



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP  
REPOSITÓRIO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E INTELLECTUAL DA UNICAMP

**Versão do arquivo anexado / Version of attached file:**

Versão do Editor / Published Version

**Mais informações no site da editora / Further information on publisher's website:**

<https://geobrasiliensis.emnuvens.com.br/geobrasiliensis/article/view/448>

**DOI: <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2016301072>**

**Direitos autorais / Publisher's copyright statement:**

©2016 by Sociedade Brasileira de Geoquímica. All rights reserved.

DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo

CEP 13083-970 – Campinas SP

Fone: (19) 3521-6493

<http://www.repositorio.unicamp.br>

# Uso de estimativas de paleoprecipitação e paleotemperatura em paleossolos cretáceos no Brasil: abordagem crítica

Márcio Luiz da Silva<sup>1,2\*</sup>  
Alessandro Batezelli<sup>2</sup>  
Francisco Sergio Bernardes Ladeira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal Sul de Minas Gerais  
marcgeo10@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Departamento de Geologia e Recursos Naturais  
Universidade Estadual de Campinas  
abatezelli@ige.unicamp.br

<sup>3</sup> Departamento de Geografia  
Universidade Estadual de Campinas  
fsbladeira@ige.unicamp.br

\* Autor para Correspondência

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo discutir a aplicabilidade e as limitações do uso de estimativas de paleoprecipitação e paleotemperatura em paleossolos da Formação Marília, Neocretáceo da Bacia Bauru. Foram descritas três seções (A1, A2 e A3), compreendendo nove perfis. Os elementos maiores, menores e traços foram determinados por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e as estimativas se basearam em equações exponenciais e regressões lineares. Na Formação Marília, os paleossolos desenvolvidos sobre arenitos apresentam horizontes argílicos (Btk e Bt) e carbonáticos (Bk) com distintos graus de cimentação, constituindo-se calcrites em sua maioria. Os paleossolos com Bk apresentaram valores médios de 420 e 500 mm/ano, respectivamente para as seções Botucatu (A1) e Garça (A3). Nos paleossolos com Bt, a média de paleoprecipitação foi 881 mm/ano e a média anual de paleotemperatura foi de 10 °C. Paleossolos com Btk revelaram valores médio de precipitação de 605 mm/ano. As variações de precipitação, tomadas individualmente e indutivamente, proporcionaram a definição de três intervalos paleoclimáticos para o Maastrichtiano da Bacia Bauru. No entanto, a variabilidade dos atributos verticais e horizontais dos solos, bem como o uso exclusivo dessa técnica como principal método, inviabilizaram a utilização das climofunções, que não alcançaram consenso, em estudos paleoclimáticos.

*Palavras-Chave:* Calcrite, Climofunções, Paleoclimas, Bacia Bauru, Formação Marília.

## Abstract

This paper aims to discuss the applicability and limitations of paleoprecipitation and paleotemperature estimate in paleosols of Marília Formation, Upper Cretaceous of the Bauru Basin. Three sections have been described (A1, A2 and A3) comprising nine profiles. The major, minor and trace elements were determined by X-Ray Fluorescence and the estimative were based on exponential equations and linear regressions. In the Marília Formation the paleosols were developed in sandstones and are characterized by clay horizons (Btk and Bt) and carbonate horizons (Bk) with different degrees of cementation (calcretes). The paleosols with Bk showed average values of 420 and 500 mm/year, respectively, for the Botucatu sections (A1) and Garça (A3). In the paleosols with Bt, the average of the paleoprecipitations 881 mm/year and the average annual of the paleotemperature was 10° C. Paleosols with Btk showed average values of the paleoprecipitation of 605 mm/year. Precipitation variations, taken individually and inductively, provided the definition of three paleoclimate intervals for the Maastrichtian of the Bauru Basin. However, the variability of both vertical and horizontal soil properties and the use of this technique as the primary method unfeasible the use of climofunções, which have not reached consensus in paleoclimate study.

*Keywords:* Calcrite, Climofunctions, Paleoclimate, Bauru Basin, Marília Formation

## 1. INTRODUÇÃO

Diversos índices e estimativas vêm sendo amplamente utilizados em estudos envolvendo a reconstituição de elementos paleoclimáticos, através de informações contidas nos horizontes de paleossolos (Sheldon et al. 2002, Driese & Ober 2005, Retallack 2005, Sheldon 2006, Retallack 2007, Cleveland et al. 2008, Sheldon & Tabor 2009, Dal’Bó & Basilici 2010, Nordt & Driese 2010, Adams et al. 2011, Kraus et al. 2013, Pereira et al. 2015). Em paleossolos cretáceos, essas funções têm sido empregadas com o objetivo de estimar variações de precipitação e temperatura (Therrien 2005, Retallack 2007, Sheldon & Tabor 2009, Dal’Bó & Basilici 2010, Nordt & Driese 2010, Pereira et al. 2015). No entanto, devido ao uso indiscriminado, muitas dessas climofunções não têm alcançado consenso.

O uso dessas estimativas implica a consideração de algumas questões, em maior profundidade, destacando as particularidades inerentes à natureza dessas técnicas; a aplicação dessa técnica como única ou principal ferramenta em estudos paleoclimáticos; a grande variabilidade vertical e horizontal dos solos; a falibilidade dos resultados dessas estimativas em horizontes subsuperficiais de paleossolos compostos e poligenéticos.

Chama-se a atenção aqui para a possibilidade de se inferir mudanças paleoclimáticas utilizando única e exclusivamente as técnicas baseada em climofunções, o que constitui um ponto crítico, visto que essas estimativas não permitem sozinhas, tais inferências. Para a inferência de mudanças paleoclimáticas através de estudos paleopedológicos, é preciso conjugar diferentes métodos e técnicas, principalmente envolvendo macro e micromorfologia, mineralogia e geoquímica, fator que irá conferir maior precisão e confiabilidade aos resultados (Catt 1990, Retallack 2001, Sheldon & Tabor 2009, Kraus et al. 2013).

Quanto à variabilidade vertical do solo, é preciso levar em consideração que a constituição dos seus horizontes no perfil nem sempre reflete mudanças climáticas. Em paleossolos cretáceos com horizonte Bk, por exemplo, a concentração de carbonatos em determinados pontos do horizonte ou em determinados horizontes subsuperficiais, não pode ser considerado, a *priori*, como indícios de mudanças paleoclimática,

usando somente essas estimativas. Considerando o princípio do uniformitarismo, em solos tropicais atuais com concentrações de carbonatos, o acúmulo dessas substâncias em diferentes horizontes subsuperficiais num mesmo perfil não corresponde, necessariamente, a variações climáticas e sim a um processo específico de formação: a calcificação (Birkeland 1999, Buol et al. 1997, Breemen & Buurman 2002). O processo de calcificação pode causar a concentração de  $\text{CaCO}_3$  em diferentes horizontes subsuperficiais, deixando outros pontos do perfil sem ou com poucos vestígios da calcificação. Assim, ao se considerar dois horizontes subsuperficiais de um mesmo perfil de solo, um com concentração carbonática e outro não, o cálculo de precipitação e temperatura apontará duas condições climáticas distintas: um clima semiárido e outro tropical, em um único perfil de solo, o que necessariamente não constitui um fato.

