

SEÇÃO V - GÊNESE, MORFOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA E MICROMORFOLOGIA DE SOLOS SOB CAMPOS DE ALTITUDE NO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO BRIGADEIRO (MG)⁽¹⁾

V. M. BENITES⁽²⁾, C. E. G. R. SCHAEFER⁽³⁾,
E. S. MENDONÇA⁽³⁾ & L. MARTIN NETO⁽⁴⁾

RESUMO

O Parque Estadual da Serra do Brigadeiro (MG) engloba uma área de Mata Atlântica em uma parte da Serra da Mantiqueira. Nas porções mais elevadas da serra (acima de 1.600 m), encontram-se os Campos de Altitude, caracterizados por uma composição florística ímpar, elevado grau de endemismo e pela presença de várias espécies ameaçadas de extinção. Foram amostrados, na área do Campos de Altitude, um Neossolo Litólico, um Espodossolo Ferrocárbico, um Cambissolo Húmico e, na área de Mata Atlântica, um Latossolo Vermelho-Amarelo. Todos os solos estudados apresentaram-se álicos, com baixo pH e baixa capacidade de troca catiônica efetiva, além de acúmulo de matéria orgânica humificada. Os solos estão estreitamente relacionados com a cobertura vegetal, observando-se uma vegetação de menor biomassa sobre materiais mais oligotróficos. Análises micromorfológicas indicaram feições relacionadas com processos de podzolização. A interpretação das formas identificadas nas lâminas de solo permitiu inferências sobre os processos de gênese dos solos, não identificados pelas análises químicas. As substâncias húmicas foram fracionadas, indicando elevado teor de ácidos fúlvicos. Os teores dessa fração orgânica estiveram associados a formas pouco cristalinas de Fe e Al, extraídas pelo oxalato, indicando o papel da matéria orgânica na mobilidade desses elementos. Análises espectroscópicas das substâncias húmicas, como espectrometria no infravermelho e de ressonância paramagnética eletrônica, indicaram alta aromaticidade das substâncias húmicas produzidas sob vegetação de Campos de Altitude, em relação às substâncias húmicas produzidas sob vegetação florestal. Esta maior aromaticidade pode estar relacionada com o efeito do fogo ou com a própria constituição fisiológica da cobertura vegetal. A associação

⁽¹⁾ Trabalho extraído da tese de mestrado do primeiro autor, em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa. Recebido para publicação em dezembro de 1999 e aprovado em abril de 2001.

⁽²⁾ Doutorando em Solos e Nutrição de Plantas do Departamento Solos, Universidade Federal de Viçosa - UFV. Av. PH Rolfs s/n Campus CEP 36571-000 Viçosa (MG). Bolsista da CAPES. E-mail: vinicius@solos.ufv.br

⁽³⁾ Professor Adjunto do Departamento de Solos, UFV.

⁽⁴⁾ Pesquisador da EMBRAPA-CNPDIA. Rua XV de Novembro 1452, CEP 13560-970 São Carlos (SP).

entre os solos em processo de podzolização e a vegetação de Campos de Altitude revela maior eficiência da matéria orgânica formada nesses ambientes nos processos de queluviação e intemperismo da fração mineral. Esta hipótese é sustentada pela caracterização das substâncias húmicas extraídas deste pedoambiente.

Termos de indexação: unidades de conservação, substâncias húmicas, pedologia, Ressonância Paramagnética Eletrônica.

SUMMARY: ORGANIC MATTER CHARACTERIZATION AND MICROMORPHOLOGY OF SOILS UNDER "CAMPOS DE ALTITUDE" AT SERRA DO BRIGADEIRO STATE PARK, MINAS GERAIS-BRAZIL

The Serra do Brigadeiro State Park is covered by tropical Atlantic rain forest, as part of the Mantiqueira crystalline range. In the upper areas (above 1.600 m), a type of vegetation with singular floristic composition is found, with high endemism and a number of endangered species, here called "Campos de Altitude". A Lithosol, a Spodosol (Podzol) and a Cambisol, all associated with "Campos de Altitude", and a Latosol under rain forest, were sampled. These soils showed high Al saturation, low pH and severe dystrophism, with varying degrees of organic matter accumulation. A relation between low biomass vegetation and oligotrophic environment was noticed. Micromorphological features indicated an intense process of podzolization, leading to complexation and mobilization of Fe/Al compounds, especially in "Campos de Altitude". The soil organic matter fractioning revealed larger amounts of fulvic acids (FA), whereas the FA levels were correlated with Fe/Al oxalate extractable forms, indicating a FA role in the metal complexation and cheluviation. The investigation of the humic substances, using Infrared and Electronic Paramagnetic Resonance spectroscopy, indicated a trend of increasing aromaticity and reducing alifacity of the grassland soil organic matter in relation to the forest soil organic matter. These values can either be related with litter quality or burning. A close relation between the Podzols and "Campos de Altitude" was also observed. As a consequence of Podzol's distinct organic matter quality, its higher reactivity with the soil minerals plays a role in the cheluviation process and mineral weathering, as corroborated by the organic matter fractioning.

Index terms: conservation units, humic substances, pedology, Electronic Paramagnetic Resonance.

