

# ESTIMATIVAS DE PALEOPRECIPITAÇÃO E GÊNESE DE FEIÇÕES CÁLCICAS E ARGÍLICAS EM PALEOSSOLOS DA FORMAÇÃO MARÍLIA (NEOCRETÁCEO DA BACIA BAURU)

Patrick Francisco Führ DAL' BÓ & Giorgio BASILICI

Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP.  
Rua João Pandiá Calógeras, 51. Cx. Postal 6152. CEP 13083-970. Campinas, SP.  
Endereços eletrônicos: patrickdalbo@ige.unicamp.br; basilici@ige.unicamp.br.

Introdução  
Área de Estudo  
Contexto Geológico e Estratigráfico  
Métodos  
    Aquisição de Dados em Campo  
    Micromorfologia e MEV  
    Análises Químicas e Mineralógicas  
    Paleoprecipitação  
Paleossolos da Formação Marília  
    Aridisols  
    Alfisols  
Estimativas de Paleoprecipitação  
Gênese das Feições Cálcicas  
Gênese das Feições Argílicas  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – O presente estudo tem por objetivo investigar a gênese de feições que indicam a concentração de carbonato de cálcio e outras que indicam a concentração de feições iluviais de ferro e argila, que ocorrem em paleossolos da Formação Marília. Regra geral, essas feições estão concentradas em dois horizontes de paleossolo, as feições cálcicas em horizontes Bk de *Aridisols* e as argílicas em horizontes Bt de *Aridisols* e *Alfisols*. Para tanto, foram estudados 19 perfis de paleossolos, contando com 3 horizontes Bk e 11 horizontes Bt. Nestes horizontes selecionados, procedeu-se com a caracterização da macro- e micromorfologia, da geoquímica, e análises de microscopia eletrônica de varredura. As estimativas de paleoprecipitação foram obtidas por meio de dois métodos indiretos de análise: profundidade de ocorrência de nódulos carbonáticos em horizontes Bk e geoquímica dos horizontes Bt. Postula-se, neste artigo, que a gênese de ambas as feições está ligada a atuação de processos pedogenéticos pretéritos e que as paleoprecipitações tiveram papel preponderante como fator de controle à gênese e diferenciação dessas feições nos paleossolos estudados.

**Palavras-chave:** paleossolos; estimativas de paleoprecipitação; gênese de feições cálcicas e argílicas; Formação Marília.

**ABSTRACT** – P.F.F. Dal' Bó & G. Basilici - *Paleoprecipitation estimates and genesis of calcic and argillic features in paleosols of the Marília Formation (Neocretaceous of the Bauru Basin)*. This paper aims to investigate the genesis of calcic and argillic features which occur in paleosols of the Marília Formation. In a general sense, these features are concentrated in two paleosol horizons, the calcic features in Bk Aridisol horizons and argillic features in Bt Aridisol and Alfisol horizons. In this paper 19 paleosol profiles were studied and detail macro and micromorphological, geochemical, and SEM analyses were performed on 3 Bk and 11 Bt horizons. The paleoprecipitation estimates were inferred following two climofunctions, depth-to-carbonate from Bk and chemical composition from Bt horizons. By comparing the calcic and argillic features of these horizons with modern soil horizons this study demonstrates that these features were pedogenically formed and that paleoprecipitation was an important forcing factor in the genesis and principally in the differentiation of these features.

**Keywords:** paleosols; paleoprecipitation estimates; genesis of calcic and argillic features; Marília Formation.

## INTRODUÇÃO

Uma grande variedade de técnicas que se apóiam em registros representativos (*proxy records*) vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos com o objetivo de quantificar os principais parâmetros atmosféricos (composição da atmosfera, regimes de paleoventos, paleotemperaturas e índices pluviométricos passados) que afetaram a conformação dos climas pretéritos.

Neste contexto, os paleossolos são utilizados para a interpretação paleoclimática como indicadores de estimativas anuais de paleoprecipitação (*Mean annual precipitation – MAP*) e estimativas anuais de paleotemperatura (*Mean annual temperature – MAT*). A interpretação de regimes climáticos do passado com o uso de paleossolos é baseada principalmente na

identificação de feições pedogênicas que estudos com solos modernos mostraram possuir significado paleoclimático. No presente estudo, serão utilizadas duas técnicas para calcular os índices de paleoprecipitação que ocorreram durante o desenvolvimento de dois tipos de horizontes de paleossolos na Formação Marília: profundidade de ocorrência de nódulos carbonáticos (*depth-to-carbonate rainfall estimates - DTC*) para horizontes cálcicos Bk e índice de alteração química (*chemical index of alteration without potassium - CIA-K*) para horizontes argílicos Bt.

Nos paleossolos da Formação Marília é comum a ocorrência de feições pedogênicas que indicam a concentração e remobilização secundária de carbonato de cálcio (feições de cristalização, dissolução, substituição, descarbonatação e recarbonatação). Atualmente, solos com horizontes cálcicos e petrocálcicos são amplamente distribuídos em áreas áridas e semi-áridas por toda a superfície terrestre (Goudie, 1973) e paleossolos que apresentam horizontes cálcicos são considerados ótimos indicadores paleoclimáticos e paleoambientais (Goudie, 1983; Wright & Tucker, 1991; Alonso-Zarza, 2003).

A iluviação de argila é outro importante processo pedogênico registrado nos paleossolos da Formação Marília. As partículas de argila se movem nos solos em estado de suspensão durante a ocorrência das frentes de molhamento e ficam retidas nas superfícies das unidades estruturais ou paredes dos poros após a completa evaporação e/ou absorção da água que as carregavam. Essas feições de iluviação são frequentes em horizontes argílicos, que por definição, são horizontes subsuperficiais que exibem evidências de iluviação de argila e apresentam um percentual maior no conteúdo de argila do que os horizontes superiores do mesmo perfil (Soil Survey Staff, 1999).

A formação de horizontes argílicos envolve tipicamente três processos pedogênicos: dispersão, translocação e acumulação (Eswaran & Sys, 1979). O regime climático da área é determinante aos processos de gênese e transporte das partículas de argila.

## ÁREA DE ESTUDO

Os trabalhos foram desenvolvidos principalmente em três setores da Bacia Bauru: na porção centro-oeste do estado de São Paulo, nas imediações do município de Marília, na porção centro-norte do estado de São Paulo, nas proximidades do município de Monte

Alto, e na porção noroeste da bacia, entre os municípios de Cassilândia (MS), Itajá (GO), Itarumã (GO) e Quirinópolis (GO) (Figura 1). Os pontos estudados estão indicados no mapa da Figura 1 e, listados e geograficamente referenciados na Tabela 1.

Em climas úmidos, os horizontes argílicos se desenvolvem predominantemente por alteração do material de origem, ao passo que em climas áridos, o aporte das partículas de argila ocorre preponderantemente via adição eólica (Rust, 1983).

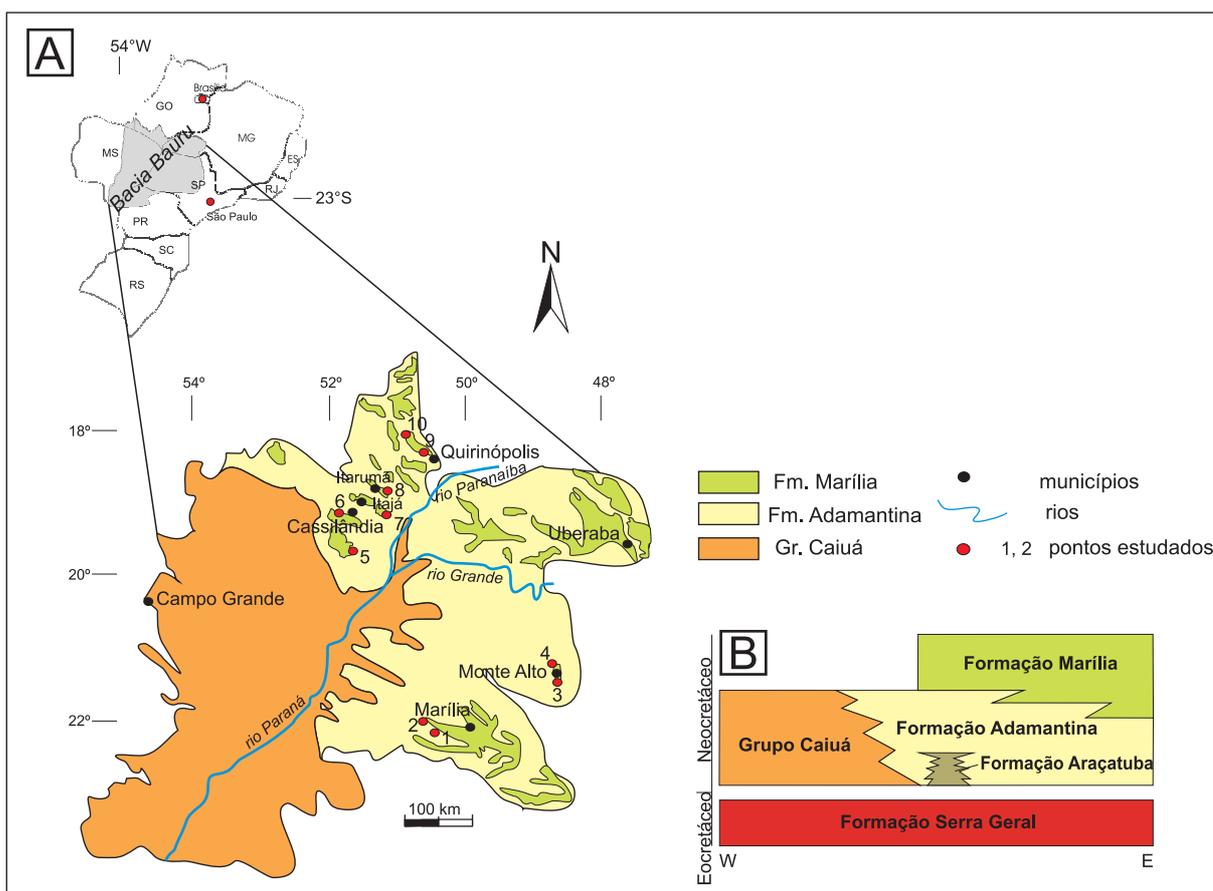
A presença de horizontes pedogênicos que exibem intercalações e superposições de feições de concentração de carbonato de cálcio e argílicas são comuns nos paleossolos estudados. Horizontes cálcicos que contêm feições de iluviação de argila são comumente interpretados como resultado de mudanças climáticas (Reheis, 1987). Gile et al. (1966) indicam que as feições de iluviação de argila foram formadas primeiramente em condições climáticas mais úmidas e posteriormente foram recobertas por feições de concentração de carbonato de cálcio quando as condições climáticas se tornaram mais secas. Situações em que ocorrem feições de iluviação de argila recobrindo as de carbonato de cálcio são interpretadas como produto de mudanças climáticas de períodos mais secos para úmidos (Khormali et al., 2003), porém são raramente reportadas na literatura (Bronger et al., 1998). Segundo Gile et al. (1966), o carbonato de cálcio deve ser completamente removido do perfil para ocorrer a iluviação de argila, devido à tendência da argila em flocular na presença de carbonatos. Porém, Holliday (1985) indicou que as partículas de argila podem ser translocadas mesmo em solos que apresentam altas concentrações de carbonato de cálcio e, apesar da tendência da argila em flocular na presença de íons de Ca, caso os solos possuam macroporos e canais livres, acompanhados de disponibilidade de água superior às perdas por evapotranspiração, os processos de iluviação de argila podem ocorrer. O Na desempenha um papel importante no desenvolvimento desses processos em ambientes áridos, pois possui um alto efeito dispersivo sobre as argilas.