É preciso levar em conta também a grande variação lateral dos solos, principalmente numa topossequência. Em diferentes posições do relevo, sob um mesmo clima, é possível encontrar diferentes ordens de solos (Jenny 1994, Birkeland 1999, Buol et al. 1997, Breemen & Buurman 2002, Melo & Alleoni 2009). Nessa situação, a variabilidade de solos se dá em função da topografia e isso não necessariamente acusa mudanças climáticas. Como nem sempre é possível reconstituir topossequência utilizando paleossolos, a aplicação das climofunções de paleoprecipitação e paleotemperatura pode ficar muito comprometida, se utilizadas sem o apoio de outras técnicas.

Em paleossolos compostos e poligenéticos da Formação Marília (Neocretáceo da Bacia Bauru), os resultados do emprego das climofunções têm divergido constantemente com os resultados de outras técnicas (macromorfologia, micromorfologia, mineralogia), gerando interpretações conflitantes sobre a dinâmica paleoclimática do Maastrichtiano no sudeste do Brasil (Junior 2011, Pereira 2014).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi discutir a aplicabilidade e as limitações do uso de estimativas de paleoprecipitação e paleotemperatura em paleossolos da Formação Marília, Neocretáceo da Bacia Bauru.

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO DA BACIA BAURU

A Bacia Bauru situada no sudeste brasileiro, ocupa uma área de aproximadamente 330.000 km<sup>2</sup>, abrangendo o centro-oeste de São Paulo, nordeste do Mato Grosso do Sul, sudeste do Mato Grosso, sul de Goiás e oeste de Minas Gerais (Figura 1). Essa bacia possui formato praticamente elítico alongado na direção norte/nordeste, sendo constituída principalmente por depósitos siliciclásticos continentais (Batezelli 2003).

De acordo com Batezelli (2003), os processos erosivos responsáveis pela atual configuração dos limites da Bacia Bauru estão relacionados ao evento de reestruturação tectônica do Terciário, marcado em sua borda oriental pelo levantamento da Serra do Mar e Soerguimento do Alto Paranaíba.

A origem da bacia intracratônica Bauru, de idade cretácea superior (Santoniano-Maastichtiano) e desenvolvida acima das efusões basálticas (Formação Serra Geral), é considerada ser ligada à subsidência termal por causa da enorme espessura dos basaltos, sendo que a parte mais espessa da sucessão está localizada em cima do depocentro da Formação Serra Geral (Riccomini 1995, 1997). Segundo Fernandes & Coimbra (1996) e Fernandes (2004), a Bacia Bauru formou-se no início do Neocretáceo, após a ruptura do continente gondwânico, no centro-sul da Plataforma Sul-Americana. Fernandes (2004) salienta que a bacia acumulou uma seqüência sedimentar predominantemente arenosa, em clima semi-árido a árido, que hoje tem cerca de 300 m de espessura máxima preservada.

Segundo Batezelli (2015) a Bacia Bauru se desenvolveu no Cretáceo Superior na pós-ruptura do continente gondwânico, e seu preenchimento ocorreu em clima com variações entre semi-árido e árido, entre o Campaniano e o Maastichtiano.

Através da análise de fácies, elementos arquitetônicos e paleocorrentes, Batezelli et al. (2007) concluíram que os depósitos do Grupo Bauru foram formados a partir de fluxos unidirecionais e gravitacionais de alta energia, associados a porções proximais e intermediárias de leques aluviais advindos do norte e nordeste.

A Bacia Bauru é dividida em dois grupos: Grupo Caiuá e Grupo Bauru (Figuras 1 e 2). Todavia, existem dois diferentes pontos de vista sobre a posição litoestratigráfica desses dois grupos. Autores como Fernandes & Coimbra

(1996, 2000) e Fernandes (2004) sustentam que os dois grupos são contemporâneos. Outros autores (Fulfaro & Perinotto 1996, Paula e Silva et. al. 2005, Batezelli 2010, 2015) colocam o Grupo Caiuá na porção inferior da bacia, separado do Grupo Bauru por uma discordância estratigráfica, sinalizada por um paleossolo muito evoluído (Geossolo Santo Anastásio) apontado por Fulfaro et al. (1999). Estudos recentes realizados por Batezelli et al. (2007) e Batezelli (2010, 2015) demonstraram que dois grupos não são contemporâneos (Figura 2), solucionando as controvérsias sobre a estratigrafia da bacia.

Conforme Batezelli (2003, 2010), o Grupo Bauru no Estado de São Paulo é composto da base para o topo pelas formações Araçatuba, Adamantina (Vale do Rio do Peixe) e Marília (Membro Echaporã). Esse autor afirma que a Formação Araçatuba foi formada em ambiente lacustre que atuava como nível de base recebendo sedimentos do sistema fluvial (gerador da Formação Adamantina), e que em determinado momento foi colmatado. A colmatação ocorreu pelo avanço progradacional de um sistema aluvial dominando por rios entrelaçados que deu origem à Formação Marília.

A evolução sedimentar desse sistema aluvial foi marcada por períodos de sedimentação fluvial e retrabalhamento eólico, intercalados com períodos de não deposição (Batezelli 2010, 2015). Durante os momentos de parada na sedimentação a planície aluvial seria tomada por vegetação e desenvolvimento de solos. Dessa forma, a Formação Marília é constituída por uma sucessão de depósitos e paleossolos que registram eventos de sedimentação e pedogênese durante o Maastichtiano da Bacia Bauru.

Na Formação Marília os paleossolos apresentam horizontes argílicos (Btk e Bt) e carbonáticos (Bk) com distintos graus de cimentação, constituindo-se calcretes em sua maioria. A distribuição irregular e diferentes espessuras dos perfis estão relacionadas ao tipo de substrato (material parental), condições hidrológicas, topográficas e biológicas, bem como, o tempo de exposição dos depósitos aos agentes intempéricos. Dessa forma, as discussões aqui apresentadas chamam a atenção para a importância que esses fatores desempenham na análise paleoclimática em detrimento de cálculos e estimativas indiscriminadas.