INTRODUÇÃO

O estado de Minas Gerais caracteriza-se por uma grande diversidade de ambientes, variabilidade esta ocasionada pelas formas de relevo. Duas grandes cadeias montanhosas, o Espinhaço e a Mantiqueira, atravessam o estado, e, ao longo destas cadeias montanhosas, ocorrem estratos de vegetação de características ímpares, caracterizados como Campos de Altitude. Esta vegetação pode ocorrer sobre quartzitos, como no caso do Espinhaço, ou sobre rochas do complexo cristalino (granitos e gnaisses), como no caso da Mantiqueira, caracterizando-se como uma vegetação relíquia, florística e ecologicamente diferente da flora dominante na região. A composição florística destes estratos é marcada por um alto grau de endemismo e muitas espécies da flora e da fauna ameaçadas de extinção. Por esta razão, foram criadas unidades de

conservação, como os Parques Nacionais do Itatiaia, do Caparaó, da Serra do Cipó e da Serra da Canastra, e os Parques Estaduais do Ibitipoca, do Itacolomi e da Serra do Brigadeiro, além de áreas de proteção ambiental de administração pública e particulares.

Considerando a grande biodiversidade e a relativa fragilidade destes sistemas, estas áreas são consideradas de prioridade para conservação da biodiversidade e para a investigação científica por órgãos do governo e por organizações não-governamentais (Biodiversitas, 1999).

A maioria dos trabalhos científicos realizados nestas áreas trata de aspectos relacionados com a fauna e a flora, sendo escassos os trabalhos sobre o meio físico, sobretudo a caracterização dos solos. Entretanto, trabalhos preliminares na área de Campos de Altitude no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro (Benites et al., 1999) apontaram singularidades nas características dos solos e nos

processos de pedogênese, destacando-se a importância da matéria orgânica neste sistema. Neste sentido, a análise micromorfológica dos solos permite evidenciar alguns aspectos de gênese dificilmente observados por análises químicas. A caracterização das substâncias húmicas, por sua vez, como uma ferramenta para a compreensão das condições pedoambientais e da relação entre o solo e a vegetação local, foi utilizada para elucidar o papel da matéria orgânica do solo nos processos pedogenéticos atuantes.

Com referência à gênese de Espodosolos, no Brasil, os trabalhos efetuados limitam-se às ocorrências sobre materiais argilo-arenosos inconsolidados, em condições áquicas (Klinge, 1965; Chauvel et al., 1987; Gomes et al., 1998; Dubroeuq & Volkoff, 1998), ou sobre substratos areno-quartzosos derivados do intemperismo de quartzitos (Campos et al., 1997). Entretanto, não existem trabalhos sobre solos que sofreram podzolização em condições altimontanas sobre rochas cristalinas, embora tenham sido relatadas ocorrências pontuais destes solos na Serra Gaúcha (EMBRAPA, 1982).

Este trabalho teve como objetivos caracterizar a matéria orgânica e observar as feições micropedológicas em solos desenvolvidos sobre rochas granítico-gnáissicas em áreas de Campos de Altitude, procurando compreender o papel dos solos e da matéria orgânica na sustentabilidade deste ambiente, com vistas em criar subsídios para sua conservação.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área

O Parque Estadual da Serra do Brigadeiro está localizado no município de Araponga (MG) (20° 40' S e 42° 26' W). A região apresenta altitudes superiores a 1.200 m e encontra-se no domínio das escarpas e dos maciços modelados em rochas do complexo cristalino (migmatitos e gnaisses charnoquíticos), fazendo parte da Serra da Mantiqueira. O clima dominante é o Cwb, pela classificação de Köppen, mesotérmico, com temperatura média de 15°C, podendo-se registrar temperaturas mínimas inferiores a 0°C. A precipitação média anual é de 1.500 mm, com período seco de junho a agosto.

A vegetação na maior parte da área abrangida pelo parque é formada por Mata Atlântica. Entretanto, em áreas acima da cota de 1.600 m, observam-se, em platôs isolados, estratos de vegetação com fitofisionomia de Campos de Altitude, que se destacam por sua composição florística extremamente especializada, constituindo uma vegetação relíquia. Esta vegetação é formada por plantas de pequeno porte, com adaptações morfo-fisiológicas às condições de estresse hídrico e nutricional. Observa-se, nesta vegetação singular,

um elevado grau de endemismo (Joly, 1979), sendo encontradas espécies da flora e da fauna muito raras, além de espécies ameaçadas de extinção (Biodiversitas, 1999).

Dois estratos vegetacionais básicos podem ser distintos: o herbáceo e o subarbustivo-arbóreo, além de formações especiais, como os charcos e os afloramentos rochosos. O estrato herbáceo é predominantemente graminóide, com representantes das famílias Poaceae, Cyperaceae, Eriocaulaceae e Xyridaceae, sendo essa duas últimas, juntamente com as Velloziaceae, praticamente restritas aos Campos de Altitude. Já o estrato subarbustivo-arbóreo tem como famílias típicas as Melastomataceae, Asteraceae, Leguminosae, Ericaceae, Velloziaceae e Apocynaceae. Os charcos, pela sua natureza úmida, apresentam vegetais saprófitos, como *Utricularia* sp. e *Drosera* sp., além de inúmeras briófitas e líquenes com capacidade de reter grande quantidade de água. Os afloramentos rochosos caracterizam-se pela ausência ou pouca profundidade dos solos, onde vegetais rupícolas, como Orchidaceae, Cactaceae e Bromeliaceae, são abundantes, além de geófitos de extrema beleza, representantes das famílias Amaryllidaceae, Alstroemeridaceae e Apocynaceae.

