3,6  $m/Ma$ . Isso indica que seriam necessários aproximadamente 278 mil anos para alterar 1 m de rocha nas condições climáticas atuais.

As taxas de intemperismo químico são fortemente atreladas ao clima, à biosfera e ao tempo; portanto, seus valores podem variar significativamente de uma região para outra. Os valores encontrados neste estudo são inferiores aos calculados para dioritos em Porto Rico (58  $m/Ma$ ), maiores taxas de intemperismo químico de rochas silicatadas documentadas (White et al., 1998). Além disso, esses valores também são inferiores aos de rochas cristalinas (8,5  $m/Ma$ ) da Bacia do Rio Congo (Probst et al., 1992); de xistos ultramáficos (8,0  $m/Ma$ ) da Bacia do Rio Yaou, na Guiana Francesa (Freysinet e Farah, 2000); de granitos e xistos (4,7 – 6,1  $m/Ma$ ) da Bacia do Rio Niger (Boeglin e Probst, 1998); e de rochas metamórficas (5,5  $m/Ma$ ) da Pennsylvania, Estados Unidos (Price et al., 2008).

No Brasil, tem aumentado a quantidade de estudos sobre taxas de intemperismo químico de rochas, iniciando-se pelos estudos em rochas metamórficas no estado da Bahia, nas bacias do Rio Preto (40  $m/Ma$ ) e do Rio Salgado (13  $m/Ma$ ) (Moreira-Nordemann, 1980, 1984). Na Bacia do Rio Amazonas, Mortatti e Probst (2003), em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, calcularam uma taxa de intemperismo químico de 15  $m/Ma$ . Carmo e Vasconcelos (2006) obtiveram uma taxa de 8,9  $m/Ma$  para uma suíte metavulcânica/metassedimentar em Minas Gerais. Bonotto et al. (2007), em trabalho realizado no Morro do Ferro, Minas Gerais, chegaram a um valor de 15  $m/Ma$ . Uma taxa de intemperismo químico de 6  $m/Ma$  para a província basáltica da Bacia do Paraná, estado de São Paulo, foi encontrada por Conceição et al. (2015). Fernandes et al. (2016) determinaram o intemperismo químico atual em 15  $m/Ma$  para rochas ígneas e metamórficas do Cinturão Ribeira, estado de São Paulo. Assim, os resultados obtidos neste estudo indicaram menores taxas de intemperismo químico para as rochas alcalinas, tinguaitos de Poços de Caldas, Minas Gerais, em relação a outros tipos de rochas encontradas no Brasil e no mundo.

## Remoção de solos e balanço de denudação

A remoção de solos proporciona o rebaixamento do relevo por meio do transporte de material sólido em suspensão pelas águas dos rios. A quantidade total de solo removido por unidade de área ( $Wm$ , em t/km<sup>2</sup>/ano) pode ser determinada pela Equação 8, sendo a taxa de rebaixamento do relevo ( $Hm$ , em cm/ano) obtida pelo uso da densidade dos solos ( $\rho$ , em g/cm<sup>3</sup>) e pela quantidade total de solo removido ( $Wm$ ), de acordo com a Equação 9.

$$Wm = \frac{STS_{rio} \times Q_{anual}}{S} - STS_{chuva} \times P_{anual} \quad (8)$$

$$Hm = \frac{10^{-4} \times Wm}{\rho} \quad (9)$$

Em que:

$Q_{anual}$  = vazão média anual (L/ano);

$P_{anual}$  = precipitação anual (L/m<sup>2</sup>/ano);

$STS_{rio}$  = concentração média ponderada de sólidos totais suspensos nas águas fluviais (g/L);

$STS_{chuva}$  = concentração média ponderada de sólidos totais suspensos nas águas pluviais (g/L).

Para o cálculo do fluxo anual de material removido, utilizou-se a concentração média ponderada pela vazão de STS (16,0 mg/L), obtendo-se um total de 9,9 t/km<sup>2</sup>/ano de material suspenso transportado pelas águas do Córrego da Ariranha no período de estudo. Corrigindo-se esse valor pelo aporte atmosférico na Bacia do Córrego da Ariranha (1,2 t/km<sup>2</sup>/ano) — que foi calculado utilizando-se a concentração média ponderada de STS nas águas pluviais de 0,8 mg/L e a precipitação de 1.494,0 mm —, é possível obter um fluxo anual de material removido nessa bacia hidrográfica de 8,7 t/km<sup>2</sup>/ano ou 55,0 t/ano. Com o uso da densidade média dos solos na Bacia do Córrego da Ariranha (1,74 g/cm<sup>3</sup>), estima-se uma taxa de remoção de solo de 0,005 mm/ano ou 5,0 m/Ma. Isso indica que seriam necessários aproximadamente 200 mil anos para remover 1 m de solo nas condições climáticas atuais.