Os objetivos deste estudo são: a) calcular os índices de paleoprecipitação que ocorreram durante a formação dos horizontes cálcicos e argílicos, b) evidenciar os principais processos pedogenéticos que agiram na gênese de tais horizontes.

## CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO

A área de estudo está situada na Bacia Bauru. A Bacia Bauru é uma bacia sedimentar intracratônica,

desenvolvida durante o Cretáceo Superior (Santoniano-Maastrichtiano), na porção centro-sul da Plataforma



**FIGURA 1.** A) Mapa geológico simplificado mostrando a distribuição das unidades da Bacia Bauru e pontos estudados na Formação Marília. B) Relações estratigráficas entre as unidades da Bacia Bauru (modificado de Fernandes, 1998).

**TABELA 1.** Coordenadas geográficas dos pontos estudados (vide mapa da Figura 1).

Ponto	Coordenadas Geográficas
1	50°11'25"W, 22°22'40"S
2	50°04'05"W, 22°15'25"S
3	48°32'58"W, 21°15'14"S
4	48°32'41"W, 21°15'25"S
5	51°25'23"W, 19°23'32"S
6	51°38'56"W, 19°05'46"S
7	51°34'19"W, 19°03'02"S
8	51°18'29"W, 18°52'42"S
9	50°28'45"W, 18°07'32"S
10	51°01'21"W, 18°02'40"S

Sul-Americana. A bacia possui forma aproximadamente elíptica com eixo maior na direção nordeste e cobre uma extensão de aproximadamente 370.000 km<sup>2</sup>, que abrange o oeste do estado de São Paulo, nordeste do Mato Grosso do Sul, sudeste do Mato Grosso, sul de Goiás e oeste de Minas Gerais. Suas maiores espessuras preservadas ultrapassam os 300 m, como

em sondagens realizadas na Estrutura de Piratininga, onde foram atravessados 324 m de sedimentos da Formação Marília (Santos et al., 1980), mas em média são da ordem de 100 m (Paula e Silva, 2003).

O substrato da Bacia Bauru é formado por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, de idade entre 133 e 130 Ma (Renne et al., 1992). A sucessão sedimentar (com rochas vulcânicas associadas) da bacia é separada dos derrames basálticos da Formação Serra Geral por não-conformidade (Fernandes & Coimbra, 2000). O mecanismo que gerou a depressão sobre a qual se acumularam os sedimentos da bacia tem sido interpretado como de natureza mecânica (Batezelli, 2003), devido a processos de reativação de lineamentos do embasamento Pré-Cambriano, e termal (Milani, 1997; Riccomini, 1997), como produto de reajustes flexurais negativos da litosfera, ocorridos após a acomodação e resfriamento da pilha de basaltos da Formação Serra Geral.

A Bacia Bauru é subdividida em dois grupos: Caiuá e Bauru. As relações estratigráficas entre os dois grupos ainda é tema bastante controverso. Alguns autores defendem a tese da interdigitação e contemporaneidade dos grupos (Fernandes & Coimbra, 1996;

Fernandes, 1998; Fernandes & Coimbra, 2000), enquanto outros, baseados no reconhecimento de uma superfície de descontinuidade regional, denominada de Geossolo Santo Anastácio (Fúlfaro et al., 1999), e dados paleomagnéticos (Ernesto et al., 2006), entendem que os dois grupos se depositaram em intervalos distintos: Grupo Caiuá no Eocretáceo (Aptiano/Albiano) e o Grupo Bauru no Neocretáceo (Campaniano-Maastrichtiano), separados por superfícies de discordância de milhões de anos.

Numerosos trabalhos têm procurado hierarquizar do ponto de vista estratigráfico as diferentes unidades que afloram na Bacia Bauru. A subdivisão proposta por Soares et al. (1980) para o estado de São Paulo, em quatro formações, da base para o topo: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília, alcançou grande aceitação dos pesquisadores em função de sua operacionalidade em campo (Etchebehere et al., 1993; Dias-Brito et al., 2001). Porém, principalmente a partir da década de 1990, surgem novos trabalhos com propostas de inclusão, reformulação e exclusão de unidades da Bacia Bauru (Fernandes, 1992, 1998; Fernandes & Coimbra, 1994, 1996, 2000; Batezelli, 1998, 2003; Paula e Silva, 2003). Dentre as principais proposições dos autores citados estão a inclusão das formações

Uberaba (Hasui, 1968), que só aflora na região do Triângulo Mineiro, e Araçatuba (Zaine et al., 1980) no Grupo Bauru e a reclassificação da Formação Caiuá na categoria de Grupo Caiuá (Fernandes, 1992).

O presente estudo irá se restringir à caracterização geológica e estratigráfica da Formação Marília, unidade superior do Grupo Bauru, pois se trata da unidade que é o objeto de estudo.

A Formação Marília é constituída por arenitos muito finos a médios e raros depósitos de arenitos conglomeráticos. Os arenitos são bem selecionados, bem arredondados e exibem alta esferecidade, predominantemente constituídos por quartzo e secundariamente por fragmentos líticos (Basilici et al., 2009). Possui espessura máxima preservada de 160 a 180 m em superfície (Soares et al., 1980; IPT, 1981) na cidade de Marília (SP) e 233 m em subsuperfície na cidade de Lupércio (SP) (Paula e Silva, 2003). A idade de deposição admitida é Maastrichtiano (74-65 Ma). Esta idade foi obtida através de correlações estratigráficas com vertebrados fósseis do gênero *Aeolosaurus* (Santucci & Bertini, 2001), por relacionamentos estratigráficos e biogeográficos com diferentes taxa de ostracodes e carófitos (Dias-Brito et al., 2001), e dados paleomagnéticos (Tamrat et al., 2002).

## MÉTODOS

### AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO

Em campo, foram levantadas 10 seções estratigráficas, que estão indicadas na Figura 1 (pontos estudados). Os paleossolos representam 66% da espessura total das seções, nas quais os outros 25% são formados por depósitos eólicos de arenito com laminação plano-paralela e 9% por depósitos de arenito conglomerático, atribuídos a deposição de canais efêmeros. Informações adicionais sobre a descrição das seções podem ser encontradas em Dal' Bó (2008) e Basilici et al. (2009).

Os paleossolos foram identificados em campo com base no reconhecimento de feições diagnósticas como rizólitos, estruturas e horizontes de solo, e variações texturais entre os horizontes pedogênicos (Catt, 1990; Retallack, 2001). A descrição morfológica seguiu em parte os critérios estabelecidos no *Soil Survey Manual* (Soil Survey Staff, 1993), considerando as adaptações propostas para a descrição de paleossolos (Catt, 1990) e, modificações de Birkeland (1999). A taxonomia dos horizontes e perfis está de acordo com o *US Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1999), por se tratar de um sistema mais apropriado à classificação de paleossolos (Kraus, 1999; Sheldon & Tabor, 2009).

Adicionalmente às descrições de campo, foram coletadas amostras indeformadas e orientadas, representativas dos principais horizontes e tipos de paleossolos, para a confecção de lâminas delgadas e exames por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Outras amostras dos mesmos horizontes foram coletadas para as análises químicas e mineralógicas.