Foram selecionados quatro perfis de solo, seguindo um transecto do pico do Boné até o vale do córrego do Boné, a saber: um Neossolo Litólico, um Espodosolo Ferrocárbico e um Cambissolo Húmico sob Campos de Altitude; e um Latossolo Vermelho-Amarelo sob Mata Atlântica (Figura 1). A análise textural e algumas propriedades químicas, como pH, Ca + Mg, Al³⁺, CTC a pH 7,0, C e N, foram determinadas, conforme EMBRAPA (1997).

Micromorfologia

Foram amostrados blocos indeformados dos horizontes E/Bh, Bhs, Bs/C, do saprolito do Espodosolo e o horizonte 2Bi do Cambissolo. Na coleta do material, foram usadas caixas de alumínio (10 x 5 x 5 cm). O bloco retirado foi submetido à secagem em estufa a 35°C, por dois dias, seguida pela saturação por imersão com acetona. Seguiu-se a impregnação do bloco com a resina de poliéster (POLYLITE T-208), com uso de acelerador, diluído com estireno, e adição de pigmento UV fluorescente (UVITEX OB, Ciba-Geigy). A polimerização foi feita em ambiente ventilado, por sete dias. O bloco impregnado foi serrado para a obtenção de uma fatia delgada, entre 2 e 4 mm de espessura. As amostras foram remetidas ao laboratório de Micromorfologia da Universidade de Reading (Inglaterra), para a preparação de seções finas de grande dimensão, pelo desbaste de uma das faces da fatia montada em lâmina de vidro, até à espessura de 30 µm. As seções finas foram estudadas em microscópio petrográfico sob luz transmitida e sob nicóis cruzados. Na descrição micromorfológica, utilizou-se o princípio básico dos três níveis (Bullock et al., 1985), pela

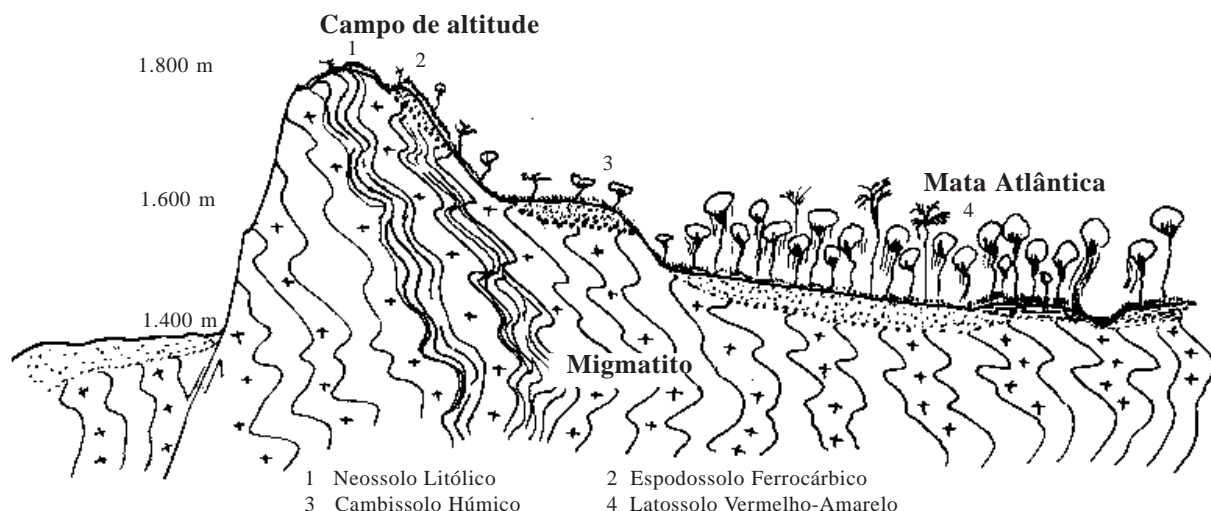


Figura 1. Transecto do pico do Boné até o leito do córrego do Boné, esquematizando os diferentes estratos e os solos amostrados.

seqüência: (a) descrição e identificação visual do componente, (b) comparação visual do componente com padrões de referência e (c) medições diretas do componente: tamanho, abundância, área proporcional, cor, forma, textura da superfície, limites, variabilidade, orientação e padrões de distribuição. A terminologia usada é descrita em Fitzpatrick (1993).