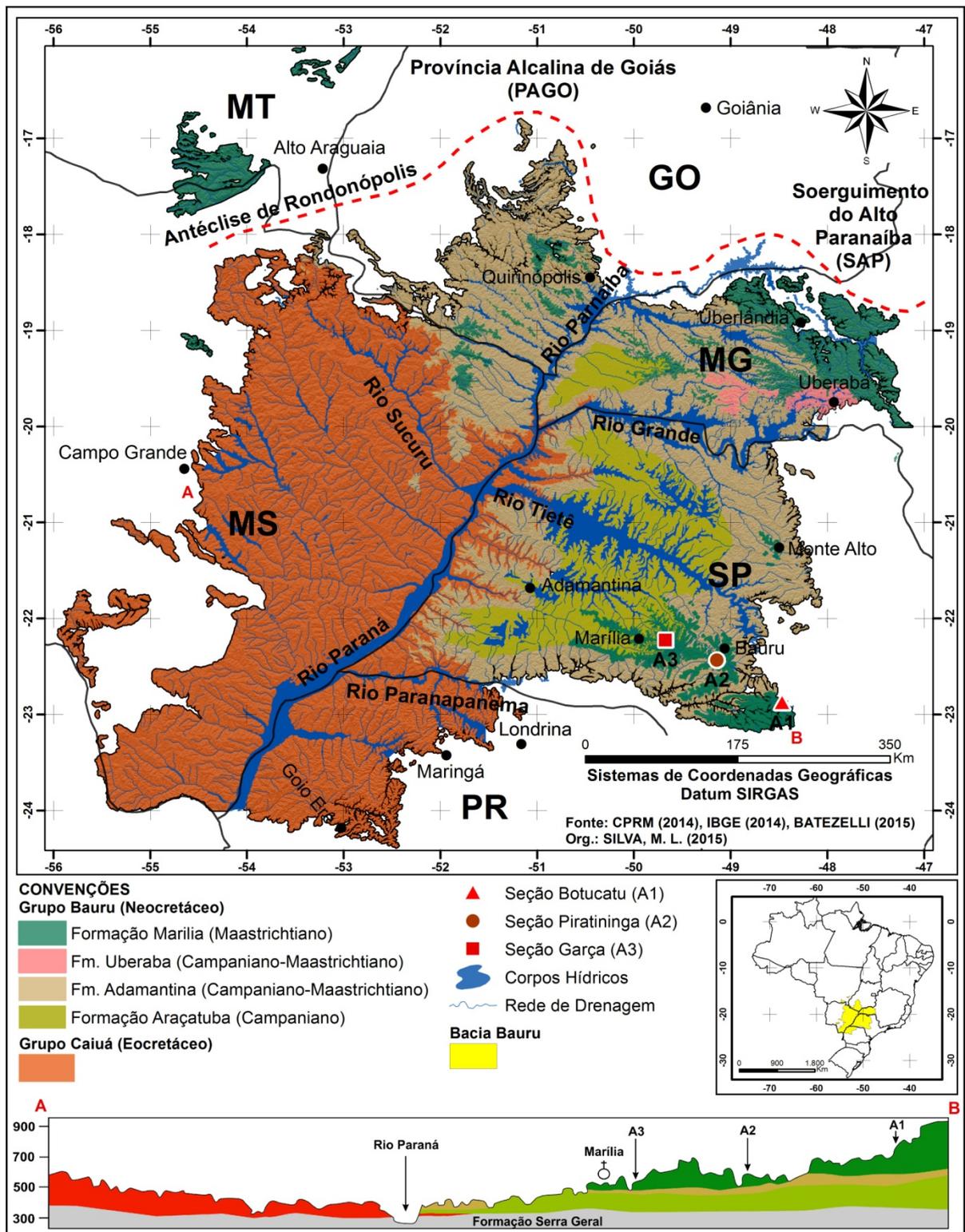
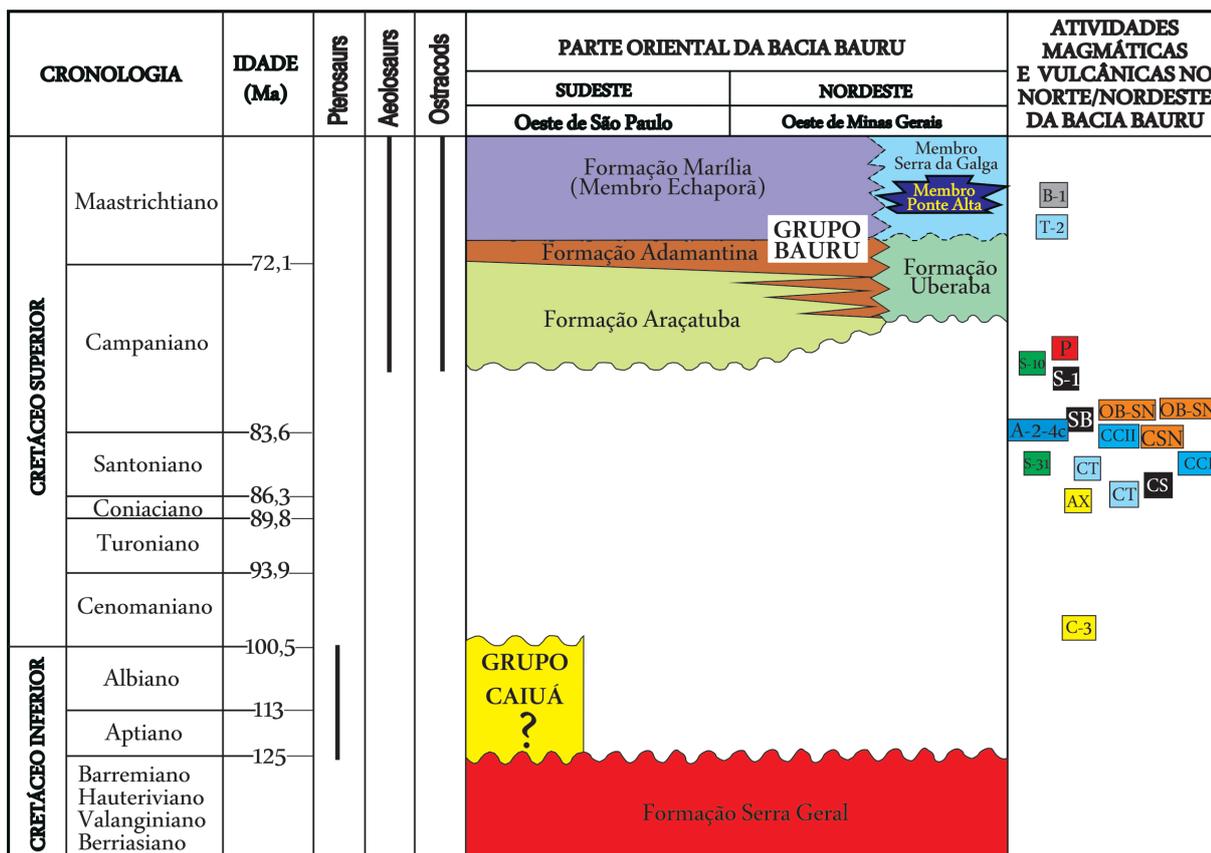


Figura 1. Mapa litoestratigráfico da Bacia Bauru e área de estudo.



**Figura 2.** Carta cronoestratigráfica do Cretáceo da porção oriental da Bacia Bauru, com base em Amaral et al. 1967 (amostra CSN), Hasui & Cordani 1968 (amostras AX, C-3, S-10, S-31, A-C2-4, OB-SN, SB, S-1, P, T-2, B-1), Sonoki & Garda 1988 (amostras CT, CS, CCI), Machado Junior 1992 (amostra CCII), Guimarães et al. 2012 e Fragoso et al. 2013 (pterossauris), Gobbo-Rodrigues 2001 e Dias-Brito et al. 2001 (ostracódes), Santucci & Bertini 2001 e Martinelli et al. 2011 (Allosaurus).

Fonte: Batezelli (2015).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Caracterização dos paleossolos e amostragem

Na caracterização, foi identificado estrutura, horizonte e marcas de raízes, os três principais atributos de reconhecimento de paleossolos (Andreis 1981, Retallack 1988, Catt 1990, Retallack 2001). Para a definição dos horizontes, foram utilizadas características como textura, estrutura, cor, espessura e profundidade dos horizontes, tipos de contatos entre horizontes de paleossolos e sedimentos, presença, tipo e dimensões de agregados (*peds*), presença e tipo de películas (*cutans*), presença e tipo de nódulos ou

cimentação, bioturbações, presença ou não de mosqueamento (*mottling*), tipo, forma e percentual de traços de raízes, presença ou não de gleização e de superfícies de fricção (*slickensides*).