### MICROMORFOLOGIA E MEV

A confecção das seções delgadas foi realizada no Laboratório de Laminação do IG/Unicamp. Devido ao alto grau de desagregabilidade das amostras, mesmo que em sua maior parte cimentadas por carbonato de cálcio, foi necessária a impregnação com resina de poliéster, que promoveu o endurecimento do material por polimerização, viabilizando a confecção das lâminas sem perda significativa de material. Os procedimentos empregados na descrição das lâminas delgadas seguiram as proposições de Bullock et al. (1985) e Castro (2002), realizados sistematicamente sobre amostras da base para o topo dos perfis, inicialmente com auxílio de lupa binocular e posteriormente ao microscópio óptico de luz polarizante.

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do IG/Unicamp, sob as mesmas lâminas que foram analisadas ao microscópio óptico de luz polarizante. As lâminas foram pulverizadas com um filme fino de carbono. O equipamento utilizado foi um MEV LEO 430 acoplado a um espectrômetro de energia EDS, que possibilitou a observação das feições pedogênicas em escala de micrômetros.

## ANÁLISES QUÍMICAS E MINERALÓGICAS

A determinação dos elementos químicos maiores foi obtida mediante a análise por Fluorescência de Raios-X (XRF, equipamento Philips, PW2404) em discos de vidro com aproximadamente 1 grama de amostra fundida em matriz de tetraborato de lítio. As análises foram realizadas no Laboratório de Geoquímica Analítica do IG/Unicamp. O principal objetivo dessas análises foi o de auxiliar na melhor caracterização dos horizontes de paleossolos e, contribuir para o conhecimento das formas de alteração do material de origem, que foi determinado com o uso de equações de alteração (Maynard, 1992).

A mineralogia dos horizontes de paleossolos foi determinada através de Difração de Raios-X (método do pó), que foi realizada no Laboratório de Raios-X do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará. O equipamento utilizado foi um difratômetro PW3040/60 equipado com ânodo de cobre (CoK $\alpha$ ), monocromador (FeK $\beta$ ), gerador de tensão com 40 kV e gerador de corrente 35 mA. As características dos minerais foram identificadas a partir da interpretação dos difratogramas gerados, utilizando-se o software APD - *Automatic Powder Diffraction* da marca Philips. Adicionalmente, utilizou-se também o programa Minerva, que consiste em um banco de dados do *International Center for Diffraction Data* com as principais características dos minerais, permitindo a comparação difratométrica dos picos dos minerais com padrões difratométricos de fases cristalinas individuais caracterizadas. Lâminas orientadas, com amostras de granulação inferior a < 2  $\mu$ m foram utilizadas para a caracterização dos argilominerais presentes.

## PALEOPRECIPITAÇÃO

Para verificar as estimativas anuais de paleoprecipitação, foram empregados dois métodos distintos. O primeiro método empregado consiste na determinação da profundidade (D, *depth* em cm) de um horizonte no qual ocorre a maior concentração de nódulos carbonáticos (horizonte Bk) e/ou em relação a um horizonte no qual o carbonato de cálcio é dominante na matriz do solo. A relação entre a profundidade desses horizontes com índices de precipitação (P,

*precipitation* em mm) foi descrita pela primeira vez em 1941 (Jenny, 1941). O autor citado escolheu uma série de solos com horizontes cálcicos nos *Great Plains* norte-americanos que apresentavam pouca variabilidade nos principais fatores de formação dos solos: vegetação de gramíneas, topografia plana, material de origem derivado de acumulações de *loess* carbonático e idade determinada (<14 Ka), porém submetidos a diferentes regimes climáticos (climosequência). A principal conclusão do autor foi de que os horizontes cálcicos eram mais profundos nas áreas que apresentavam maiores índices pluviométricos e mais superficiais nas áreas mais secas.

Em 2005, Retallack (2005) expandiu a base de dados de Jenny (1941) e Arkley (1963) para 807 solos com horizontes cálcicos distribuídos em todos os continentes e definiu a seguinte equação para determinar os índices de precipitação de acordo com a profundidade dos horizontes cálcicos Bk:

$$P \text{ (mm)} = 137.24 + 6.45D + 0.013D^2$$

na qual  $R^2 = 0.52$  (coeficiente de determinação) e  $s = \pm 147$  mm (desvio padrão).

Esta equação vem sendo largamente utilizada em estudos que procuram estabelecer estimativas de paleoprecipitação em paleossolos que apresentam horizontes cálcicos (Retallack, 2007; Cleveland et al., 2008). No presente estudo, a equação foi aplicada a 3 perfis de paleossolos que apresentaram as seguintes características: a) horizonte superficial A preservado, b) contato superior com outros paleossolos e/ou litofácies sem evidência de erosão.

O segundo método empregado consiste na aplicação de uma equação exponencial que relaciona os índices de precipitação (MAP) com os índices de alteração química (CIA-K) de horizontes argílicos Bt. O primeiro passo para a aplicação da equação é o cálculo dos índices de alteração química. Esse índice foi originalmente proposto por Nesbitt & Young (1982), como segue a equação:  $CIA = 100 \times ((Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)))$ , em % de massa molar. A aplicação desse índice sem o óxido de potássio foi sugerida por Maynard (1992), com o objetivo de controlar os efeitos do metassomatismo do potássio em paleossolos.

Sheldon et al. (2002) propuseram a seguinte equação:

$$MAP \text{ (mm)} = 221e^{0.0197(CIA-K)}$$

na qual  $R^2 = 0.72$  (coeficiente de determinação) e  $s = \pm 182$  mm (desvio padrão).

Altos valores de CIA-K refletem altos valores de precipitação e conseqüentemente os solos foram submetidos a intensos processos de alteração química.

Em geral, tais processos culminaram com a lixiviação dos elementos solúveis alcalinos e alcalinos terrosos e com a concentração de elementos menos solúveis como o alumínio. Índices de alteração química iguais a 100 (CIA-K = 100) são equivalentes às estimativas de

precipitação de aproximadamente 1585 mm/ano (Sheldon et al., 2002).

Neste estudo, o cálculo da paleoprecipitação por meio de índices de alteração química foi conduzido em 11 horizontes Bt.

## PALEOSSOLOS DA FORMAÇÃO MARÍLIA

Na Formação Marília, foram reconhecidas 4 ordens de paleossolos: *Aridisols*, *Alfisols*, *Entisols* e *Vertisols*. Contudo, neste estudo, apenas os perfis de *Aridisols* e *Alfisols* serão abordados em detalhe, pois possuem significado paleoclimático, e a gênese das feições cálcicas e argílicas estão associadas ao desenvolvimento desses perfis.

### ARIDISOLS

Os *Aridisols* correspondem ao tipo de paleossolo mais freqüente na área de estudo; foram descritos 18 perfis, que representam 43% da espessura da Formação Marília (Prancha 1A).

Os perfis apresentam espessuras variáveis de 0,3 m a 7 m. Em geral, os perfis apresentam seqüência de horizontes Bt/Btk/Bk(ou Bkm)/C(ou Ck). Poucos perfis apresentam o horizonte superficial A preservado; em muitos casos, este horizonte foi decapitado por atividade de erosão eólica. As cores variam de vermelho (10R5/8), vermelho-claro (10R6/8) a bruno-avermelhado (10R4/6). As texturas arenosas são preponderantes, com granulação predominante de areia fina a média. As estruturas pedogênicas (peds) variam de acordo com os horizontes; em geral exibem estruturação forte, com alto grau de desenvolvimento e tamanhos grandes, podendo atingir mais de 40 cm de diâmetro nos horizontes B (Prancha 1B). Estruturas granulares muito grandes (2 cm a 4 cm de diâmetro) podem ser vistas nos horizontes A. Nos horizontes B (Bt e Btk) prevalecem as estruturas grande a muito grande prismática e em blocos sub- e angulares. Em alguns casos, as estruturas prismáticas primárias podem ser quebradas em estruturas em blocos angulares secundárias, que revelam o alto grau de desenvolvimento pedogênico. Outras estruturas como laminar e maciça estão associadas a horizontes Bkm e C, Ck, respectivamente.

As superfícies dos pedos freqüentemente apresentam revestimentos (*coatings*) de filmes pretos (N3) de oxihidróxidos de manganês e revestimentos de carbonato de cálcio. Muitas vezes ambos os revestimentos ocorrem associados, preenchendo a porosidade de bioturbação dos horizontes. Nos horizontes Bt, o revestimento pode ter um aspecto brilhante e ceroso, devido à infiltração mecânica de argilas que se acumulam nas superfícies

dos pedos, preenchem a porosidade e, podem formar pontes de argila entre os grãos de areia.

O principal agente cimentante dos horizontes é o carbonato de cálcio. Os horizontes mostram gradação entre horizontes fracamente cimentados (Bt), fortemente (Btk e Ck) a extremamente cimentados (Bk e Bkm). Frequentemente as concentrações de carbonato de cálcio formam glébulas, em sua maioria nódulos e algumas septárias. Os nódulos possuem estrutura interna indiferenciada, são macios a duros, brancos, com dimensões que variam de <1 cm a 5 cm de diâmetro, e possuem formas subesféricas, elipsoidais, amigdaloidais e irregulares. Outros tipos de glébulas, como os halos glebulares, são macios, brancos, pequenos (0,2 cm a 1 cm de diâmetro) e irregulares. Em alguns casos, os nódulos podem ocupar até 50% do volume dos horizontes, formando horizontes endurecidos de calcrete pedogênico (Prancha 1C).