Caracterização da matéria orgânica do solo

Fracionamento químico quantitativo de substâncias húmicas - O fracionamento químico das substâncias húmicas foi feito em triplicatas, em amostras de todos os horizontes estudados, segundo a técnica de solubilidade diferencial, utilizando-se os conceitos de frações húmicas estabelecidos pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas, descritos por Hayes et al. (1989). Na extração dos ácidos húmicos e fúlvicos, foi empregada solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ na relação solo:extrator de 1:10 p/v, utilizando-se 1,0 g de solo (0,5 g para as amostras com teor de carbono total superior a 100,0 g kg⁻¹) e um tempo de contato de 24 h. A separação entre o extrato alcalino e o resíduo foi feita por centrifugação a 3.000 g (FCR_{média}) por 20 min. Seguiram-se três lavagens do resíduo com a mesma solução, adicionando-se os extratos aos anteriormente reservados. O resíduo foi recolhido e reservado para determinação de carbono na forma de humina (H). O extrato alcalino (EA) teve o pH ajustado para 2,0 ± 0,1 com solução aquosa de H₂SO₄ 20% e decantou por 18 h. O precipitado, fração ácidos húmicos (FAH), foi separado da fração solúvel por centrifugação a 3.000 g (FCR_{média}) por 5 min, rediluído em solução NaOH 0,1 mol L⁻¹ e seu volume aferido para 50 mL. A porção solúvel no extrato acidificado, fração ácidos fúlvicos (FAF), teve o volume aferido para 50 mL, utilizando-se água destilada. A determinação quantitativa de carbono

nos extratos das frações ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina foi feita segundo método de Yoemans & Bremner (1988). Foram calculadas as relações entre as frações ácidos húmicos e ácidos fúlvicos (FAH:FAF) e a relação entre as frações solúveis no extrato alcalino (FAF + FAH) e o resíduo (humina), obtendo-se o índice (EA:H).

Extração e purificação de ácidos húmicos para análises espectroscópicas - Os ácidos húmicos (AH), utilizados nas análises espectroscópicas, foram extraídos dos horizontes A (Neossolo), A + E e Bhs (Espodossolo), 2Bi (Cambissolo) e A (Latossolo). Adicionaram-se a 20 g de cada amostra 200 mL de solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹, sob atmosfera de N₂. Após agitação por 24 h, o material foi centrifugado a 10.000 g (FCR_{média}) por 20 min. O sobrenadante foi recolhido e imediatamente o pH foi ajustado para 2,0, por gotejamento de solução aquosa de HCl 20%. O resíduo foi novamente submetido à extração, da mesma forma, e o sobrenadante juntado ao anterior, ajustando-se, imediatamente, o pH para 2,0. O extrato acidificado foi reservado para a precipitação dos AH. Após 18 h, o excesso de sobrenadante (FAF) foi sifonado e descartado. O restante do material foi centrifugado a 5.000 g (FCR_{média}) por 10 min, eliminando-se o sobrenadante. Os AH foram ressolubilizados em 200 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹, sob atmosfera de N₂, e o processo repetido duas vezes. Esse passo permitiu a eliminação parcial de argilas e ácidos fúlvicos co-precipitados. Os AH precipitados foram tratados com solução de HF + HCl 0,5% (Schnitzer, 1982) por 24 h e centrifugados a 5.000 g (FCR_{média}), repetindo-se o processo até à clarificação do sobrenadante, o que ocorreu no quarto ciclo, para todas as amostras. As amostras purificadas foram lavadas duas vezes com solução HCl 0,01 mol L⁻¹, dialisadas em água deionizada até teste negativo para cloretos, e liofilizadas.

Caracterização espectroscópica dos AH

Os espectros no infravermelho dos AH purificados foram lidos na faixa de 4.000-400 cm^{-1} , em pastilhas de KBr (2 mg de ácido húmico + 200 mg de KBr seco), utilizando espectrômetro Perkin-Elmer FTIR Spectrum 1000. Cada espectro foi obtido pela média de 128 leituras, com uma resolução de 4 cm^{-1} .

Os espectros de ressonância paramagnética eletrônica dos AH purificados foram obtidos em triplicatas, utilizando-se um espectrômetro EPR-Varian, em banda X (9 GHz), do laboratório de Biofísica do IFSC-USP, São Carlos (SP). A quantificação do número de spins foi obtida pela área dos sinais de semiquinona, calculada através da aproximação $I \times \Delta H^2$, sendo I a amplitude do sinal e ΔH a largura de linha em Gauss, utilizando um padrão (Strong Pitch) com concentração conhecida de spins por unidade de massa e um rubi sintético como padrão secundário (Martin Neto et al., 1994). As leituras foram realizadas em amostras sólidas à temperatura ambiente, com campo magnético central (H_0) de 3.400 G, frequência de modulação de 100 KHz, amplitude de modulação de 1,0 G e potência de microondas de 1,0 mW. O valor g foi calculado pela equação de Zeeman (Senesi & Steelink, 1989).

Para os cálculos com espectros no UV-VIS, no infravermelho, e de ressonância paramagnética eletrônica, foi utilizado o programa Microcal Origin 3.5 (1994).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os solos apresentaram alta saturação por alumínio e baixos teores de cálcio e magnésio, sendo

esta condição mais acentuada no Campos de Altitude (Quadro 1). Os horizontes superficiais dos solos mostram-se bastante escuros, com cores entre preto e bruno-acinzentado-muito-escuro, relacionadas com altos teores de matéria orgânica. Os elevados teores de carbono indicaram baixa taxa de decomposição da matéria orgânica, sobretudo nas áreas de Campos de Altitude, uma vez que a vegetação apresentava baixa produção de biomassa. Diversos fatores podem estar relacionados com a preservação da matéria orgânica. É provável que as baixas temperaturas registradas na região, associadas à baixa disponibilidade de nutrientes no solo, condicionem um metabolismo microbiano mais reduzido, retardando a decomposição dos resíduos vegetais. Entretanto, acredita ser a toxidez pelo alumínio o principal fator de limitação da atividade microbiana.