Foram descritas três seções (A1, A2 e A3) da Formação Marília (Figura 1) e coletada amostras de nove perfis. Horizontes carbonáticos (Bkm) e argilosos (denominados de “Btkm” e “Bt”) foram identificados nos paleossolos da área de estudo.

#### 3.2. Análises geoquímicas

Os elementos maiores, menores e traços das amostras totais, sem separação granulométrica, foram determinados pela

espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). A partir desses dados foram realizados cálculos baseados na bibliografia especializada.

#### 3.3. Estimativas das taxas de precipitação e temperatura

O índice de intemperismo (CIA-K) e as climofunções MAP (precipitação média anual) e MAT (temperatura média anual) foram determinados a partir das propostas de Sheldon et

al. (2002), Driese & Ober (2005), Retallack (2005, 2007), Cleveland et al. (2008), Sheldon & Tabor (2009), Nordt & Driese (2010), Adams et al. (2011) e Kraus et al. (2013).

Em paleossolos com horizonte Bk, a estimativa da precipitação média anual (MAP) se baseou na relação entre profundidade (D) e índice de precipitação, descrita pela primeira vez por Jenny (1994). Essa relação foi revista e expandida por Retallack (2005), que a aplicou a horizontes cálcicos a partir da equação  $MAP (mm) = 137,24 + 6,45D + 0,013D^2$ , na qual o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é 0,52 e o desvio padrão (SE) é igual a  $\pm 147$  mm. Essa equação vem sendo utilizada em estudos que procuram estabelecer estimativas de paleoprecipitação em paleossolos que apresentam o horizonte diagnóstico Bk (Cleveland et al. 2008, Sheldon & Tabor 2009). Na Formação Marília, a equação foi aplicada a 3 perfis de paleossolos truncados, sem o horizonte A preservados, das Seções Botucatu (A1) e Garça (A3).

Para a estimativa da MAP em paleossolos com horizonte Bt, o método empregado consiste na aplicação de uma equação exponencial que relaciona os índices de precipitação (MAP) com os índices de alteração química (CIA-K), proposta por Sheldon et al. (2002) ( $MAP_1$ ). Para o cálculo da  $MAP_1$ , inicialmente se determinou o índice CIA-K, sugerido por Maynard (1992), que é igual a  $100[Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)]$ . Posteriormente se aplica a equação  $MAP_1 (mm) =$

$221e^{0,0197(CIA-K)}$ , na qual  $R^2 = 0,72$  e SE é  $\pm 182$  mm. Uma equação alternativa, com relação linear ( $MAP_2$ ) foi também proposto por Sheldon et al. (2002). Nessa função, definida como  $MAP_2 (mm) = 14,265(CIA-K) - 37,632$ , o coeficiente de determinação possui uma acurácia levemente superior ( $R^2 = 73$ ). Altos valores de CIA-K refletem altos valores de precipitação, indicando que os solos foram submetidos a intensos processos de alteração química. No presente estudo, ambas as equações foram aplicadas a 4 perfis de paleossolos compostos e poligenéticos, truncados e sem o horizonte A preservados, da Seção Garça (A3) e Piratininga (A2).

O índice de temperatura média anual (MAT) foi determinado somente para paleossolos com Bt, segundo a metodologia apresentada por Sheldon & Tabor (2009). Nessa função, determinada por  $MAT (^\circ C) = -18,516(S) + 17,298$ , com  $R^2 = 0,37$  e  $SE = \pm 4,4$   $^\circ C$ , S é definido por  $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ . A equação relaciona, de maneira inversamente proporcional, salinização e temperatura, e tem sua aplicação restrita a paleossolos de planícies e com tempo relativo de formação menor que 100 ka (Sheldon & Tabor 2009). A estimativa de paleotemperatura foi aplicada também aos 4 perfis de paleossolos compostos e poligenéticos, com horizonte Bt.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Estimativas da média de paleoprecipitação e paleotemperatura em paleossolos da Formação Marília

As estimativas de paleoprecipitação dos 7 horizontes com Bk referentes aos 3 perfis de paleossolos encontram-se na tabela 1. As taxas de precipitação média anual variaram entre 342 a 611 mm/ano.

Os paleossolos com horizonte Bk apresentaram valores médios de 420 e 500 mm/ano, respectivamente para as seções Botucatu e Garça (Tabela 1).

**Tabela 1.** Estimativa da média de paleoprecipitação dos horizontes Bk da Seção Botucatu (A1) e Garça (A3).

Seção Botucatu (A1)				Seção Garça (A3)			
A (PH)	P (cm)	E (cm)	MAP (mm)	A (PH)	P (cm)	E (cm)	MAP (mm)
P1Bk1	0-42	42	431,072	P8Bk1	200 - 265	65	611,415
P1Bk2	42-81	39	408,563	P8Bk2	265 - 326	61	579,063
				P8Bk/Ck	326 - 353	30	342,44
				P9Btk	550 - 603	53	515,607
				P9Btk/C	633-678	45	453,815

A: Amostra; PH: Perfil e Horizonte; P: Profundidade; E: Espessura; MAP: Precipitação média anual. A função para o cálculo de MAP é uma fórmula específica para paleossolos com horizontes Bk.

$MAP (mm) = 137,24 + 6,45D + 0,013D^2$ , na qual  $R^2 = 0,52$  (coeficiente de determinação) e  $SE = \pm 147$  mm (desvio padrão).

As estimativas de paleoprecipitação apresentaram valor máximo de 1.195 mm/ano para os seis horizontes Bt da Seção Piratininga (Tabela 2). Os valores de paleotemperaturas não oscilaram muito (Tabela 2) para os 6 horizontes relativo aos 3 perfis da seção.

Nos paleossolos com Bt a média de paleoprecipitação foi 881 mm/ano com desvio padrão de 182 mm e a média anual de paleotemperatura foi de 10  $^\circ C$  com desvio padrão de 4,4  $^\circ C$  (Tabela 2).

**Tabela 2.** Estimativa da média de paleoprecipitação e paleotemperatura dos horizontes Bt da Seção Piratininga (A2).

A (PH)	P (cm)	PM (cm)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CIA-K	MAP <sub>1</sub> (mm)	MAP <sub>2</sub> (mm)	(Na+K)/Al	MAT (°C)
P4Bt1	1114-1192	1153	7,36	0,66	2,2	0,2	82,79	1129,04306	1143,36735	0,362	10,59521
P5Bt1	1512-1548	1530	4,35	0,31	1,6	0,12	85,11	1181,84222	1176,46215	0,436	9,225024
P5Bt2	1548-1610	1579	4,05	0,29	1,4	0,09	85,71	1195,89448	1185,02115	0,408	9,743472
P5Btc	1610-1651	1630	3,96	0,28	1,4	0,1	85,46	1190,01918	1181,4549	0,413	9,650892
P7Btk1	1828-1872	1850	3,49	8,22	1,2	0,06	18,83	320,253766	230,97795	0,4	9,8916
P7Btkc	1872-1935	1903	2,61	12,3	0,8	0,06	10,43	271,410844	111,15195	0,386	10,15082

A: Amostra; PH: Perfil e Horizonte; P: Profundidade; PM: Profundidade média; CIA-K =  $100[Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)]$ ; MAP: Precipitação média anual; MAT: Temperatura média anual. As funções para os cálculos de MAP<sub>1</sub> e MAP<sub>2</sub> são fórmulas específicas para paleossolos com horizonte Bt.