Estruturas de bioturbação como rizólitos, crotovinas, halos de redução e escavações animais são comuns principalmente nos horizontes superiores dos paleossolos (A, B). Os icnofósseis exibem diversas estruturas que foram discriminadas com base na forma dos relevos de limite, presentes na base (hiporrelevo) e topo (epirrelevo) das camadas, que assumem formas côncavas ou convexas. Em geral, correspondem a estruturas cilíndricas alongadas na vertical, com ramificações laterais e afinamento para a base, como os rizólitos, que podem atingir até 10 cm de comprimento e diâmetros que variam de 0,5 cm no topo a 0,2 cm na base das ramificações. Escavações meandantes com disposição horizontal a oblíqua em relação ao substrato, podendo entrecruzar-se, com dimensões e configurações variadas e preenchimento diferente da matriz; são menores ainda, de 0,1 cm a 0,2 cm de diâmetro e no máximo 14 cm de comprimento, e foram atribuídas à atividade de organismos vermiformes do icnogênero *Planolites* (Foto 1). Outras estruturas com formas subesféricas em planta e tubulares longitudinalmente, como as crotovinas (Foto 2), foram diferenciadas com base no contraste de cor e granulação entre o material da matriz e do preenchimento. Frequentemente, o preenchimento das bioturbações é composto por areia fina ou média e calcita espática.



**PRANCHA 1.** Feições pedogênicas descritas nos *Aridisols*. A) Visão geral de um afloramento com diversos perfis de *Aridisols* superpostos. Ponto 1 na Figura 1. B) Estrutura prismática muito grande em horizontes Btk. Ponto 2 na Figura 1. C) Nódulos endurecidos e coalescentes de carbonato de cálcio em horizonte Bk, formando horizontes de calcrete pedogênico. Ponto 6 na Figura 1.



**FOTO 1.** Estruturas de bioturbação produzidas por animais vermiformes sedimentívoros do icnogênero *Planolites*. Ponto 6 na Figura 1.

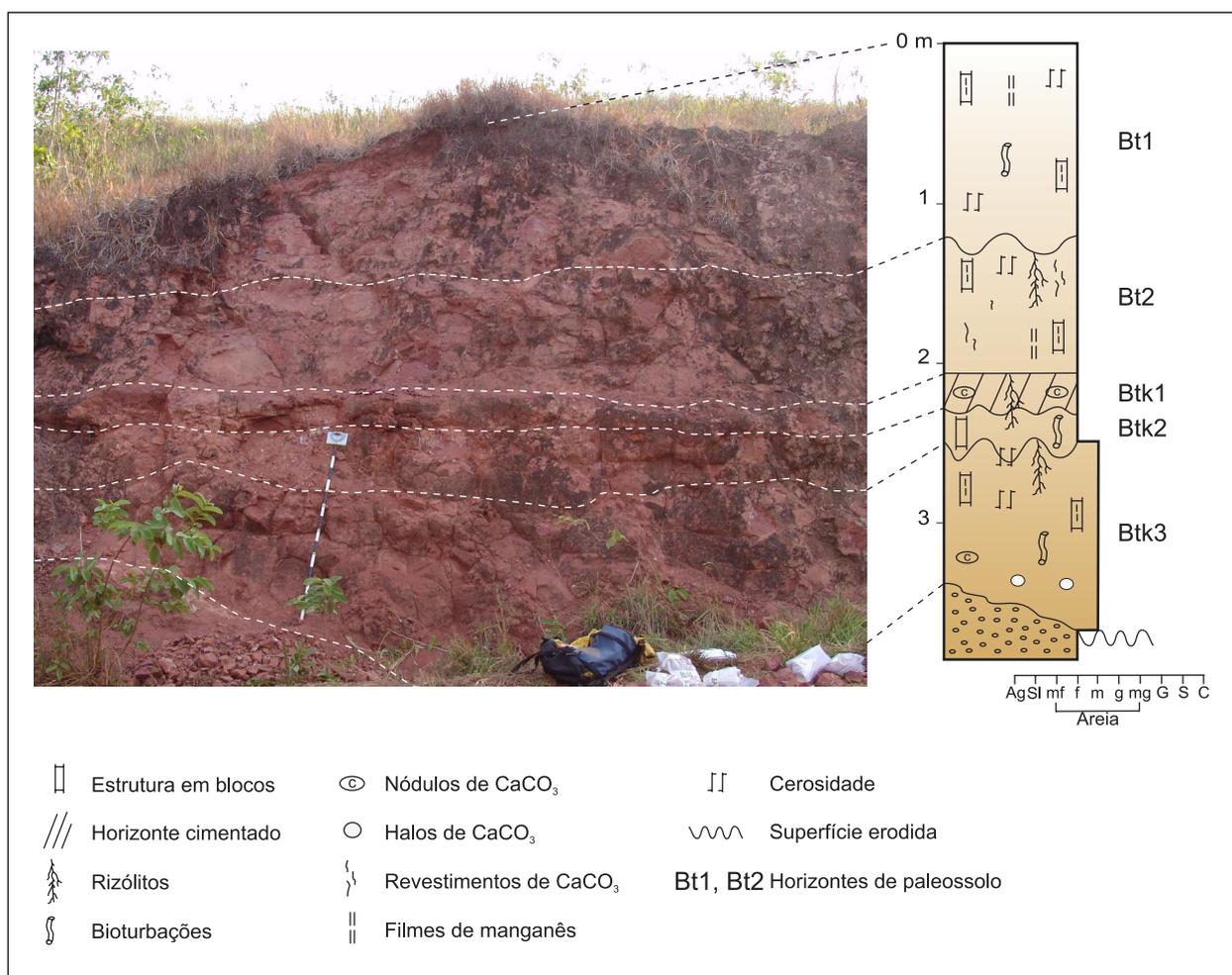


**FOTO 2.** Crotovina descrita em *Aridisol*, com clara diferenciação de cor entre a matriz do paleossolo e do material de preenchimento. Ponto 7 na Figura 1.

A transição entre os horizontes é clara a gradual com superfície de separação ondulada a irregular. Quando a transição é de forma abrupta e plana, essa é marcada pela intensa concentração de nódulos carbonáticos em um horizonte ou separada por superfícies de erosão planas subhorizontais. Alguns perfis de *Aridisols* são do tipo *compound* (Duchaufour, 1982) ou *multistorey* (Morrison, 1967), separados por superfícies de erosão planas subhorizontais, causadas pela deflação eólica. Estes perfis não mostram poligenia, e apresentam sucessão vertical marcada por horizontes diagnósticos distintos, que evidenciam diferentes episódios alternados de sedimentação, pedogênese e erosão. Os perfis do tipo *polygenetic* ou *composite* (Morrison, 1967) indicam a superposição de diferentes fases de evolução pedogênica, marcadas em afloramento por perfis espessos que exibem recorrência de características similares em horizontes distintos do mesmo perfil.

## ALFISOLS

Apenas um perfil representativo da ordem dos *Alfisols* foi descrito na Formação Marília. Este perfil possui 3,57 m de espessura e ocorre próximo ao município de Itajá (GO). O perfil encontra-se sobreposto a uma sucessão poligenética composta por 5 perfis de *Aridisols*, da qual é separado por uma superfície erodida plana levemente inclinada gerada por deflação eólica. O perfil apresenta apenas seqüência de horizontes Bt/Btk (Figura 2). As cores predominantes são vermelho (10R4/8), bruno-avermelhado (10R4/6) e vermelho-claro (10R7/8). A textura é arenosa, com granulação de areia fina nos horizontes superiores Bt e areia média nos horizontes inferiores Btk. As estruturas pedogênicas apresentam alto grau de desenvolvimento e tamanhos grandes. As estruturas dos horizontes Bt e Btk variam de grande a muito grande em blocos sub- e angulares, com estruturação secundária moderada de média a grande em blocos sub- e angulares (Foto 3).



**FIGURA 2.** Perfil de *Alfisol* que ocorre próximo ao município de Itajá (GO). Ponto 7 na Figura 1.

Os revestimentos mais comuns são filmes pretos (N3) de oxihidróxidos de manganês e cerosidade que ocorrem em todos os horizontes. Revestimentos de carbonato de cálcio ocorrem exclusivamente nos horizontes Btk.

Os horizontes se apresentam cimentados por carbonato de cálcio e mostram gradação entre horizontes fracamente (Bt), fortemente (Btk2 e Btk3) a extremamente cimentados (Btk1). Glébulas de carbonato de cálcio ocorrem apenas nos horizontes Btk e exibem variações entre nódulos e halos glebulares. Os nódulos possuem estrutura interna indiferenciada, são macios a duros, brancos, com dimensões que variam de <0,1 cm a 3,5 cm de diâmetro e formas subesféricas, elipsoidais e amigdaloidais. Os halos glebulares são macios, brancos, pequenos a médios (0,4 cm a 0,7 cm de diâmetro) e irregulares.