O fracionamento das formas de Fe e Al indicou pouca cristalinidade dos minerais que contêm estes elementos, notadamente nos solos sob Campos de Altitude (Quadro 2). A coloração bruno-amarelada dos solos reflete o predomínio das formas hidratadas de óxidos de Fe, como a goethita (Kämpf & Schwertmann, 1983), confirmado pela análise mineralógica da fração argila por difratometria de raios-X (Quadro 2). Este fato está relacionado com o efeito anti-hematizante promovido pela presença de matéria orgânica (Schwertmann & Taylor, 1989).

Micromorfologia

Importantes aspectos pedogenéticos puderam ser verificados pela observação das lâminas em seção fina, estando as principais feições micromorfológicas sumariadas no quadro 3. A micromorfologia do Espodossolo sob Campos de Altitude demonstrou feições compatíveis com a pedogênese deste solo (Figura 2).

Quadro 1. Cobertura vegetal, classificação, caracterização química e análise textural dos solos estudados

Solo	Vegetação	Horizonte	Profundidade	Cor seca	ag	af	Silte	Argila	pH	Ca + Mg	Al	CTC	C	N
			cm		— dag kg ⁻¹ —					— cmol kg ⁻¹ —			— dag kg ⁻¹ —	
Neossolo Litólico		A	0-3	10 YR 2/1	36	34	15	14	3,99	0,13	4,09	29,33	7,15	0,64
		A + E	0-14	10 YR 3/1	54	25	10	11	4,10	0,24	3,07	19,91	4,76	0,24
Espodossolo Ferrocárbico	Campos de Altitude	Bh	14-20	10 YR 3/2	58	23	6	12	4,37	0,07	3,72	20,75	2,72	0,13
		Bhs	20-40	10 YR 3/3	61	22	5	12	4,47	0,07	2,88	17,58	2,70	0,11
		Bs/C	40-48	10 YR 6/4	66	20	9	5	4,63	0,06	0,73	5,63	0,52	0,03
		C	48-62	2,5 Y 7/2	53	16	14	18	4,79	0,07	1,59	9,27	0,76	0,04
Cambissolo Húmico		A ₁	0-9	10 YR 3/2	47	24	12	16	4,37	0,17	5,06	34,19	8,99	0,64
		A ₂	9-20	10 YR 3/4	40	26	15	19	4,31	0,17	4,86	31,92	7,51	0,46
		2B _i	30-55	7,5 YR 4/	41	26	15	17	4,42	0,11	4,41	27,23	4,99	0,22
Latossolo Vermelho-Amarelo	Mata Atlântica	A	0-10	10 YR 3/3	30	12	15	43	3,99	0,39	3,68	21,47	4,68	0,41
		AB	10-21	10 YR 4/4	27	15	15	44	4,19	0,21	3,01	17,51	3,42	0,28
		Bw ₁	21-45	10 YR 5/6	23	14	16	47	4,31	0,11	2,17	12,65	2,50	0,20
		Bw ₂	45-	10 YR 6/6	19	14	15	52	4,43	0,08	0,88	7,61	1,14	0,10

Quadro 2. Mineralogia da fração argila, formas de Fe e Al extraídas pelo oxalato (Fe_o e Al_o)⁽¹⁾, formas de Fe extraídas pelo DCB (Fe_{DCB})⁽²⁾ e índice Fe oxalato/DCB (Fe_{o/d}) dos solos estudados

Solo	Vegetação	Horizonte	Mineralogia ⁽³⁾	Al _o	Fe _o	Fe _{DCB}	Fe _{o/d}
———— g kg solo ⁻¹ ————							
Neossolo Litólico		A	Ka, Qz, Fd, Mi, Gb, Gt	3,4	2,9	4,9	0,58
Espodossolo Ferrocárbico	Campos de Altitude	A + E	Qz, An, Gb, Ka	1,8	2,9	4,5	0,65
		Bh	Qz, Gb, Gt, An, Ka	8,4	10,2	16,3	0,62
		Bhs	Qz, Gb, Gt, An, Ka	9,2	10,9	15,9	0,69
		Bs/C	Qz, Gb, Gt, An, Ka	2,2	4,5	7,8	0,57
		C	Gb, Gt, Ka, Fd	5,8	3,7	17,0	0,22
Cambissolo Húmico		A ₁	Gb, Ka, Qz, Gt	8,6	14,9	45,5	0,33
		A ₂	Gb, Ka, Gt, Mi	6,6	19,6	61,9	0,32
		2Bi	Gb, Gt, Ka, Mi	10,6	29,0	74,7	0,39
Latosolo Vermelho- Amarelo	Mata Atlântica	A	Ka, Gb, Gt, Hm	4,0	3,7	54,4	0,07
		AB	Ka, Gb, Gt, Hm	4,8	4,0	53,9	0,08
		Bw ₁	Ka, Gb, Gt, Hm	5,0	4,1	62,9	0,07
		Bw ₂	Ka, Gb, Gt, Hm	4,0	3,4	65,4	0,05

⁽¹⁾ e ⁽²⁾ Conforme Mckeague & Day (1966). ⁽³⁾ Ka - caulinita, Gb - gibbsita, Gt - goethita, Qz - quartzo, Hm - hematita, An - anatócio, Mi - minerais 2:1(micas), Fd - feldspato.