MAP<sub>1</sub> (mm) =  $221e^{0,0197(CIA-K)}$ , na qual R<sup>2</sup> = 0,72 (coeficiente de determinação) e s = ± 182 mm (desvio padrão). MAP<sub>2</sub> (mm) =  $14,265(CIA-K) - 37,632$ , que possui acurácia levemente superior (R<sup>2</sup> = 73).

A função para o cálculo de MAT é uma fórmula específica paleossolos com horizonte Bt.

MAT (°C) =  $-18,516(S) + 17,298$ , onde S =  $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ , com R<sup>2</sup> = 0,37 e desvio padrão = ± 4,4 °C.

As equações aplicadas aos horizontes Btk, por possuírem feições com iluviação de argila, apresentaram valores de paleoprecipitação entre 444 e 861 mm/ano e taxas de paleotemperaturas variando entre 10,5 a 11,8 °C (Tabela 3).

Os paleossolos com Btk da Seção Garça

(perfil 9) apresentaram valores médio de precipitação de 605 mm/ano segundo a estimativa MAP<sub>1</sub> e 665 mm/ano pela estimativa MAP<sub>2</sub>, com média de paleotemperatura de 11,18 °C (Tabela 3).

**Tabela 3.** Estimativa da MAP e MAT de paleossolos com horizonte Btk da Seção Garça (A3).

A (PH)	P (cm)	PM (cm)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CIA-K	MAP <sub>1</sub> (mm)	MAP <sub>2</sub> (mm)	(Na+K)/Al	MAT (°C)
P9Btk	550-603	576	7,01	6,91	1,77	0,1	35,516	444,8903741	469,00374	0,2967	11,8043028
P9Btk/C	633-678	656	6,82	2,04	2,02	0,18	63,002	764,5612207	861,09153	0,364	10,558176

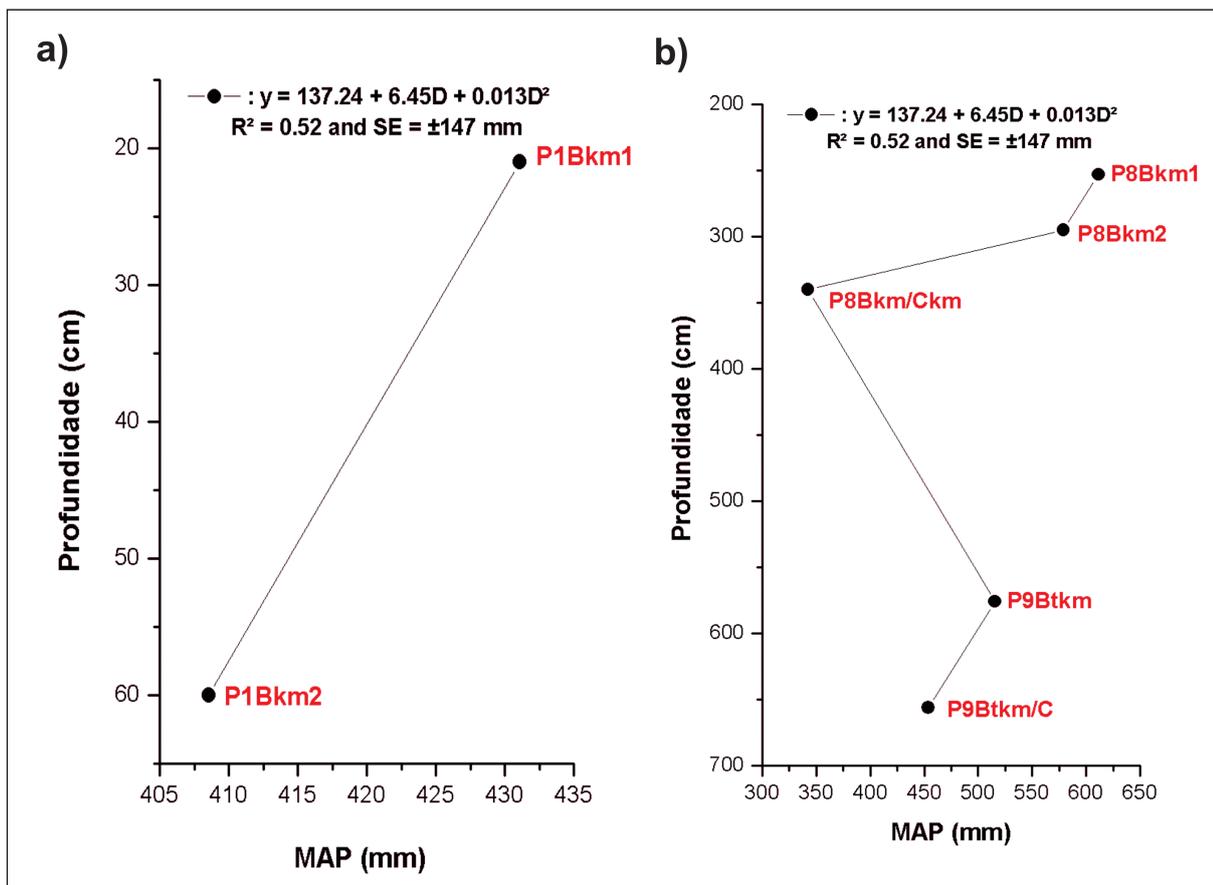
A: Amostra; PH: Perfil e Horizonte; P: Profundidade; PM: Profundidade média; CIA-K =  $100[Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)]$ ; MAP: Precipitação média anual; MAT: Temperatura média anual. As funções para os cálculos de MAP<sub>1</sub> e MAP<sub>2</sub> são fórmulas específicas para paleossolos com horizonte Bt. MAP<sub>1</sub> (mm) =  $221e^{0,0197(CIA-K)}$ , na qual R<sup>2</sup> = 0,72 (coeficiente de determinação) e s = ± 182 mm (desvio padrão). MAP<sub>2</sub> (mm) =  $14,265(CIA-K) - 37,632$ , que possui acurácia levemente superior (R<sup>2</sup> = 73). A função para o cálculo de MAT é uma fórmula específica paleossolos com horizonte Bt. MAT (°C) =  $-18,516(S) + 17,298$ , onde S =  $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ , com R<sup>2</sup> = 0,37 e desvio padrão = ± 4,4 °C.

#### 4.2. Uso de estimativas em paleossolos cretáceos no Brasil

Paleossolos com horizonte Bk apresentaram os menores índices de precipitação (342 mm), enquanto os com Bt tiveram as maiores taxas (1.196 mm) e a menor temperatura média (9,22 °C) (Tabelas 1 e 2), sugerindo aumento da drenagem na evolução paleoclimática do Maastrichtiano da Bacia Bauru.

