

EVOLUÇÃO DOS PALEOSSOLOS DA FORMAÇÃO MARÍLIA (BACIA BAURU) E IMPLICAÇÕES PALEOAMBIENTAIS DO CRETÁCEO SUPERIOR

Palavras-Chave: Evolução ambiental, paleossolos, Formação Marília, índices de intemperismo

Autores:

Vinícius Souto de Moraes, DGRN – IG
Prof. Dr. Alessandro Batezelli, DGRN - IG

INTRODUÇÃO:

A Bacia Bauru é uma bacia intracratônica localizada na porção sudeste do Brasil na América do Sul (Figura 1), com formato alongado na direção N-NE. Sua origem está ligada a subsidência flexural ocorrida a sudoeste do Soerguimento do Alto Paranaíba (SAP) e foi preenchida por depósitos continentais que correspondem aos grupos Caiuá e Bauru (Batezelli, 2017). Segundo Fernandes e Magalhães-Ribeiro (2015) e Batezelli e Ladeira (2016), o Grupo Caiuá é formado pelas formações Goio Erê, Rio Paraná e Santo Anastácio. O Grupo Bauru é constituído pelas formações Araçatuba, Adamantina, Uberaba e Formação Marília. Uma das principais características da Bacia Bauru é a presença de paleossolos intercalados com arenitos e conglomerados (Batezelli, 2010; Batezelli e Ladeira, 2016). Segundo Delgado et al. (2021), os paleossolos da Bacia Bauru são encontrados principalmente nas formações Santo Anastácio, Araçatuba e Marília. A Formação Marília, em particular, tem sido alvo de vários estudos sobre o tema, dado a abundância de perfis de paleossolos (Batezelli e Ladeira, 2016; Silva et al., 2017a ; Batezelli et al., 2019 ; Delgado et al., 2019).

A geoquímica dos paleossolos tem sido uma ferramenta cada vez mais explorada, como proxy ambiental na sedimentologia e estratigrafia (Delgado et al., 2021; Delgado et al., 2019). Durante o processo pedogenético, os minerais se alteram de forma diferente em função de sua composição química, tamanho, estrutura e condições de intemperismo (Goldich, 1938; Fontes, 2012; Kämpf *et al.* 2009). Alguns se alteram muito rapidamente (até 10^2 anos), enquanto outros de forma mais lenta (10^5 a 10^6 anos), permanecendo no registro sedimentar (Birkeland, 1999).

O presente trabalho tem como objeto apresentar um modelo de evolução ambiental da Formação Marília, a partir de análises geoquímicas, macromorfológica e micromorfológica de 20 perfis de paleossolos, de uma seção de 47 metros, descrita na região de Echaporã (SP).

METODOLOGIA:

Para o presente estudo foi realizada análise bibliográfica e compilação de dados e aquisição de dados de campo para análises laboratoriais e posterior interpretação dos resultados.

Na análise bibliográfica e compilações de dados foi levantado informações sobre fácies e paleossolos da Formação Marília, além da fundamentação teórica sobre análises geoquímicas para interpretações paleoambientais.

Para aquisição de dados de campo foi descrito o afloramento nas proximidades de Echaporã (SP), a fim de identificar fácies e arquiteturas deposicionais, bem como os perfis de paleossolos. Foram coletas de 20 amostras para confecção de lâminas delgadas e análises geoquímicas de elementos maiores. Em campo as descrições foram baseadas na macromorfologia dos paleossolos, seguindo as recomendações de

Retallack (2001), além do Manual de Descrição e Coleta de Solos em Campo (Santos et al., 2005). As estruturas pedológicas foram descritas quanto ao tamanho, forma, dureza e grau de desenvolvimento, além de buscar características pedológicas como, nódulos, mosqueamento, cimentação. Em campo também foram identificados horizontes diagnósticos, suas transições e cores (Munsell Color, 2009).