Estudos associados à avaliação das taxas de remoção de solos indicam que os valores na Bacia Córrego da Ariranha são menores que os obtidos em algumas regiões brasileiras, tais como na Bacia do Ribeirão Monjolo Grande (26 m/Ma, Spatti Júnior et al., 2014), na Bacia do Rio Amazonas (15 m/Ma, Mortatti e Probst, 2003), na Bacia do Córrego Cachoeirinha (9,6 m/Ma, Couto Júnior et al., 2016) e nas bacias dos rios Jiparaná e Jamari (7,4 m/Ma, Mortatti et al., 1992). Nas bacias do

Rio Congo e do Rio Niger, os valores foram de 7,4 m/Ma (Nkounkou e Probst, 1987) e 2,4 m/Ma (Boeglin e Probst, 1998), respectivamente. Assim, os resultados obtidos na Bacia do Córrego da Ariranha são menores que os encontrados em outros locais do Brasil e do mundo, com exceção do Rio Niger, devendo ser levadas em conta as diferenças climáticas, altimétricas e litológicas que influenciam nos processos superficiais de uso e ocupação.

De acordo com Penteadó (1974), a proporcionalidade entre os processos intempéricos e de remoção dos solos leva a um balanço de equilíbrio de denudação ( $D = Wq - Wm$ ), em que a espessura do solo permaneceria intocada quando  $Wq = Wm$ . Se a remoção do solo for maior que sua taxa de formação, há um balanço positivo de denudação com adelgaçamento do solo; e quando o processo é inverso, há um balanço negativo de denudação com espessamento do solo. Os resultados das taxas de intemperismo químico (3,6 m/Ma) e de remoção dos solos (5,0 m/Ma) indicam que a espessura dos solos na bacia se reduz nas condições climáticas atuais em 1,4 m/Ma, ou seja, há um balanço positivo em relação ao equilíbrio de denudação.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou o balanço de denudação associado aos tinguaítos da Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas, Minas Gerais. Durante o período de estudo, 15,5 t/km<sup>2</sup>/ano de material dissolvido foi transportado pelas águas superficiais e o aporte atmosférico foi de 6,0 t/km<sup>2</sup>/ano, sendo possível obter um fluxo anual de material removido das rochas alcalinas tinguaítos de 9,5 t/km<sup>2</sup>/ano ou 60,0 t/ano, indicando uma taxa de intemperismo químico de 3,6 m/Ma. Um total de 9,9 t/km<sup>2</sup>/ano de material suspenso foi transportado pelo Córrego Ariranha, sendo um aporte atmosférico de 1,2 t/km<sup>2</sup>/ano e/ou 7,5 t/ano. Assim, foi possível estimar um fluxo anual de material removido dos solos na Bacia do Córrego Ariranha de 8,7 t/km<sup>2</sup>/ano ou 55,0 t/ano, com uma taxa de remoção de solos de 5,0 m/Ma. Os resultados indicam que há balanço positivo de denudação na região da Bacia do Córrego da Ariranha, Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas, com predomínio de remoção de solo em relação à sua formação, que deverá gerar uma superfície rochosa no *front* de alteração. Com isso, destaca-se a importância de agregar as taxas de denudação química e mecânica em estudos relacionados à evolução da paisagem por geoquímica fluvial em climas tropicais, visando identificar os principais mecanismos da morfogênese e do aplainamento do relevo.