Pela análise micromorfológica da lâmina amostrada no contato E/Bh (Figura 2 E/Bh), puderam ser evidenciados os contrastes entre os horizontes. As feições micropedológicas demonstraram ser o horizonte eluvial formado por um esqueleto basicamente quartzoso, com grãos subarredondados e arestados, com baixo grau de seleção e estrutura do tipo grãos simples (Figura 2a). Esse padrão é típico de horizontes eluviais, onde atuam os mecanismos de translocação de complexos organometálicos (Fitzpatrick, 1993) e ferrólise. No horizonte Bh, a estrutura é do tipo grãos interligados (coat & bridge), onde os grãos esqueléticos são envolvidos por abundante material orgânico de aspecto granuloso, que se conectam por um plasma incipiente, organomineral, formando pontes entre os grãos (Figura 2b). No horizonte E, essas pontes são praticamente inexistentes, e os grãos estão mais individualizados (Figura 2a). Não há indícios macromorfológicos no perfil que permitam concluir que o horizonte E seja uma fase degradada do Bh, sotoposto. O caráter isotrópico do plasma sob nicóis cruzados é quase absoluto, indicando o predomínio de material não-cristalino, mesmo em Bh onde ocorrem maiores concentrações organominerais de cores bruno-amareladas. Domínios anisotrópicos, indicando alguma cristalinidade, ocorrem em raros fragmentos litoreliquiários avermelhados, preservando estruturas do plasma original do saprolito. A porosidade de E/Bh é abundante e formada por uma rede de poros intergranulares. Observam-se abundantes pelotas fecais indiscriminadas, raízes e fragmentos carbonizados em processo de degradação. Pseudomorfos de biotita transformados em

vermiculita e caulinita, comuns no horizonte Bs/C (Figura 2e) e no saprolito do Espodossolo (Figura 2g), não foram observados entre os grãos do esqueleto. Fenocristais de feldspato potássico também mostraram-se ausentes. Películas organominerais incipientes envolvendo grãos foram comuns, especialmente em Bh.

Pela análise da seção fina do horizonte Bhs do Espodossolo (Figura 2 Bhs), observaram-se grãos do esqueleto ainda mais arestados e mal selecionados que em Bh e maior número de grãos grosseiros maiores que 1,5 mm. Na parte superior da seção fina, ocorreram películas organoferruginosas, com predomínio de materiais coloidais translocados, recobrimo e ligando os grãos, e com caráter isotrópico dominante. Na parte inferior, notaram-se domínios com certa anisotropia entre nicóis cruzados (Figura 2c), com acúmulo de materiais ferruginosos, mais pobres em matéria orgânica, sendo típicos de "ortsteins" descritos na micromorfologia de Espodossolos (De Coninck & Righi, 1983).

A anisotropia ótica indicou o grau mais avançado de acúmulos de Fe, com incipiente reoxidação, talvez na forma de ferridrita, no contato de Bhs e Bs, provocando a maior permeabilidade e aeração que propiciam condições à oxidação. O volume de materiais ferruginosos acumulados foi significativo, causado por um processo distinto da contribuição de Fe por queluviação, a exemplo do descrito em horizontes plácicos por De Coninck & Mckeague (1985), os quais admitiram a contribuição de mecanismos de fluxo lateral de Fe na formação desses horizontes.