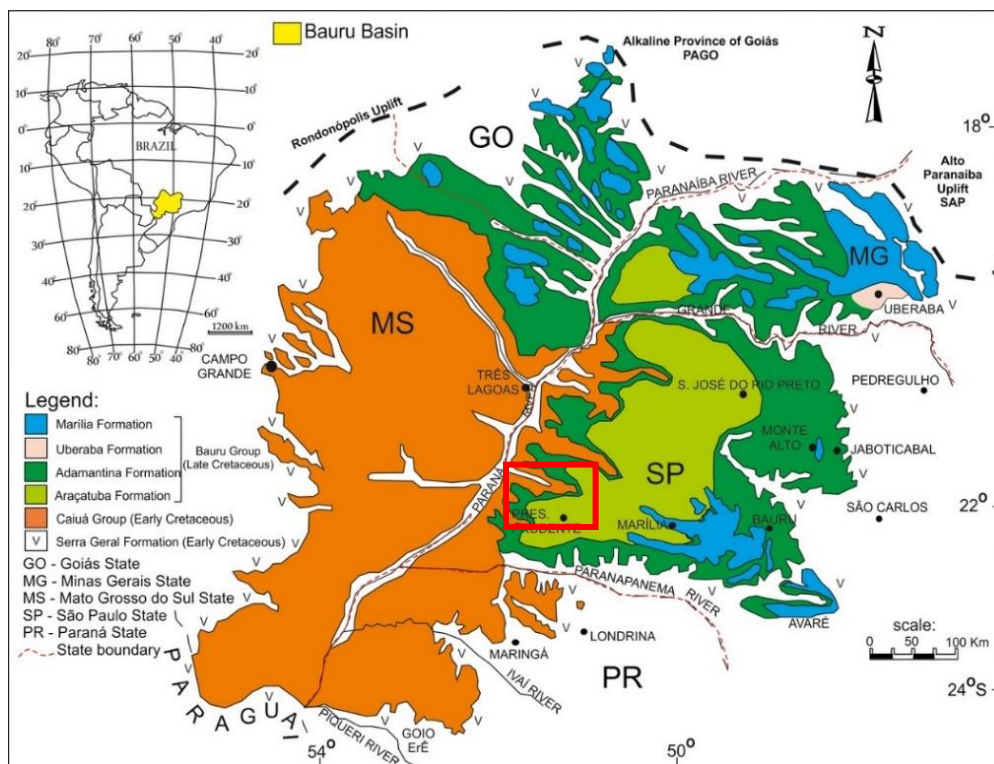


Figura 1: Mapa litoestratigráfico da Bacia Bauru (Batezelli, 2017). Destaque para a área de estudo delimitada pelo retângulo vermelho.

Para análises laboratoriais foram confeccionadas 20 lâminas petrográficas para análises micromorfológicas. Parte das amostras foram enviadas ao Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociência da UNICAMP para análise geoquímica. Após serem moídas, as amostras foram calcinadas, pulverizadas e transformadas em pastilhas de vidro para serem analisadas pelo espectrômetro de fluorescência de raio X (FRX). A conclusão das análises foi feita com a leituras dos elementos maiores no espectrômetro de fluorescência de raios-X, seguindo para os cálculos dos índices de intemperismo. A composição química das rochas sedimentares reflete sua mineralogia primária, que normalmente esteve sujeita a intenso intemperismo químico pré e pós deposicional. A precipitação, em contato com as rochas da superfície dissolve minerais formadores de rochas (ex: plagioclásio, K-feldspato e micas) transferindo os elementos que compõem esses minerais para a hidrosfera (Kronberg, *et al.*, 1987).