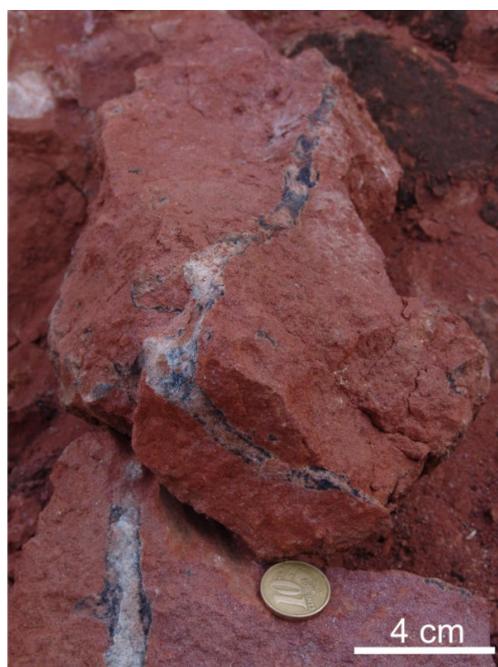
Estruturas de bioturbação ocorrem em todos os horizontes. Os rizólitos exibem estruturas em tubos cilíndricos alongados na vertical e apresentam ramificações laterais com afinamento em direção a base das ramificações. Os diâmetros variam de 1 cm a 1,2 cm



**FOTO 3.** Estrutura em blocos muito grande, descrita no horizonte Bt1 do perfil de *Alfisol* da Figura 2.

no eixo principal e 0,4 cm a 0,6 cm nas ramificações, com comprimento máximo de 18 cm (Foto 4). Outras escavações que ocorrem nos horizontes Bt foram atribuídas à atividade de artrópodes do icnogênero *Macanopsis*. Estas escavações são subcilíndricas e ocorrem dispostas verticalmente ao substrato, não-ramificadas e apresentam extremidade basal arredondada (possível icnito de habitação). Os diâmetros são menores que dos rizólitos, usualmente 0,5 cm de diâmetro e 2,4 cm a 4 cm de comprimento. As bioturbações estão preenchidas em sua maior parte por areia fina e calcita microcristalina.

A transição entre os horizontes ocorre principalmente de forma clara a gradual com superfície de separação ondulada.



**FOTO 4.** Rizólito descrito no horizonte Btk3 do perfil de *Alfisol* da Figura 2.

### ESTIMATIVAS DE PALEOPRECIPITAÇÃO

Os cálculos de estimativas de paleoprecipitação foram realizados com o uso da profundidade de horizontes cálcicos Bk e por meio de índices de alteração química de horizontes Bt. O uso dos índices de alteração química de horizontes Bt na área de estudo se mostrou mais profícuo, pois se baseia nas características dos horizontes B e não requer a preservação completa dos perfis, portanto pode ser aplicado mesmo em perfis com o horizonte superficial A erodido.

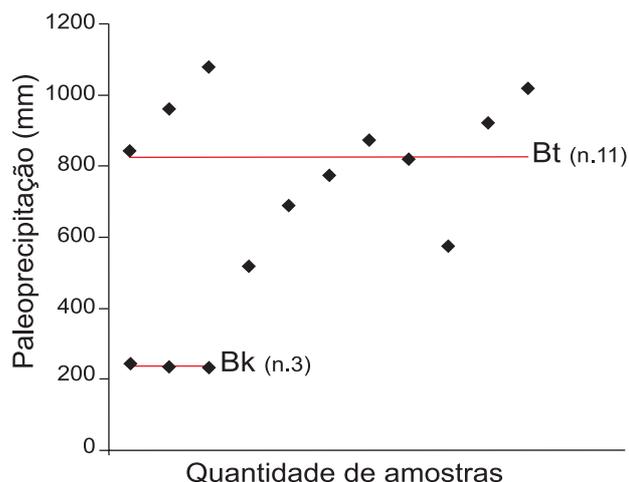
A aplicação dos resultados das estimativas de paleoprecipitação para a construção de uma série

temporal de variabilidade paleoclimática na Formação Marília é problemática, pois faltam datações e marcadores estratigráficos que permitam a correlação das diferentes áreas de exposição da formação. Os resultados apresentados neste estudo refletem dois momentos distintos de evolução paleoclimática durante a deposição e formação de solos na Formação Marília e contrastam com estudos anteriores que admitiam o imperativo de paleoclimas áridos durante toda a evolução dessa formação (Soares et al., 1980; Suguio & Barcelos, 1983).

As estimativas de paleoprecipitação calculadas com a profundidade de horizontes cálcicos apresentaram valores médios de 240 mm/ano (Figura 3). Estes valores são consistentes com a observação das feições macro- e micromorfológicas que ocorrem nestes horizontes.

As estimativas realizadas por meio da geoquímica de horizontes Bt apresentaram considerável incremento na quantidade de chuvas, com valores médios de 824 mm/ano (Figura 3, Tabela 2). Estes valores refletem um momento distinto de evolução da Formação Marília, no qual os carbonatos depositados em fases mais secas passaram a sofrer lixiviação e o processo dominante se tornou a iluviação de ferro e argila e a formação de horizontes Bt.

A presença de paligorsquita como argilomineral dominante nos horizontes Bt analisados indica que o material utilizado para a difração possui carbonatos em sua composição, pois a presença de paligorsquita em horizonte iluvial Bt é um indício de que o horizonte possui pequenos nódulos ou filamentos iluviais de



**FIGURA 3.** Estimativas de paleoprecipitação calculadas nos horizontes Bk e Bt. A linha vermelha disposta na horizontal indica a média dos valores obtidos.

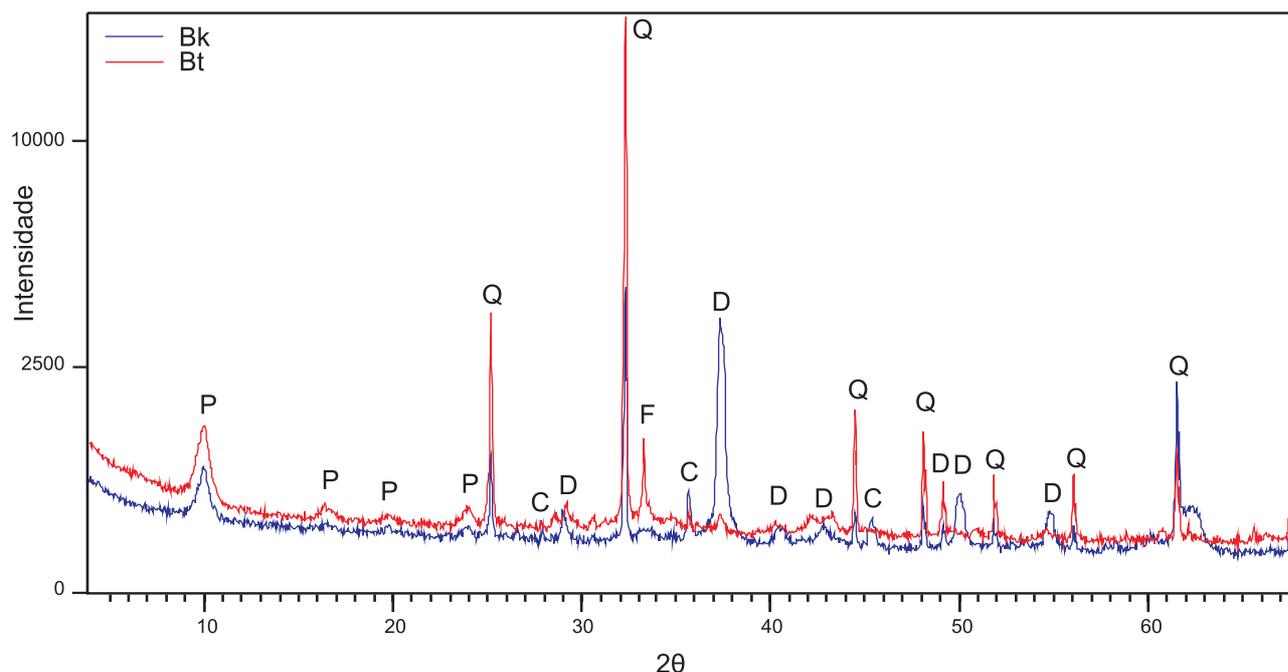
**TABELA 2.** Dados geoquímicos dos horizontes Bt (% em peso).