## REFERÊNCIAS

- American Public Health Association (APHA). (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22. ed. Washington: American Public Health Association Pub. 1935p.
- Amiotte-Suchet, P., Probst, J. L. (1993). Modelling of atmospheric CO<sub>2</sub> consumption by chemical weathering of rocks: application to the Garonne, Congo and Amazon basins. *Chemical Geology*, 107, 205-210. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90174-H](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90174-H)
- Berner, E. K., Berner, R. A. (1996). *Global environment: water, air and geochemical cycles*. Prentice Hall. New Jersey, Princeton University Press. 367p.
- Boeglin, J. L., Probst, J. L. (1998). Physical and chemical weathering rates and CO<sub>2</sub> consumption in a tropical lateritic environment: the upper Niger basin. *Chemical Geology*, 148, 137-156. DOI: 10.1016/S0009-2541(98)00025-4
- Bonotto, D. M., Fujimori, K., Moreira-Nordemann, L. M. (2007). Determination of weathering rate of the Morro do Ferro Th-REEs deposit, Brazil using U-isotope method. *Applied Radiation and Isotopes*, 65, 474-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2006.11.003>
- Bortoletto Júnior, M.J. (2004). *Características hidrogeoquímicas e processos erosivos mecânicos e químicos nas bacias de drenagem dos rios Tietê e Piracicaba*. Tese (Doutorado). Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura – USP.
- Bortoletto Júnior, M. J., Mortatti, J., Probst, J. L. (2002). Erosão Química na Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí (SP). *Geochimica Brasiliensis*, 16(1), 99-111.
- Brasil. (1983). *Projeto RADAMBRASIL*. Folhas 23/24, 27-247. Rio de Janeiro, Ministério das Minas e Energia.
- Brasil. (2005). Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 357, de 17 de março de 2005*. Brasília, Ministério do Meio Ambiente. 27p.
- Carmo, I. O., Vasconcelos, P. M. (2006). <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology constraints on late miocene weathering rates in Minas Gerais, Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, 241, 80-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2005.09.056>
- Clow, D. W., Drever, J. I. (1996). Weathering rates as a function of flow through an alpine soil. *Applied Geochemistry*, 132, 131-141. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00048-4)
- Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). (2016). *Relatório interno: dados pluviométricos da estação bauxita*. Poços de Caldas, CBA.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). (1979). *Projeto Sapucaí: relatório final*. Escala 1:250.000. São Paulo, CPRM. (DNPM/CPRM, 5 volumes, 289p.).
- Conceição, F. T., Bonotto, D. M. (2004). Weathering rates and anthropogenic influences in a sedimentary basin, São Paulo State, Brazil. *Applied Geochemistry*, 19, 575-591. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2003.07.002>
- Conceição, F. T., Santos, C. M., Sardinha, D. S., Navarro, G. R. B., Godoy, L. H. (2015). Chemical weathering rate, denudation rate, and atmospheric and soil CO<sub>2</sub> consumption of Paraná flood basalts in São Paulo State, Brazil. *Geomorphology*, 233, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.040>
- Conceição, F. T., Sardinha, D. S., Souza, A. D. G., Bonotto, D. M. (2007). Hydrochemical Relationships at Meio Stream Watershed, São Paulo State, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 37, 389-400. DOI: 10.25249/0375-7536.2007373390401
- Couto Júnior, A. A., Conceição, F. T., Fernandes, A. M., Lupinacci, C. M., Spatti Júnior, E. P. (2016). Geoquímica fluvial aplicada à avaliação das taxas de intemperismo químico e remoção de solo da Formação Rio Claro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17(3), 451-464. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i3.1006>
- Doranti-Tiritan, C., Hackspacher, P. C., Ribeiro, M. C. S., Glasmacher, U. A., Souza, D. H. (2014). Evolução do relevo da região do planalto de Poços de Caldas (SP/MG) baseado em dados de termocronologia de baixa temperatura e modelagem termocinética 3d. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(2), 291-310. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v15i2.491>
- Ellert, R. (1959). Contribuição à geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. *Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade de São Paulo*, 237(18), 5-63.
- Fernandes, A. M. (2012). *Características hidrogeoquímicas da bacia de drenagem do Rio Sorocaba, SP: processos erosivos mecânicos e químicos*. Tese (Doutorado). Piracicaba: Ciências, Centro de Energia Nuclear na Agricultura – USP.