A quantidade de elementos dissolvidos durante a pedogênese é proporcional à extensão do intemperismo (Condie *et al.*, 2001). A influência dos processos intempericos nos sedimentos e rochas sedimentares pode ser avaliada em termos do Índice de Alteração Química (*Chemical Alteration Index – CIA*), proposto por Nesbitt & Young (1982), o qual avalia a alteração progressiva de plagioclásios e K-feldspatos para argilominerais. Esse índice é calculado utilizando as porcentagens moleculares de Al_2O_3 , CaO , Na_2O and K_2O e pode ser obtido através da equação:

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \times 100$$

Onde o CaO^* é a quantidade de CaO incorporada na fração silicáticas das rochas e todos os óxidos estão expressos em proporções molares.

Como álcalis são predominantes nos feldspatos e micas o CIA é uma medida da alteração desses minerais. A fim de evitar o efeito do potássio metassomático incorporado aos paleossolos, Harnois (1988) e Maynard (1992) sugeriu que o cálculo fosse feito sem o uso do K₂O (CIW e CIA-K, respectivamente), e desde então, tem sido usado. Quando o CIA-K aumenta, concomitantemente, ocorre um aumento na lixiviação (Ba/Sr) e a diminuição dos valores da perda de base. Altos valores de CIA-K refletem, altos valores de precipitação, indicando que os paleossolos foram submetidos a processos de alteração química.

A partir daí, outras climofunções foram elaboradas para medidas de precipitação e temperatura anual, (MAP) e (MAT), respectivamente (Sheldon *et al.* 2002). Kraus *et al.* (2013), baseados em características e propriedades morfológicas, elaboraram o índice de morfologia (MI) para identificar paleossolos com maior ou menor grau de umidade, indicativo das condições de drenagem do solo.

Normalmente, proxies diferentes são utilizados na geoquímica de paleossol, como o índice químico de alteração (CIA), o índice químico de intemperismo (CIW / CIA-K), argilosidade (C), lixiviação (L), proveniência (P) e calcificação (CAL). Todos os proxies mencionados medem a totalidade da intensidade do intemperismo e identificam processos pedogenéticos (Tabela 1).

Índices de intemperismo	Fórmula	Referência
CIA	$\text{CIA} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \times 100$	Nesbitt & Young (1982)
CIW ou CIA-K	$\text{CIA} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}} \times 100$	Harnois (1988) Maynard (1992)
Argilosidade (C)	Al / Si	Sheldon & Tabor (2009)
Proveniência (P)	Ti / Al	Sheldon & Tabor (2009)
Leaching (L)	Ba / Sr	Retallack (2001a, 2001b); Sheldon & Tabor (2009)
Calcificação (Cal)	(Ca+Mg) / Al	Retallack (2001a, 2001b)

Tabela 1 – Índices de intemperismo usado na avaliação dos paleossolos.

Estes índices de intemperismo baseados em dados geoquímicos dos paleossolos constituem ótimas ferramentas para estudos paleoclimáticos em sequências sedimentares antigas (Sheldon *et al.*, 2002; Driese & Ober, 2005; Retallack, 2005; Sheldon, 2006; Retallack, 2007; Cleveland *et al.*, 2008; Sheldon & Tabor, 2009; Nordt & Driese, 2010; Adams *et al.*, 2011; Kraus *et al.*, 2013; Brienza *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2016; Delgado *et al.*, 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A descrição micromorfológica das 20 lâminas delgadas foram realizadas. De maneira geral, observamos grãos angulosos de quartzo, plagioclásio e minerais opacos, indicando pouco retrabalhamento desses minerais presentes nos paleossolos. Outra feição encontradas em diversas lâminas foram os cutans de argilas, que indicam alto índice de pedogenese presente, em sua maioria, em horizontes superiores.