Através da aplicação do processo indutivo e baseado somente no elemento precipitação, a variação pluviométrica (Figura 3) da Seção

Botucatu (408 a 431 mm) e da Seção Garça (342 a 611 mm) possibilitariam a classificação do clima como sendo árido a semiárido para a região, segundo a classificação atual de Köppen (Ayode 2004). No entanto, essa relação não é linear e nem direta, primeiro por se tratar somente de um elemento do clima como fundamento, e segundo, por se tratar somente de duas seções da Formação Marília.



**Figura 3.** Taxas de precipitação média anual (MAP) para paleossolos com horizonte Bk. a) Climofunção de horizontes de paleossolos da Seção Botucatu (A1); b) Climofunção de horizontes de paleossolos da Seção Garça (A3).

Na Seção Piratininga, as taxas pluviométricas máximas foram de 1.196 e de 1.185 mm/ano, respectivamente segundo as estimativas  $MAP_1$  e  $MAP_2$  (Tabela 2, Figura 4a). Esse fator precipitação, acima de 1000 mm/ano, classificaria o clima dessa seção (A2), segundo a proposta de Köppen, como quente e úmido ou clima tropical (Ayoade 2004). Baseado nessa interpretação, os valores encontrados para os paleossolos com horizonte Bt refletem um momento distinto de evolução da Formação Marília, com maiores graus de drenagem e maiores taxas de precipitação, intemperismo e lixiviação.

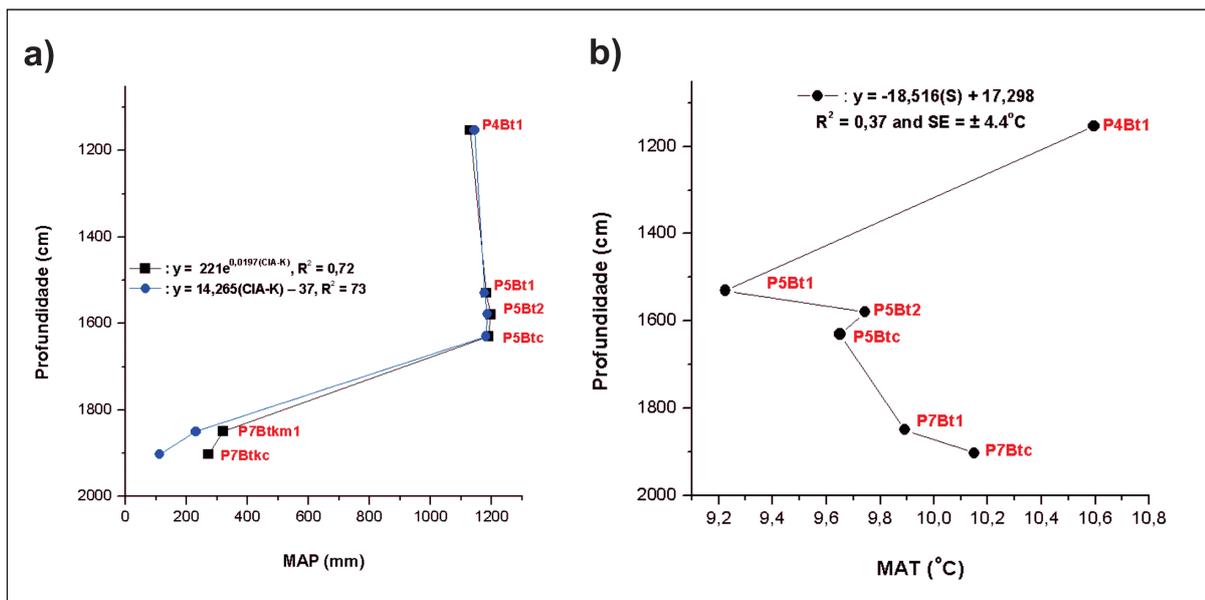
Entretanto, a variação na temperatura (9,8 a 10,6 °C) não atende aos critérios para a determinação do clima como sendo tropical na Seção Piratininga (Tabela 2, Figura 4b).

As temperaturas médias encontradas nas Seções Piratininga e Garça (Tabelas 1 e 3, Figuras 5 e 6a) são muito baixas, contrariando as condições atuais de temperaturas propícias à formação de solos como horizonte Bt (Birkeland 1999, Buol et al. 1997, Breemen & Burman 2002, Melo & Alleoni 2009).

Segundo Retallack (2001) e Therrien (2005), estimativas anormalmente baixas de temperatura obtidas para paleossolos, como os

perfis analisados nesse trabalho, não indicam um clima frio, mas sim um paleoclima caracterizado por uma forte sazonalidade de precipitação. De acordo com Sheldon & Tabor (2009), elementos alcalinos (K e Na) normalmente são acumulados no deserto, apresentando baixos valores de MAT (mesmo que apresentem sazonalidade ou amplitude térmica diária). Assim, paleossolos com altas taxas de salinização devem ter baixos valores de MAT (Sheldon & Tabor 2009). Para os autores, essa climofunção é aplicável somente a paleossolos formados em relevos de planícies e que possuam tempo relativo de formação compatível com solos moderados (< 100 ka). Nesse sentido, essas condições de clima desértico e essas particularidades envolvendo a posição no relevo e o tempo de formação, inviabilizam a aplicação do índice de temperatura média anual (MAT) aos paleossolos da Formação Marília.

As climofunções para horizonte Bt aplicadas aos paleossolos com horizonte Btk da Seção Garça, apresentaram média de precipitação entre 444 e 861 mm/ano (Tabela 3, Figura 6b). Isso permitiria, num processo indutivo e baseado única e exclusivamente no elemento precipitação, classificar o clima como de transição entre o semiárido e tropical.



**Figura 4.** Taxas de precipitação média anual (MAP) e temperatura média anual (MAT) para paleossolos com horizonte Bt da Seção Piratininga (A2). A) Climofunções da paleoprecipitação; b) Climofunção da paleotemperatura.

Todavia, tais taxas de precipitação média anual não possibilitariam o desenvolvimento de paleossolos com horizonte Bt concomitante com a preservação de horizontes carbonáticos (Birkeland 1999, Buol et al. 1997, Paquet & Ruellan 1997, Breemen & Buurman 2002, Melo & Alleoni 2009, Brady & Weil 2013).

É preciso ressaltar que esses dados são pontuais, não permitindo maiores generalizações de natureza paleoclimática. Além do mais, é preciso considerar a variação vertical e horizontal no desenvolvimento pedogênico, que propicia uma heterogeneidade de constituintes ao longo dos horizontes no perfil (iluviação, eluviação) e permite que solos de diferentes ordens se formem em uma única vertente, sob um mesmo clima.

Dal'Bó & Basiliaci (2010) encontraram precipitação média de 240 mm/ano para horizonte Bk e de 824 mm/ano para horizonte Bt, em paleossolos da Formação Marília. Esses autores associaram esses valores a dois momentos distintos de evolução paleoclimática durante a deposição e desenvolvimento de solos na Formação Marília. Contudo, correlacionando esses dados com resultados de análises macromorfológica, micromorfológica, mineralógica e geoquímica, concluem que o

regime climático dominante durante a evolução da Formação Marília foi o semiárido, devido à preponderância dos carbonatos nos horizontes de paleossolos (Dal'Bó & Basiliaci 2010).