Perfil / Amostra	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total	CIA-K <sup>a</sup>	MAP <sup>a</sup>
<b>Alfisol (Itajá – GO)</b>														
Bt1 (P2H1)	83,08	1,02	3,87	3,51	0,04	2,64	0,92	0,09	1,27	0,05	3,80	100,3	68,00	843
Bt2 (P2H2)	82,44	1,31	4,75	4,34	0,04	1,83	0,74	0,16	1,66	0,05	3,08	100,4	74,70	962
<b>Aridisol (Itajá – GO)</b>														
Bt1 (C12)	82,29	1,26	5,12	4,52	0,06	1,68	0,53	0,17	1,78	0,08	2,81	100,3	80,46	1078
Bt2 (C16)	72,70	1,35	5,36	4,46	0,04	3,02	3,71	0,17	2,01	0,07	6,72	99,6	43,27	518
Bt3 (C17)	74,45	1,66	5,95	5,28	0,10	2,89	2,19	0,21	2,11	0,09	5,40	100,3	57,89	691
Bt4 (C19)	75,37	1,25	6,55	4,42	0,06	3,05	1,87	0,20	2,34	0,09	5,10	100,3	63,72	775
<b>Aridisol (Monte Alto – SP)</b>														
Bt1 (MA2)	87,35	0,47	4,74	1,74	0,08	0,47	0,61	0,59	2,22	0,03	1,68	99,98	69,56	870
Bt2 (MA10)	85,02	0,46	5,48	1,60	0,05	0,76	0,78	0,81	2,57	0,03	2,42	99,98	66,62	821
Bt3 (MA12)	77,68	0,67	6,54	2,46	0,05	3,19	3,44	0,39	1,97	0,03	3,57	99,99	48,67	576
<b>Aridisol (Marília – SP)</b>														
Bt1 (SLN1)	84,18	0,49	5,96	1,91	0,03	1,42	1,11	0,15	1,87	0,02	2,91	100	72,54	922
Bt2 (FRX6)	86,84	0,40	4,98	1,59	0,01	1,45	0,68	0,13	1,65	0,02	2,45	100,2	77,58	1018

<sup>a</sup> CIA-K = 100 x (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO+Na<sub>2</sub>O)); MAP (mm) = 221e<sup>0,0197(CIA-K)</sup>.

carbonato de cálcio em torno de grãos (Figura 4). A paligorsquita nesses horizontes ocorre aprisionada na estrutura cristalina das calcitas que formam os pequenos nódulos e filamentos (Khademi & Mermut, 1999). Já nos horizontes Bk, a presença de paligorsquita é associada aos processos de neoformação da paligorsquita em horizontes cálcicos ricos em Mg e Si sob condições de  $\text{pH} > 8$  (Singer, 1989). Segundo Paquet & Millot (1972), a paligorsquita é um argilo-

mineral instável em solos submetidos a índices de precipitação superiores a 300 mm e se transforma, em sua maioria, em esmectita. Khormali & Abtahi (2003) mostraram que o fato da paligorsquita ser o argilomineral preponderante nos horizontes argílicos do sul do Irã está associado ao aprisionamento da paligorsquita na estrutura cristalina da calcita, que se deposita nos horizontes Bt após os processos de iluviação das argilas.



**FIGURA 4.** Difratograma de DRX em lâminas orientadas (fração  $< 2 \mu\text{m}$ ) de amostras de horizonte Bk de *Aridisol* e Bt de *Alfisol* (ponto 7 na Figura 1). A maior intensidade dos picos obtida na amostra do horizonte Bt (em vermelho) está associada à maior concentração de óxidos e hidróxidos de Fe de baixa cristalinidade ou amorfos na amostra. P = paligorsquita; Q = quartzo; C = calcita; D = dolomita; F = feldspato.

## GÊNESE DAS FEIÇÕES CÁLCICAS

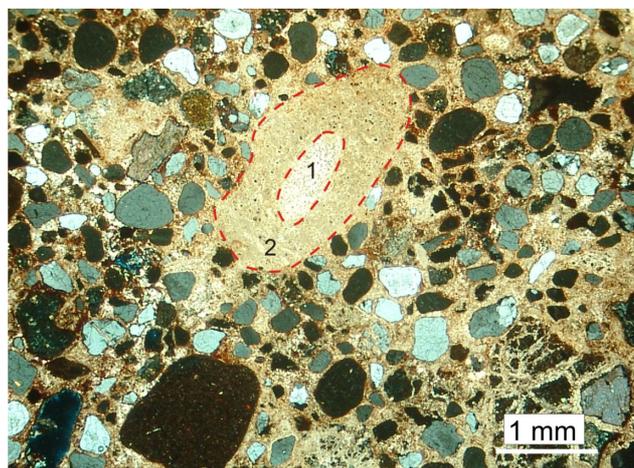
A gênese de feições que indicam a concentração de carbonato de cálcio em paleossolos desenvolvidos sobre material de origem eólica não carbonático, como o caso dos paleossolos da Formação Marília, emerge uma série de questões. A possibilidade de que o carbonato de cálcio tenha origem geogênica, ligada à atividade do lençol freático, foi descartada com base no reconhecimento de diversas feições exclusivas da atividade pedogenética: distribuição irregular do carbonato de cálcio nos perfis (alguns perfis exibem estágios distintos de concentração, como revestimentos, nódulos e lâminas endurecidas), presença de cutãs de calcita (calcãs) sobre cutãs de ferro e argila (ferriargilãs), ocorrência de cimentação em pontes e meniscos ligando os grãos do arcabouço, ocorrência disseminada

de nódulos típicos (órticos) de calcita microcristalina e ausência de nódulos ou bandas de calcita espática seguindo os planos de estratificação. Pimentel et al. (1996) listaram uma série de atributos que permitem a distinção entre as formas de concentração de carbonato de cálcio ligadas à atividade de percolação de águas enriquecidas em  $\text{CaCO}_3$  e outras exclusivas à pedogênese. Segundo os autores, o reconhecimento de feições diagnósticas da pedogênese como perfis pouco espessos (2 a 3 m) organizados em horizontes, estruturas pedogênicas (nodular, laminar, prismática e blocos) e rizólitos, somados a ausência de feições disseminadas de redução de ferro, como mosqueamento proeminente, e ausência de variações mineralógicas entre os carbonatos e outros minerais de origem evaporítica no mesmo

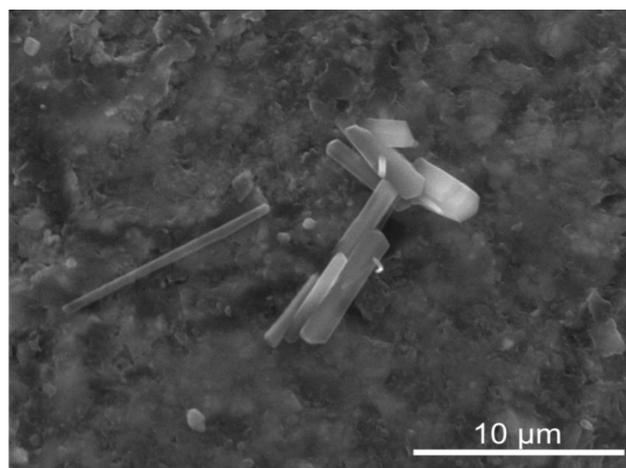
perfil (dolomita, gipsita, halita) permite essa distinção. A observação de microfeições com textura do tipo alfa (Wright, 1990), como cristalárias, nódulos, preenchimentos, grãos do arcabouço “flutuantes”, estruturas plásmicas cristalíticas, hipocutãs, franjas de calcita espática e feições de crescimento expansivo (*displacive*) e outras ligadas à origem biogênica com textura do tipo beta como tubos de raízes (Foto 5), escavações animais e filamentos de fungos calcificados (Foto 6), corroboram a origem pedogênica dos perfis estudados.

A principal fonte de  $\text{CaCO}_3$  para o desenvolvimento de perfis pedogênicos com acumulações de carbonato de cálcio é a poeira eólica (Goudie, 1973). Poeiras ricas em íons de Ca se acumulam na superfície dos perfis e são dissolvidas pelas águas de chuva. A combinação entre os íons de cálcio com o ácido carbônico, derivado em grande parte do  $\text{CO}_2$  liberado pela respiração das raízes das plantas, formará o

$\text{CaCO}_3$  que irá se precipitar no perfil de solo a uma profundidade relativa à quantidade de água disponível na frente de molhamento (Jenny, 1941). A taxa de acumulação do  $\text{CaCO}_3$  em perfis pedogênicos está ligada a espessura dos horizontes Bk e Bck (Bockheim & Douglass, 2006). Machette (1985) quantificou que a taxa média de acumulação de  $\text{CaCO}_3$  por adição de poeira eólica, em três áreas dos estados do Novo México e Utah (EUA), foi de 0,2 g de  $\text{CaCO}_3$  por  $\text{cm}^2$  por  $10^3$  anos. Estas taxas são similares às calculadas posteriormente por Eghbal & Southard (1993) em *Aridisols* com horizontes cálcicos desenvolvidos no deserto de Mojave (Califórnia). O mecanismo de lixiviação de bicarbonatos e íons de cálcio, referido por Goudie (1983) como modelo de eluviação (*per descensum model*), é aqui postulado como o principal agente de concentração dos carbonatos e consequentemente de formação das feições cálcicas nos paleossolos da Formação Marília.



**FOTO 5.** Feição elipsoidal produzida por raiz em lâmina de horizonte Bk de *Aridisol* (ponto 7 na Figura 1). O processo de calcificação ocorreu de forma diferenciada na estrutura radicular. O número 1 indica a calcificação no parênquima medular e o número 2 mostra a calcificação no parênquima cortical.



**FOTO 6.** Imagem obtida em MEV de calcitas com formas aciculares (*needle-fibre calcite*) associada a filamentos de fungos calcificados que ocorrem no interior de tubos de raízes em horizonte Bk de *Aridisol*. Ponto 2 na Figura 1.

## GÊNESE DAS FEIÇÕES ARGÍLICAS

Grande parte das feições argílicas observadas ocorrem nos horizontes Bt e Btk. Nos 11 horizontes Bt estudados, o percentual de cutãs de iluviação (ferriargilãs) que ocorrem na matriz dos paleossolos foi superior a 1% da área das lâminas delgadas, que é o percentual mínimo requerido a classificação de um horizonte argílico (Soil Survey Staff, 1999). Nos horizontes Btk, esses percentuais podem ser menores, devido ao alto conteúdo de Ca em alguns horizontes,

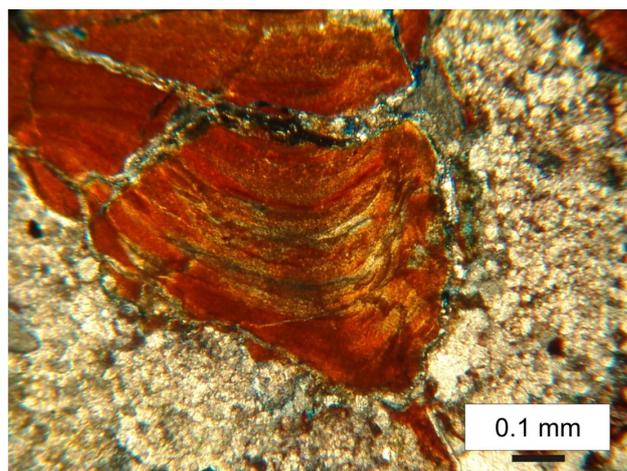
que devem ter provocado a floculação das argilas e assim inibiram a formação de ferriargilãs iluviais.