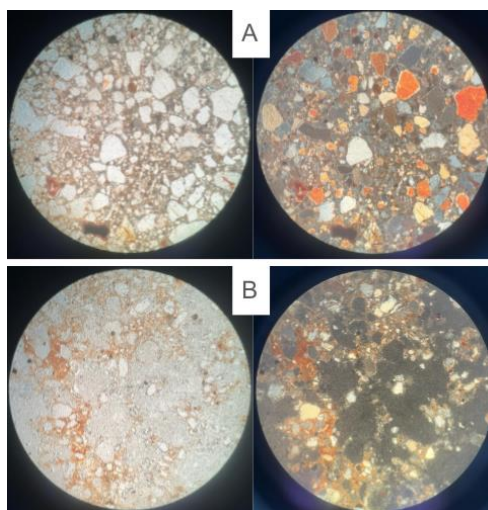


Foto 1: Foto das lâminas delgadas. (A) Lâmina 15, em PPL à esquerda e XPL à direita, onde são observados grãos Quartzo e Plagioclásios angulosos com alguns óxidos. (B) Lâmina 16, em PPL à esquerda e XPL à direita, além dos grãos opacos, podemos observar cutans de argila.

A partir das proxies geoquímicas descritas na tabela 1, podemos discutir quais são as principais características das amostras coletadas em campo analisando uma por uma e integrando as informações das quatro análises geoquímicas. O CIA-K nos informa qual o intemperismo do horizonte analisado, portanto, quanto mais próximo de cem, mais intemperizada e lixiviada é a amostra de paleossolos analisadas. Podemos separar as amostras em três grandes grupos neste proxy, onde temos um alto (<65%), médio (40% à 65%) e baixo teor de intemperismo (>40%). Onde, em sua maioria, as amostras estão localizadas em alto teor de intemperismo (amostras 1, 2,5, 10, 15 à 20) indicando que esses horizontes ocorreu um alto teor de intemperismo na sua pedogênese, enquanto o intemperismo químico é médio nas amostras 8,9 e 14, e baixo nas demais (3, 4, 6, 7, 11 à 13).

Segundo Sheldon & Tabor (2009), a razão Bases/Alumínio, nos dá uma ideia de paleoambiente valiosa. Sendo este proxy, comumente, separada em duas classes principais, os Alfissolos (> 0,5) e os Ultissolos (< 0,5), representando climas semiáridos à úmidos e climas temperados à úmidos, respectivamente. Portanto, de acordo com os dados geoquímicos usando a fórmula presente na tabela 1, todos os paleossolos estão classificados como Ultissolos.

A Calcificação do paleossolo pode estar associada a climas secos ou semiáridos. Em regiões com baixa umidade, a calcita tende a se acumular porque a evaporação é alta e as condições são favoráveis para a precipitação de carbonato de cálcio a partir da solução do solo, importante notar que as amostras com um baixo teor CIA-K e lixiviação tem os maiores valores de calcificação, indicando um período climático mais quente e seco, já quando observamos calcificação quase ausente e um grande teor de CIA-K é um indicativo de um clima quente e úmido. Já paleossolos com alto teor de dolomitização são frequentemente encontrados em áreas onde o clima é relativamente seco ou moderadamente úmido, que favorece a formação e preservação de rochas dolomíticas.

CONCLUSÕES:

Como podemos observar, as proxies apresentam informações valiosas sobre o ambiente de formação e cada um tem sua especificidade para construir uma reconstrução paleoambiental, sendo necessário uma integração das informações adquiridas. Caso tenha dados geoquímicos de elementos traços, a análise geoquímica seria mais completa e robusta, sendo possível realizar a proxy Ba/Sr que nos fornece, segundo Retallack (2001), a quantificação da lixiviação do paleossolo.

Como já discutido no tópico acima, podemos observar uma variação climática evidente quando analisamos, especialmente, CIA-K e Calcificação. Variando de um clima quente e seco para o clima seco e úmido quando CIA-K é baixo e calcificação alta, e CIA-K alta e calcificação baixa, respectivamente.