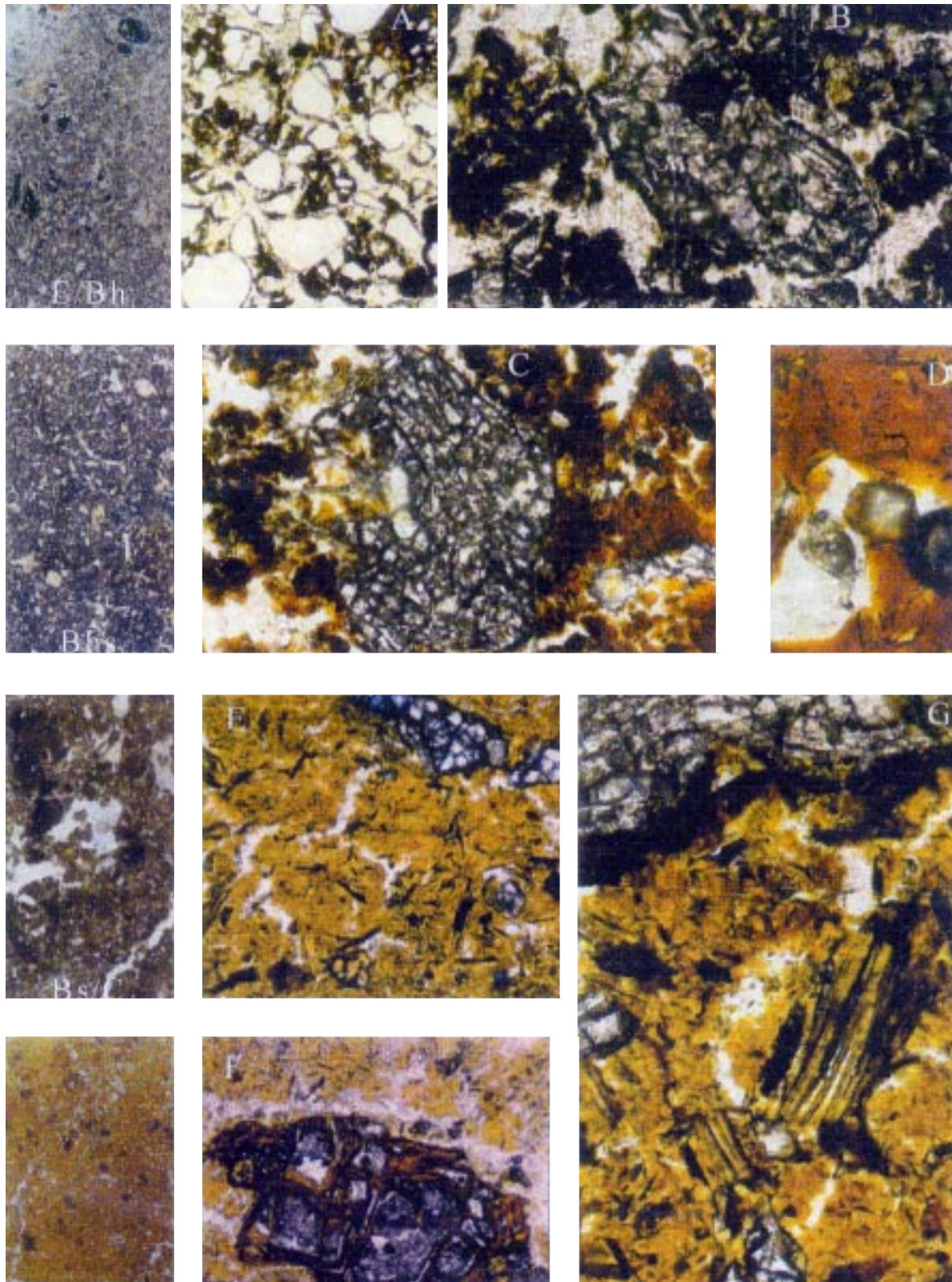


Figura 2. Fotomicrografias das lâminas em seção fina de uma seqüência do contato E/Bh, do horizonte Bhs, do horizonte Bs/C, e do saprolito de um Espodosolo Ferrocárbico; detalhes em objetivas de maior aumento (200X) de: (a) detalhe do horizonte E sob luz plana; (b) detalhe do horizonte Bh sob luz plana; (c) preenchimento do espaço intergranular com géis organominerais; (d) região de acúmulo de Fe; (e) matriz densa e siltosa do horizonte Bs/C; (f) pseudomorfo de feldspato substituído por gibbsita; e (g) pseudomorfos de biotita substituída por vermiculita.

Quadro 3. Características micromorfológicas de um Espodossolo Ferrocárbico (E/Bh; Bhs; Bs/C e Saprolito) e de um Cambissolo Húmico (2Bi) da Serra do Brigadeiro (MG)⁽¹⁾

n	Horizonte E/Bh	Horizonte Bhs	Horizonte Bs/C	Saprolito	Horizonte 2Bi
Matriz do solo (sob luz plana e polarizada) ⁽²⁾	Isotrópico, com raras feições de anisotropia (concreções litoreliquiarias)	Isotrópico, com domínios orientados com fraca anisotropia (quelatos Fe/Al cripto cristalinos?)	Anisotrópica	Fortemente anisotrópica, com plasma argilo-siltoso isotrópico	Isotrópica, com domínios anisotrópicos ocasionais (litorelíquias, pseudomorfos)
Tipo de estrutura	Grãos simples e "coat & bridge"	"coat & bridge" (grãos envolvidos e ligados entre si) com "ORSTEIN"	Composta massiva e blocos subangulares em cunhas	Incompleta blocos subangulares/granular	Composta granular e grãos simples
Esqueleto (composição)	Quartzo arredondado e anguloso, mal selecionado; raras concreções e fragmentos carbonizados	Quartzo arredondado e anguloso, mal selecionado; raras concreções	Raros grãos de quartzo angulosos. Muitos pseudomorfos de K-feldspato e biotita, e nódulos de gibbsita	Raros grãos de quartzo angulosos. Pseudomorfos de K-feldspato em concreções e nódulos de gibbsita	Quartzo, anguloso ou não. Pseudomorfos de K-feldspato em concreções e nódulos de gibbsita
Porosidade (%)	50-60	40-50	30-40	50-60	50-60
Forma dos poros	Canais intergranulares abundantes, raras vesículas	Canais intergranulares abundantes, raras vesículas, poros irregulares, cavidades	Canais intergranulares abundantes	Canais intergranulares abundantes, raras vesículas	Canais intergranulares, fraturas e cavidades não-conectadas, poros irregulares
Cor do plasma	Bruno-escuro/bruno-amarelado-escuro	Bruno-amarelado-escuro/bruno-avermelhado-escuro/preto	Bruno-avermelhado-claro/vermelho-amarelo/vermelho-escuro	Bruno-avermelhado-claro, vermelho-amarelo/vermelho-escuro	Vermelho-amarelo a bruno-amarelado-escuro
Feições iluviais	Organs delgados cobrindo grãos de quartzo e litorelíquias em Bh, ausentes em E	Organs espessos e ferrans cobrindo grãos de quartzo, fenocristais reliquiários e complexos organominerais	Ausentes	Ausentes	Ferrans, preenchimentos em fraturas. Microdeposição de organs sobre os grãos do esqueleto
Feições pedobiológicas e de alteração	Estruturas orgânicas humificadas, raízes, restos lignificados (raros em Bh), carvão. Abundantes pelotas fecais	Estruturas orgânicas humificadas. Abundantes pelotas fecais	Canais biológicos sem cutans. Nódulos e concreções gibbsíticas. Litorelíquias herdadas de intercrescimento Qtzo/feldspato	Pelotas fecais, ovóides, canais biológicos sem cutans. Fragmentos carbonizados (raros), nódulos e concreções gibbsíticas. Litorelíquias herdadas de intercrescimento Qtzo/feldspato	Pelotas fecais, ovóides, cavidades biogênicas; estruturas humificadas, raízes e fragmentos carbonizados. Micronódulos gibbsíticos interpedais herdados, formas lenticulares de ferrans e organs; fragmentos carbonizados; raízes