- Fernandes, A. M., Conceição, F. T., Spatti Júnior, E. P., Sardinha, D. S., Mortatti, J. (2016). Chemical weathering rates and atmospheric/soil CO<sub>2</sub> consumption of igneous and metamorphic rocks under tropical climate in southeastern Brazil. *Chemical Geology*, 443, 54-66. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.09.008
- Franco, A. O. B., Hackspacher, P. C., Godoy, D. F., Ribeiro, L. F. B., Guedes, S. (2005). História térmica do maciço alcalino de Poços de Caldas (SP/MG) e adjacências através da análise de datação por traços de fissão em apatitas. *Revista Brasileira de Geociências*, 35, 351-358.
- Freyssinet, P., Farah, A. S. (2000). Geochemical mass balance and weathering rates of ultramafic schists in Amazonia. *Chemical Geology*, 170, 133-151.
- Galloway, J. N., Likens, G. E., Keene, W. C., Miller, J. M. (1982). The composition of precipitation in remote areas of the world. *Journal of Geophysical Research*, 87, 8771-8786. <https://doi.org/10.1029/JC087iC11p08771>
- Garrels, R. M., Mackenzie, F. T. (1967). Origin of the chemical composition of some springs and lakes. In: American Chemical Society (Ed.), *Equilibrium concepts in natural waters systems*. (Advances in Chemistry Series, 67).
- Gibbs, R. J. (1967). The geochemistry of the Amazon River System. Part 1. The factors that control the salinity and the composition and concentration of suspended solids. *Geological Society of American Bulletin*, 78, 1203-1232.
- Google Earth Pro. (2015). *Imagens de satélite*. Disponível em: <<https://earth.google.com/>>. Acesso em: 16 set. 2015.
- Guarda, G. M. (1990). *A alteração hidrotermal no contexto da evolução geológica do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.
- Indústrias Nucleares do Brasil (INB). (2011). *Programa de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD)*. UTM – Caldas, Minas Gerais. Nº Projeto 099-515-3023. Elaboração R.L. Mapa Geológico Regional (2).
- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). (1990). *Manual de Recuperação pelas Áreas Degradadas pela Mineração: técnicas de revegetação*. Brasília: Ibama.
- Johnson, N. M., Likens, G. E., Bormann, F. H., Pierce, P. S. (1968). Rate of chemical weathering of silicate minerals in New Hampshire. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 32, 531-538. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(68\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(68)90044-6)
- Koppen, W. (1948). *Climatologia*. México, Fondo de Cultura Económica.
- Lerman, A. (1988). Weathering Rates and Major Transport Processes: an Introduction. In: A. Lerman, M. Meybeck (Eds.), *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles*, 1-10. Holanda.
- Millot, R., Gaillardet, J., Dupré, B., Allègre, C. J. (2002). The global control of silicate weathering rates and the coupling with physical erosion: new insights from rivers of the Canadian Shield. *Earth Planet Science Letters*, 196, 83-98. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00599-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00599-4)
- Millot, R., Gaillardet, J., Dupré, B., Allègre, C. J. (2003). Northern latitude chemical weathering rates: Clues from the Mackenzie River Basin, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 1305-1329. DOI: 10.1016/S0016-7037(02)01207-3
- Moraes, G. M. (2015). *Características hidrogeoquímicas das bacias de drenagem dos rios Capivari e Jundiá, SP: aspectos e influências antrópicas*. Tese (Doutorado). Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura – USP.
- Moreira-Nordemann, L. M. (1980). Use of <sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U disequilibrium in measuring chemical weathering rate of rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 103-108. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(80\)90180-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(80)90180-5)
- Moreira-Nordemann, L. M. (1984). Salinity and weathering rate of rocks in a semiarid region. *Journal of Hydrology*, 71, 131-147. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90074-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90074-X)
- Mortatti, J., Probst, J. L. (2003). Silicate rock weathering and atmospheric/soil CO<sub>2</sub> uptake in the Amazon basin estimated from river water geochemistry: seasonal and spatial variations. *Chemical Geology*, 197, 177-196. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00349-2
- Mortatti, J., Probst, J. L., Bortoletto Júnior, M. J. (2003). Piracicaba river basin: mechanical and chemical erosions. São Paulo, UNESP. *Geociências*, 22, 75-81.
- Mortatti, J., Probst, J. L., Ferreira, J. R. (1992). Hydrological and geochemical characteristics of the Jamari and Jiparana river basin (Rondonia, Brazil). *GeoJournal*, 26, 287-296.