Em campo, os ferriargilãs, referidos como cerosidade, ocorrem revestindo as paredes dos pedis, na forma de filmes finos em torno de grãos siliciclásticos, e formando pontes que preenchem a porosidade e unem os grãos. Em lâminas, ocorrem sob a superfície de grãos livres e preenchendo a porosidade de empilhamento e canais. Os ferriargilãs de grãos livres apre-

sentam variações entre cutãs de capeamento e de ligação. Os ferriargilãs de canais foram classificados em típicos e crescentes. Este último, só ocorre em poros funcionais maiores, que formaram uma espécie de baía e foram capazes de aprisionar água por mais tempo, provocando um hidromorfismo temporário que permitiu a desestabilização das ligações ferro-argila, facilitando assim a migração e deposição do ferro e posteriormente da argila (Cooper & Vidal-Torrado, 2000). Internamente, esses cutãs apresentam laminação, microfissuração e segregação pós-deposicional de ferro (Foto 7).

A acumulação de argila em horizontes de solo de ambientes áridos tem sido atribuída à deposição de poeira eólica na superfície dos solos, com posterior desenvolvimento e espessamento de horizontes argílicos ao longo do tempo (Wells et al., 1987). Os cálculos de paleoprecipitação indicaram valores mínimos de 518 mm/ano durante o desenvolvimento dos horizontes Bt. Estes valores são considerados suficientes para causar a eluviação de grande parte dos carbonatos e formação de um horizonte argílico, mesmo em curto período de tempo. Holliday (1985) descreveu uma série de horizontes argílicos desenvolvidos sobre depósitos de dunas eólicas no Texas (EUA), com idades aproximadas de 450 anos, em áreas onde os índices de precipitação não ultrapassam os 468 mm/ano.

O modelo de formação dos horizontes argílicos parece seguir os mesmos pressupostos de formação dos horizontes cálcicos: a) deposição de poeiras eólicas, b) iluviação do material. A diferenciação nos processos



**FOTO 7.** Ferriargilã iluvial descrito no horizonte Bt2 do perfil de *Alfisol* da figura 2, mostrando laminação interna, microfissuração e segregação pós-deposicional de ferro.

ocorreu devido ao incremento nos índices de paleoprecipitação que, nos horizontes argílicos, favoreceram a dispersão coloidal das argilas, com posterior translocação e acumulação. Provavelmente, os processos de substituição dos ferriargilãs por carbonato de cálcio foram de tamanha intensidade nos horizontes Btk que não é possível a observação dessas feições mesmo em lâminas delgadas.

## CONCLUSÕES

A análise de feições macro- e micromorfológicas, em conjunto com a análise da geoquímica de duas ordens de paleossolos na Formação Marília, revelou que a gênese das concentrações secundárias de carbonato de cálcio, bem como das associadas à concentração de ferro e argila, foram controladas por processos pedogênicos que permitiram a diferenciação e concentração dessas feições em horizontes cálcicos Bk de *Aridisols* e argílicos Bt de *Aridisols* e *Alfisols*. O principal fator de controle a diferenciação dos processos pedogênicos que culminaram com a formação desses horizontes nos paleossolos estudados foi o clima. As estimativas de paleoprecipitação revelaram dois momentos distintos de evolução paleoclimática da Formação Marília, um caracterizado por momentos de maior aridez, com índices de paleoprecipitação em torno de 240 mm/ano, que permitiram o desenvolvimento de horizontes cálcicos e outro com valores médios de 824 mm/ano, suficientes para a lixiviação dos carbonatos

e favorecimento dos processos de dispersão, translocação e acumulação de argilas nos horizontes argílicos.

Provavelmente, o regime climático que prevaleceu durante a evolução da Formação Marília foi semi-árido, devido à preponderância dos carbonatos nos horizontes de paleossolo. Os momentos de maior pluviosidade parecem ser pontuais, e estariam ligados a condições sazonais mais úmidas. A ocorrência de horizontes argílicos Btk em *Aridisols* e *Alfisols* que apresentam feições cálcicas e argílicas superpostas reforça a interpretação de sazonalidade do clima. Porém, a ausência de um marco estratigráfico nos paleossolos estudados, somado à ausência de um controle temporal entre as fases de iluviação e lixiviação dos carbonatos, não permite, nesse momento, uma reconstrução paleoclimática em termos de frequência e períodos de duração das fases mais úmidas e secas, impossibilitando a investigação das causas que provocaram as variações paleoclimáticas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processos 07/00140-6 e 07/02079-2) pelo auxílio financeiro, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor e a *International Association of Sedimentologists* pelo auxílio financeiro através do *PhD Grant* ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO-ZARZA, A.M. Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record. **Earth-Science Reviews**, v. 60, p. 261-298, 2003.
- ARKLEY, R.J. Calculation of carbonate and water movement in soil from climatic data. **Soil Science**, v. 96, p. 239-248, 1963.
- BASILICI, G.; DAL' BO, P.F.F.; LADEIRA, F.S.B. Climate-induced sediment-palaeosol cycles in a Late Cretaceous dry aeolian sand sheet: Marília Formation (North-West Bauru Basin, Brazil). **Sedimentology**, v. 56, p. 1876-1904, 2009.
- BATEZELLI, A. **Redefinição litoestratigráfica da unidade Araçatuba e da sua extensão regional na Bacia Bauru no estado de São Paulo**. Rio Claro, 1998. 110 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- BATEZELLI, A. **Análise da sedimentação cretácea no triângulo mineiro e sua correlação com áreas adjacentes**. Rio Claro, 2003. 183 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- BIRKELAND, P.W. **Soils and Geomorphology**, 3rd edition. New York: Oxford University Press, 430 p., 1999.
- BOCKHEIM, J.G. & DOUGLASS, D.C. Origin and significance of calcium carbonate in soils of southwestern Patagonia. **Geoderma**, v. 136, p. 751-762, 2006.
- BRONGER, A.; WINTER, R.; SEDOV, S. Weathering and clay mineral formation in two Holocene soils and in buried paleosols in Tadjikistan: towards a Quaternary paleoclimatic record in Central Asia. **Catena**, v. 34, p. 19-34, 1998.
- BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Wolverhampton: Waine Research Publications, 152 p., 1985.
- CASTRO, S.S. **Micromorfologia de solos: bases para descrição de lâminas delgadas**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 143 p., 2002.
- CATT, J.A. Paleopedology manual. **Quaternary International**, v. 6, p. 1-95, 1990.
- CLEVELAND, D.M.; NORDT, L.C.; ATCHLEY, S.C. Paleosols, trace fossils, and precipitation estimates of the uppermost Triassic strata in northern New Mexico. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 257, p. 421-444, 2008.
- COOPER, M. & VIDAL-TORRADO, P. Gênese de ferri-argilões em horizontes B texturais de uma seqüência de solos sobre diabásio em Piracicaba (SP). **Scientia Agricola**, v. 57, n. 4, p. 745-750, 2000.
- DAL' BO, P.F.F. **Interrelação paleossolos e sedimentos em lençóis de areia eólica da Formação Marília (noroeste da Bacia Bauru)**. Campinas, 2008. 99 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.
- DIAS-BRITO, D.; MUSACCHIO, E.A.; CASTRO, J.C.; MARANHÃO, M.S.; SUAREZ, J.M.; RODRIGUES, R. Grupo Bauru: uma unidade continental do Cretáceo no Brasil – concepções baseadas em dados micropaleontológicos, isotópicos e estratigráficos. **Revue de Paléobiologie**, v. 20, n. 1, p. 245-304, 2001.
- DUCHAUFOR, P. **Pedology: pedogenesis and classification**. London: George Allen & Unwin, 187 p., 1982.
- EGHBAL, M.K. & SOUTHARD, R.J. Micromorphological evidence of polygenesis of three Aridisols, western Mojave Desert, California. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 1041-1050, 1993.
- ERNESTO, M.; BATEZELLI, A.; SAAD, A.R.; ETCHEBEHERE, M.L.C.; FÚLFARO, V.J. Início da sedimentação suprabasáltica na Bacia do Paraná: paleomagnetismo do Grupo Caiuá (oeste de São Paulo e noroeste do Paraná). In: SIMPÓSIO DO CRETÁCEO DO BRASIL, 7 e SIMPÓSIO DO TERCÍARIO DO BRASIL, 1, 2006, Serra Negra. **Boletim...** Serra Negra: UNESP, 2006, p. 48.
- ESWARAN, H. & SYS, C. Argillic horizon formation in low activity clay soils, formation and significance to classification. **Pedologie**, v. 29, p. 175-190, 1979.
- ETCHEBEHERE, M.L.C.; SILVA, R.B.; SAAD, A.R.; RESENDE, A.C. Reavaliação do potencial do Grupo Bauru para evaporitos e salmouras continentais. **Geociências**, v. 12, p. 333-352, 1993.
- FERNANDES, L.A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no estado do Paraná e pontal do paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá**. São Paulo, 1992. 171 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- FERNANDES, L.A. **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)**. São Paulo, 1998. 216 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- FERNANDES L.A. & COIMBRA, A.M. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 3, p. 164-176, 1994.
- FERNANDES, L.A. & COIMBRA, A.M. A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 68, n. 2, p. 195-205, 1996.
- FERNANDES, L.A. & COIMBRA, A.M. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 717-728, 2000.
- FÚLFARO, V.J.; ETCHEBEHERE, M.L.C.; PERINOTTO, J.A.J.; SAAD, A.R. Santo Anastácio: um Geossolo cretácico na Bacia Caiuá. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 5, SIMPOSIO SOBRE EL CRETÁCICO DE AMÉRICA DEL SUR, 1, 1999, Serra Negra. **Boletim...** Serra Negra: UNESP, 1999, p. 125-130.
- GILE, L.H.; PETERSON, F.F.; GROSSMAN, R.B. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. **Soil Science**, v. 101, p. 347-354, 1966.
- GOUDIE, A.S. **Duricrusts in Tropical and Subtropical Landscapes**. Oxford: Clarendon, 174 p., 1973.
- GOUDIE, A.S. Calcrete. In: GOUDIE, A.S. & PYE, K. (Eds.), **Chemical Sediments and Geomorphology: Precipitates and Residual in Near-Surface Environment**. London: Academic Press, p. 93-131, 1983.
- HASUI, Y. A Formação Uberaba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 22, 1968, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1968, p. 167-179.
- HOLLIDAY, V.T. Morphology of late Holocene soils at the Lubbock Lake archeological site, Texas. **Soil Science Society of American Journal**, v. 49, p. 938-946, 1985.

32. IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo, 1:500.000**. Nota explicativa. São Paulo, 126 p., 1981.
33. JENNY, H.J. **Factors of soil formation**. New York: McGraw-Hill, 281 p., 1941.
34. KHADEMI, H. & MERMUT, A.R. Submicroscopy and stable isotope geochemistry of carbonates and associated palygorskite in Iranian Aridisols. **European Journal of Soil Science**, v. 50, p. 207-216, 1999.
35. KHORMALI, F. & ABTAHI, A. Origin and distribution of clay minerals in calcareous arid and semi-arid soils of Fars Province, southern Iran. **Clay Minerals**, v. 38, p. 511-527, 2003.
36. KHORMALI, F.; ABTAHI, A.; MAHMOODI, S.; STOOBS, G. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. **Catena**, v. 53, p. 273-301, 2003.
37. KRAUS, M.J. Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geologic applications. **Earth-Science Reviews**, v. 47, p. 41-70, 1999.
38. MACHETTE, M.N. Calcic soils of the southwestern United States. In: WEIDE, D.L. (Ed.), **Soils and Quaternary Geology of the Southwestern United States**. Geological Society of America Special Paper, v. 203, p. 1-21, 1985.
39. MAYNARD, J.B. Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols. **Journal of Geology**, v. 100, p. 279-289, 1992.
40. MILANI, E.J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do gondwana sul-ocidental**. Porto Alegre, 1997. 254 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
41. MORRISON, R.B. Principles of Quaternary soil stratigraphy. In: MORRISON, R.B. & WRIGHT, H.E. (Eds.), **Means of Correlation of Quaternary Successions**. International Union for Quaternary Research, v. 9, p. 1-69, 1967.
42. NESBITT, H.W. & YOUNG, G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. **Nature**, v. 299, p. 715-717, 1982.
43. PAQUET, H. & MILLOT, C. Geochemical evolution of clay minerals in the weathered products and soils of Mediterranean climates. In: INTERNATIONAL CLAY CONFERENCE. **Proceedings...** Madrid, Spain, 1972, p. 199-202.
44. PAULA E SILVA, F. **Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no estado de São Paulo**. Rio Claro, 2003. 166 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
45. PIMENTEL, N.L.; WRIGHT, V.P.; AZEVEDO, T.M. Distinguishing early groundwater alteration effects from pedogenesis in ancient alluvial basins: examples from the Palaeogene of southern Portugal. **Sedimentary Geology**, v. 105, p. 1-10, 1996.
46. REHEIS, M.C. Climatic implications of alternating clay and carbonate formation in semiarid soils of south-central Montana. **Quaternary Research**, v. 27, p. 270-282, 1987.
47. RENNE, P.R.; ERNESTO, M.; PACCA, I.G.; COE, R.S.; GLEN, J.; PRÉVOT, M.; PERRIN, M. Rapid eruption of the Parana flood volcanism, rifting of southern Gondwanaland and the Jurassic-Cretaceous boundary. **Science**, v. 258, p. 975-979, 1992.
48. RETALLACK, G.J. **Soils of the Past**, 2nd edition. Oxford: Blackwell, 404 p., 2001.
49. RETALLACK, G.J. Pedogenic carbonate proxies for amount and seasonality of precipitation in paleosols. **Geology**, v. 33, p. 333-336, 2005.
50. RETALLACK, G.J. Cenozoic paleoclimate on land in North America. **Journal of Geology**, v. 115, p. 271-294, 2007.
51. RICCOMINI, C. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 2, p. 153-162, 1997.
52. RUST, R.H. Alfisols. In: WILDING, L.P.; SMECK, N.E.; HALL, G.F. (Eds.), **Pedogenesis and Soil Taxonomy II. The Soil Orders**. Developments in Soil Science 11B. Amsterdam: Elsevier, p. 253-281, 1983.
53. SANTOS, P.R.; RODRIGUES, M.E.; LUZ, O.T. **A Estrutura de Piratininga: mapeamento geológico de detalhe**. São Paulo, Paulipetro – Consórcio CESP/IPT, 17 p., 1980.
54. SANTUCCI, R.M. & BERTINI, R.J. Distribuição paleogeográfica e biocronológica dos Titanossauros (Saurischia, Sauropoda) do Grupo Bauru, Cretáceo Superior do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 3, p. 307-314, 2001.
55. SHELDON, N.D. & TABOR, N.J. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. **Earth-Science Reviews**, v. 95, p. 1-52, 2009.
56. SHELDON, N.D.; RETALLACK, G.J.; TANAKA, S. Geochemical climofunctions from North American soils and application to paleosols across the Eocene–Oligocene boundary in Oregon. **Journal of Geology**, v. 110, p. 687-696, 2002.
57. SINGER, A. Palygorskite and sepiolite group minerals. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B. (Eds.), **Minerals in Soil Environment**, 2nd edition. Soil Science Society of America Book Series 1, p. 829-872, 1989.
58. SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FÚLFARO, V.J.; SOBREIRO NETO, A.F. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no estado de São Paulo: Grupo Bauru. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 10, p. 177-185, 1980.
59. SOIL SURVEY STAFF. **Soil Survey Manual**. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18. Washington, DC, 437 p., 1993.
60. SOIL SURVEY STAFF. **Soil Taxonomy**, 2nd edition. U.S. Department of Agriculture, Natural Resource Conservation Service 436. Washington, DC, 871 p., 1999.
61. SUGUIO, K. & BARCELOS, J.H. Calcrites of the Bauru Group (Cretaceous), Brazil: petrology and geological significance. **Boletim do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo**, v. 14, p. 31-47, 1983.
62. TAMRAT, E.; ERNESTO, M.; FÚLFARO, V.J.; SAAD, A.R.; BATEZELLI, A.; OLIVEIRA, A.F. Magnetoestratigrafia das formações Uberaba e Marília (Grupo Bauru) no triângulo mineiro (MG). In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 6 e SIMPÓSIO SOBRE EL CRETÁCEO DE AMÉRICA DEL SUR, 2. **Boletim...** São Pedro: UNESP, 2002, p. 323-327.
63. WELLS, S.G.; MCFADDEN, L.D.; DOHRENWEND, J.C. Influence of late Quaternary climatic changes on geomorphic and pedogenic processes on a desert piedmont, eastern Mojave Desert, California. **Quaternary Research**, v. 27, p. 130-146, 1987.
64. WRIGHT, V.P. A micromorphological classification of fossil and recent calcic and petrocalcic microstructures. In: DOUGLAS, L.A. (Ed.), **Soil Micromorphology: a Basic and Applied Science**. Developments in Soil Science 19. Amsterdam: Elsevier, p. 401-407, 1990.
65. WRIGHT, V.P. & TUCKER, M.E. Calcrites: an introduction. In: WRIGHT, V.P., TUCKER, M.E. (Eds.), **Calcrites**. Oxford: Blackwell, p. 1-22, 1991.
66. ZAINÉ, J.E.; BARBOUR, Jr.E.; NEGREIROS, J.H.; RODRIGUES, M.E.; BARRETO, M.L.K.; ETCHEBEHERE, M.L.C.; OLIVEIRA, M.S.; LUZ, O.T.; ANTONINI, S.A.; MUZARDO, V.A. **Geologia do Bloco 38 e 44: Região de Araçatuba, Tupã e Marília**. São Paulo, Relatório Paulipetro, 50 p., 1980.

Manuscrito Recebido em: 20 de novembro de 2009  
Revisado e Aceito em: 6 de fevereiro de 2010