Em sequências poligenéticas na Formação Marília, Pereira et al. (2015) apresentaram uma média de paleoprecipitação de 490 mm/ano para paleossolos com horizonte Bt, e afirmaram que esses valores refletem mudanças verticais nas propriedades do solo e são produtos de alterações na drenagem do perfil. Porém, nesse mesmo estudo, valores muito discrepantes de paleoprecipitação foram apresentados para paleossolos com horizonte Btk (0 a 1000 mm). Ao mesmo tempo, a maioria dos paleossolos com horizonte Bt tiveram valores de precipitação muito inferiores aos com horizonte Btk (Pereira 2014, Pereira et al. 2015), favorecendo diversos questionamentos sobre o uso dessa técnica.

A recorrente falibilidade e a incompatibilidade dos resultados dessas estimativas, em horizonte B de paleossolos compostos e poligenéticos, com resultados de análises macro e micromorfológicas, fazem com que essas estimativas baseadas em equações e regressões não alcancem consenso, quando não complementadas com outras técnicas.

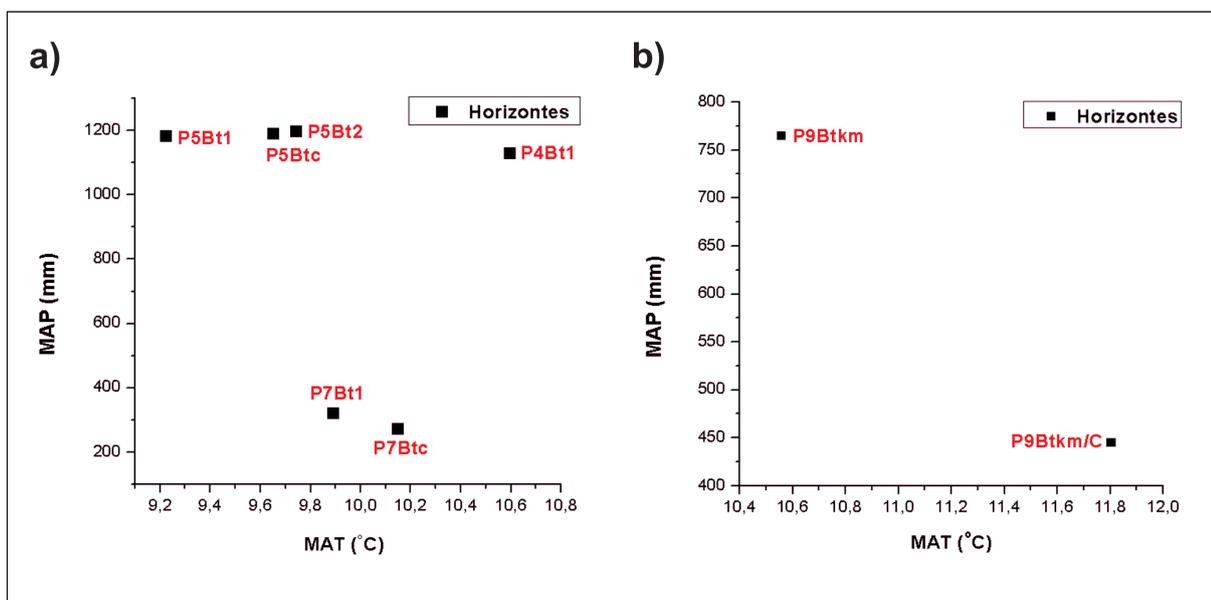


Figura 5. Relação entre as taxas de precipitação média anual (MAP) e temperatura média anual (MAT). a) Seção Piratinga (A2); b) Seção Garça (A3).

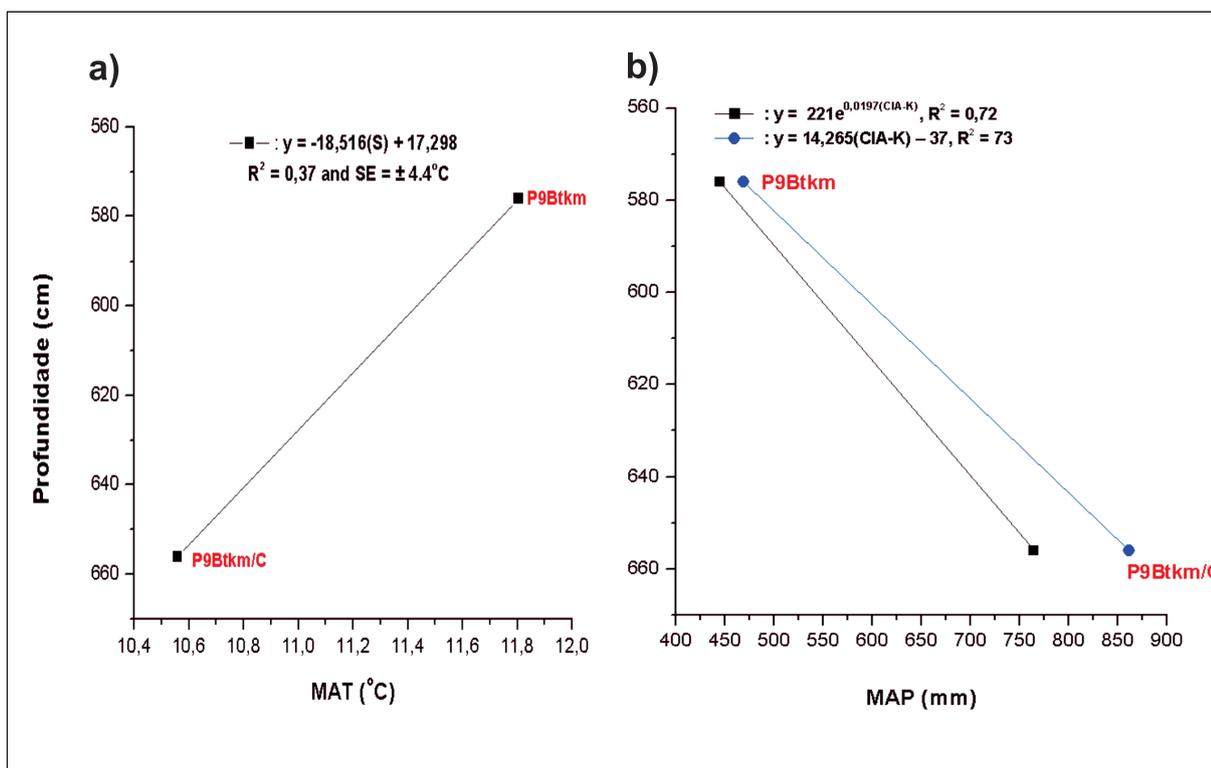


Figura 6. Taxas de temperatura média anual (MAT) e de precipitação média anual (MAP) para paleossolos com horizonte Btk da Seção Garça (A3). A) Climofunção da paleotemperatura; b) Climofunções da paleoprecipitação.

## 5. CONCLUSÕES

Em estudos paleopedológicos as técnicas que tem como base as climofunções para estimativas de precipitação e temperatura devem ser vistas como algo complementar ou acessório na metodologia, desde que comunguem com os resultados da macro e micromorfologia, e num

segundo plano, com os resultados mineralógicos dos paleossolos.