- Mortatti, J., Probst, J. L., Fernandes, A. M., Mortatti, B. C., Oliveira, H. (2008). Influence of discharge on silicate weathering of the Tietê river basin: major cations and dissolved silica approach. *Geochimica Brasiliensis*, 22, 15-26.
- Mortatti, J., Victória, R. L., Tardy, Y. (1997). Balanço de alteração e erosão química na Bacia Amazônica. *Geochimica Brasiliensis*, 11, 1-13.
- Nkounkou, R. R., Probst, J. L. (1987). Hydrology and geochemistry of the Congo River System. *SCOPE/UNEP Sonderband Heft*, 64, 483-508.
- Penteado, M. M. (1974). *Fundamentos de geomorfologia*. Rio de Janeiro, Fundação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Prefeitura Municipal de Poços de Caldas (PMPC). (2007). *Zoneamento Ambiental do Município de Poços de Caldas (MG): subsídios ao planejamento territorial (Relatório técnico)*. Poços de Caldas, PMPC. 41p.
- Price, J. R., Heitmann, N., Hull, J., Szymanski, D. (2008). Long-term average mineral weathering rates from watershed geochemical mass balance methods: Using mineral modal abundances to solve more equations in more unknowns. *Chemical Geology*, 254, 36-51. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.012
- Probst, J. L. (1986). Dissolved and suspended matter transported by the Girou River (France): mechanical and chemical erosion rates in a calcareous molasse basin. *Hydrological Science Journal*, 31, 61-79.
- Probst, J. L., Nkounkou, R. R., Krempp, G., Bricquet, J. P., Thiébaux, J. P., Olivry J. C. (1992). Dissolved major elements exported by the Congo and the Ubangi rivers during the period 1987-1989. *Journal of Hydrology*, 135, 237-257. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90090-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90090-1)
- Probst, J. L., Tardy, Y. (1987). Long range stream flow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century. *Journal of Hydrology*, 94, 289-311. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90057-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90057-6)
- Salgado, A. A. R., Valadão, R. C. (2003). Contribuição da Denudação Geoquímica na Evolução da Erosão Diferencial no Espinhaço Meridional – MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2, 31-40.
- Salomão, F. X. T., Antunes, F. S. (1998). Solos em pedologia. In: A. M. S. Oliveira, S. N. A. Brito (Eds.), *Geologia de Engenharia* (1), 87-99. São Paulo, ABGE.
- Sardinha, D. S., Bonotto, D. M., Conceição, F. T. (2010). Weathering rates at Alto Sorocaba basin, Brazil, using U-isotopes and major cations. *Environmental Earth Sciences*, 61, 1025-1036. DOI: 10.1007/s12665-009-0424-7
- Spatti Júnior, E. P., Conceição, F. T., Guedes Júnior, E., Pinto, S. A. F., Pereira, L. H. (2014). Balanço entre intemperismo químico e remoção do solo na bacia do Ribeirão Monjolo Grande, Ipeúna (SP), determinado por geoquímica fluvial. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15, 137-152. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v15i1.486>
- Tardy, Y. (1968). *Une méthode de détermination des types d'altération actuels par l'étude des eaux en pays granitiques et gneissiques*. Paris, Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences.
- Tardy, Y. (1969). Géochimie des alterations. Etudes des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mémoires du Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine*.
- Tardy, Y. (1971). Characterization of principal weathering types by geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs. *Chemical Geology*, 7, 253-271. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(71\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(71)90011-8)
- Tardy, Y., Bustillo, V., Boeglin, J. L. (2004). Geochemistry applied to the watershed survey: hydrograph separation, erosion and soil dynamics. A case study: the basin of the Niger River, Africa. *Applied Geochemistry*, 19, 469-518. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2003.07.003>
- Tardy, Y., Mortatti, J., Victoria, R., Martinelli, L., Ribeiro, A., Cerri, C., Piccolo, M., Moraes, J. L., Probst, J. L., Andreux, F., Volko, B. (1993a). Hydroclimatology and biogeochemistry of the Amazon. 1. Erosion. *Chemical Geology*, 107, 333-336. DOI: 0009-2541/93/\$06,00
- Tardy, Y., Mortatti, J., Victoria, R., Martinelli, L., Ribeiro, A., Cerri, C., Piccolo, M., Moraes, J. L., Probst, J. L., Andreux, F., Volko, B. (1993b). Hydroclimatology and biogeochemistry of the Amazon. 2. Geochemical cycles. *Chemical Geology*, 107, 411-414. DOI: 10.1016/0009-2541(93)90221-4
- Ulbrich, H. H. (1984). *Apetrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.
- Ulbrich, H. H., Ulbrich, M. N. C. (2000). The lujaurite and chibinite bodies of the Poços de Caldas Massif, southeastern Brazil: a structural and petrographical study. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 615-622.

Wang, L., Zhang, L., Cai, W., Wang, B., Yu, Z. (2016). Consumption of atmospheric CO<sub>2</sub> via chemical weathering in the Yellow River basin: the Qinghai-Tibet Plateau is the main contributor to the high dissolved inorganic carbon in the Yellow River. *Chemical Geology*, 430, 34-44. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.03.018

White, A. F., Blum, A. E. (1995). Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 1729-1747. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00078-E](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00078-E)

White, A. F., Blum, A. E., Schulz, M. S., Vivit, D. V., Stonestrom, D. A., Larsen, M., Murphy, S. F., Eberl, D. (1998). Chemical Weathering in a Tropical Watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: I. Long-Term Versus Short-Term Weathering Fluxes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 209-226. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00335-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00335-9)

Zalan, P. V., Oliveira, J. B. A. (2005). Origem e Evolução Estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *Boletim de Geociências*, 13(2), 269-300.