BIBLIOGRAFIA

- Batezelli, A. Arcabouço tectono-estratigráfico e evolução das Bacias Caiuá e Bauru no Sudeste brasileiro. **Brazilian Journal of Geology**, v. 40, n. 2, p. 265-285, 2010.
- Batezelli, A. Continental systems tracts of the Brazilian Cretaceous Bauru Basin and their relationship with the tectonic and climatic evolution of South America. **Basin Research**, v. 29, p. 1-25, 2017.
- Batezelli, A.; Ladeira, F.S.B. Stratigraphic framework and evolution of the Cretaceous continental sequences of the Bauru, Sanfranciscana, and Parecis basins, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 65, p. 1-24, 2016.
- Batezelli, A. et al. Facies and palaeosol analysis in a progradational distributive fluvial system from the Campanian–Maastrichtian Bauru Group, Brazil. **Sedimentology**, v. 66, n. 2, p. 699-735, 2019.
- Delgado, L. et al. Paleoenvironmental and paleoclimatic interpretation of the Late Cretaceous Marília Formation (Brazil) based on paleosol geochemistry. **Catena**, v. 180, p. 365-382, 2019.
- Delgado, L.; Batezelli, A.; Ladeira, F. S. B. Paleoenvironmental and Paleoclimatic Reconstruction Of Lower To Upper Cretaceous sequences of the Bauru Basin based on paleosol geochemistry and mineralogical analyses. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 569, p. 110328, 2021.
- Enzweiler J. & Vendemiato M.A. 2013. Estimativa da incerteza de medição na determinação de elementos maiores e menores em rochas silicáticas por espectrometria de fluorescência de raios X com resultados de controle de qualidade”. **Geochimica Brasiliensis**, 27(2): 152-160.
- Fernandes, L.A.; Magalhães-Ribeiro, C.M.M. Evolution and palaeoenvironment of the Bauru Basin (upper Cretaceous, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 61, p. 71-90, 2015.
- Goudie, A. S. (2004) Encyclopedia of Geomorphology. Taylor & Francis e-Library.
- Maynard, J.B. (1992) Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols. **Journal of Geology**, 100: 279-289.
- Monger, H.C., Gile, L.H., Hawley, J.W., Grossman, R.B. (1991) The Desert Project – an Analysis of Aridland Soil – Geomorphic Processes, Bulletin 798, University New Mexico
- Munsell Color. Munsell Soil Color Charts. Revised Edition. Macbeth, Division of Kollmorgen Instruments Corp. Newburgh, New York. 2009.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred, from major element chemistry of lutites. **Nature** 299, 715–717.
- Retallack, G. J. (2001) Soils of the Past – An introduction to paleopedology. **Unwin Hyman**, London, 520p.
- Santos, R. D.; Lemos, R. C.; Santos, H. G.; Ker, J. C.; Anjos, L. H. C. (2005) Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5ªEd. (revista e ampliada). Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 100p.
- Sheldon, N.D., Tabor, N.J. (2009) Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. **Earth-Science Reviews** 95, 1-52,
- Silva, M.L.; Batezelli, A.; Ladeira, F.S.B. Índices de intemperismo e evolução dos paleossolos da Formação Marília, Maastrichtiano da Bacia neocretácea Bauru. **Geochimica Brasiliensis**, v. 29, n. 2, p. 127-127, 2015.
- Silva, M.L.; Batezelli, A.; Ladeira, F.S.B. Uso de estimativas de paleoprecipitação e paleotemperatura em paleossolos cretáceos no Brasil: abordagem crítica. **Geochimica Brasiliensis**, v. 30, n. 1, p. 72-72, 2016.
- Silva, M.L.; Batezelli, A.; Ladeira, F.S.B. The mineralogy of paleosols in the Marília Formation and their importance in the environmental evolution of the Maastrichtian of the Bauru Basin in southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 47, p. 403-426, 2017.
- Vendemiato M.A & Enzweiler . 2001. Routine control of accuracy in silicate rock analysis by X-ray fluorescence spectrometry. Geostandards Newsletter, **The Journal of Geostandards and Geoanalysis** 25: 103-112.