Nos paleossolos da Formação Marília, as taxas de precipitação como as de temperatura média anual mostraram incompatibilidade, inviabilizando o uso das últimas na Bacia Bauru.

As variações de precipitação, tomadas individualmente e indutivamente, proporcionaram a definição de três intervalos paleoclimáticos para o Maastrichtiano da Bacia Bauru, apontando o predomínio do clima semiárido intercalado com um clima quente e úmido, e momentos de transição entre esses. Não obstante, o desprezo à

observância dos fatores e processos de formação do solo e seus atributos verticais e horizontais, bem como o uso exclusivo dessa técnica como único meio, distancia a utilização das climofunções do consenso, em estudo paleoclimáticos.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do IFSULDEMINAS. Ao Programa de Pós-

graduação em Geociências (IGE-UNICAMP). Ao apoio financeiro da FAPESP.

## 7. REFERÊNCIAS

- Adams, J.S., Kraus, M.J., Wing, S.L. 2011. Evaluating the use of weathering indices for determining mean annual precipitation in the ancient stratigraphic record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **309**: 358–366.
- Andreis, R.R. 1981. *Identificación e importancia geológica de los paleosuelos*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Ayoade, J.O. 2004. *Introdução à climatologia para os trópicos*. 10. ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 332 pp.
- Batezelli, A. 2003. Análise da sedimentação cretácea no Triângulo Mineiro e sua correlação com áreas adjacentes. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 183 p.
- Batezelli, A. 2010. Arcabouço tectono-estratigráfico e evolução das bacias Caiuá e Bauru no Sudeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geociências*, **40**: 265-285.
- Batezelli, A. 2015. Continental systems tracts of the Brazilian Cretaceous Bauru Basin and their relationship with the tectonic and climatic evolution of South America. *Basin Research*, **27**: 1-25.
- Batezelli, A., Saad, D.A.R., Basilici, G. 2007. Arquitetura deposicional e evolução da seqüência aluvial neocretácea da porção setentrional da Bacia Bauru, no sudeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**: 163-181.
- Birkeland, P.W. 1999. *Soil and geomorphology*. Oxford University Press, New York, 430 pp.
- Brady, N.C., Weil, R.R. 2013. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3. ed. Bookman, Porto Alegre, 685 pp.
- Breemen, N.V. & Buurman, P. 2002. *Soil formation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 393 pp.
- Buol, S.W., Hole, F.D., McCracken, R.J., Southard, R.J. 1997. *Soil genesis and classification*. Iowa State University Press, Ames, 527 pp.
- Catt, J.A. 1990. *Paleopedology manual*. Pergamon, Great Britain.
- Cleveland, D.M., Nordt, L.C., Atchley, S.C. 2008. Paleosols, trace fossils, and precipitation estimates of the uppermost Triassic strata in northern New Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **257**: 421-444.
- Dal' Bó, P.F.F. & Basilici, G. 2010. Estimativas de paleoprecipitação e gênese de feições cálcicas e argílicas em paleossolos da Formação Marília (Neocretáceo da Bacia Bauru). *Geociências*, **29(1)**: 33-47.
- Driese, S.G., Ober, E.G. 2005. Paleopedologic and paleohydrologic records of precipitation seasonality from Early Pennsylvanian “underclay” paleosols, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, **75**:997–1010.
- Fernandes, L.A. 2004. Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia do Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000. *Boletim Paranaense de Geociências*, **55**: 53-66.
- Fernandes, L.A., Coimbra, A.M. 1996. A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil), Anais da Academia Brasileira de Ciências, pp. 195-205.
- Fernandes, L.A., Coimbra, A.M. 2000. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). *Revista Brasileira de Geociências*, **30(4)**: 717-728.
- Fulfaro, V.J., Etchebehere, M.L.D.C., Perinotto, J.A.J., Saad, A.R. 1999. Santo Anastácio: um geossolo cretácico na Bacia Caiuá, Simpósio sobre o cretáceo do Brasil, 5, Simposio sobre el Cretacico de América del Sur, 1. Unesp, Serra Negra, pp. 125-130.
- Fulfaro, V.J., Perinotto, J.A.J. 1996. A Bacia Bauru: estado da arte. *Boletim do 4º Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil*: 297-303.

- Jenny, H. 1994. *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. Dover, New York, 281 pp.
- Junior, A.P. 2011. Paleossolos da Formação Marília: subsídios para a interpretação paleogeográfica na área de Duartina – SP. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 165 p.
- Kraus, M.J. et al. 2013. Paleohydrologic response to continental warming during the Paleocene–Eocene Thermal Maximum, Bighorn Basin, Wyoming. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **370**: 196–2008.
- Maynard, J.B. 1992. Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols. *Journal of Geology*, **100**: 279–289.
- Melo, V.F., Alleoni, L.R.F. (eds.). 2009. *Química e mineralogia do solo*. Parte I – Conceitos básicos. SBCS, Viçosa.
- Nordt, L.C., Driese, S.G. 2010. New weathering index improves paleorainfall estimates from Vertisols. *Geology*, **38**: 407–410.
- Paquet, H. & Ruellan, A. 1997. Calcareous epigenetic replacement in soil and calcrete formation. In: H. Paquet, N. Clauer (eds.). *Soil and sediments: mineralogy and geochemistry*. Springer, France, p.: 21–48.
- Paula e Silva, F., Chang, H.K., Caetano-Chang, M.R. 2005. Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, **35(1)**: 77–88.
- Pereira, C.T., Batezelli, A., Ladeira, F.S.B. 2015. Paleoprecipitation changes based on paleosols profiles of the Marília Formation (Upper Cretaceous) in the eastern portion of the Bauru Basin in southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **34(2)**: 238–257.
- Pereira, C.A. 2014. Paleossolos da Formação Marília no Município de Campina Verde, oeste de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 88 p.
- Retallack, G.J. 1988. Field recognition of paleosols. *GSA Sp. Paper*, **216**: 1–20.
- Retallack, G.J. 2007. Paleosols. In: W. Henke, I. Tattersall (eds.). *Handbook of paleoanthropology*. Vol. 1. Principles, methods and approaches. Springer, Berlin, p.: 383–408.
- Retallack, G.J. 2005. Pedogenic carbonate proxies for amount and seasonality of precipitation in paleosols. *Geology*, **33**: 333–336.
- Retallack, G.J. 2001. *Soils of the past: an introduction to paleopedology*. Unwin Hyman, London.
- Riccomini, C. 1995. Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondwânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas. Tese de Livre-Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 100 p.
- Riccomini, C. 1997. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, **27(2)**: 153–162.
- Sheldon, N.D. 2006. Abrupt chemical weathering increase across the Permian–Triassic boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **231**: 315–321.
- Sheldon, N.D., Retallack, G.J., Tanaka, S. 2002. Geochemical climofunctions from North American soils and application to paleosols across the Eocene-Oligocene Boundary in Oregon. *The Journal of Geology*, **110**: 687–696.
- Sheldon, N.D. & Tabor, N.J. 2009. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. *Earth-Science Reviews*, **95(1-2)**: 1–52.
- Therrien, F. 2005. Palaeoenvironments of the latest Cretaceous (Maastrichtian) dinosaurs of Romania: insights from fluvial deposits and paleosols of the Transylvanian and Hațeg basins. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **218**: 15–56.