⁽¹⁾ Segundo FitzPatrick (1993); Schaefer (1994). ⁽²⁾ A estrutura plásmica, segundo Brewer (1964), conforme traduzido e adaptado por Lima et al. (1985), seria respectivamente isotica/inundúlica, isotica/inundúlica, inséptica e inséptica, em E/Bh, Bhs, Bs/C e no saprolito.

A seção fina do horizonte Bs/C do Espodosolo (Figura 2 Bs/C) apresentou um material não estruturado com anisotropia entre nicóis cruzados, com blocos irregulares em cunhas, e porosidade total reduzida em relação aos horizontes sobrepostos (Figura 2e). A matriz foi formada por abundantes pseudomorfos de biotita transformada em caulinita/vermiculita (Figura 2g) e, principalmente, de feldspato transformado em gibbsita (Figura 2f). A presença de pseudomorfos de feldspato transformado em gibbsita, preservados dentro das concreções, foi observada em solos gibbsíticos ricos em matéria orgânica (Young & Stephen, 1965). Essas feições indicaram a gênese da gibbsita diretamente a partir de alumino-silicatos primários, revelando acentuada remoção de sílica do perfil. (Hsu, 1989). Percebeu-se uma zona de concentração de materiais mal cristalizados de Fe nas partes mais oxidadas. Em vista dos abundantes pseudomorfos, o plasma (Figura 2e) foi mais siltoso que o plasma do saprolito, com certa anisotropia ótica. Não houve evidências de resíduos orgânicos identificáveis.

A seção fina do saprolito (Figura 2 saprolito) apresentou um plasma argiloso fino, moderadamente anisotrópico, com abundante microporosidade e presença de nódulos entre 0,5 e 8 mm de diâmetro, na forma de pseudomorfos subhedrais de gibbsita, substituindo fenocristais de feldspato potássico intercrescido com quartzo. Os retículos em paliçada de gibbsita mantiveram a clivagem feldspática, à

semelhança de pseudomorfos descritos em bauxitas e em solos gibbsíticos (Young & Stephen, 1965; Valetton, 1972). Os grãos de quartzo apresentaram-se microfraturados e os cristais de gibbsita pigmentados por materiais ferruginosos, provavelmente de baixa cristalinidade. A alteração isovolumétrica e a remoção da sílica deixaram poros, preenchidos pela resina. Os grãos grosseiros ocorreram em uma matriz densa de unidades menores, entremeadas de poros intersticiais. A microestrutura foi predominantemente granular; entretanto, observou-se uma tendência à formação de microagregados subangulares.

A micropedologia do horizonte 2Bi do Cambissolo apresentou características típicas de podzolização não evidenciadas na análise macromorfológica do perfil, mas a matriz indicou a abundância de materiais retrabalhados. Foram observadas feições de microdeposição de material orgânico coloidal, iluviado, nas faces dos grãos do esqueleto e nos espaços porosos intergranulares. Essas películas orgânicas recobriam ainda microfraturas dentro dos grãos de quartzo, que se encontravam dispersos em meio ao fundo matricial orgânico. Observou-se a presença de microestrutura granular e pelotas fecais, normalmente encontradas em horizontes superficiais, o que corrobora a descrição morfológica que identificou uma descontinuidade por enterramento de um solo preexistente. Formas lenticulares de microdeposição iluvial ferruginosa são comuns tanto

Quadro 4. Valores médios de triplicatas (desvios entre parênteses) dos teores de carbono nas frações ácidos fúlvicos (FAF), ácidos húmicos (FAH), humina (H) e no somatório destas frações, em relação ao solo integral e em relação ao teor de carbono total (COT). Relações entre a fração ácidos húmicos e a fração ácidos fúlvicos (FAH/FAF), e entre o extrato alcalino e o resíduo (EA/H)

Solo	Vegetação	Horizonte	COT ⁽¹⁾	mg g ⁻¹ de C no solo				FAH/FAF	mg g ⁻¹ de C COT				
				FAF	FAH	H	EA ⁽²⁾ /H		FAF	FAH	H	EA	S ⁽³⁾
Neossolo Litólico		A	7,15	7,9 (1,2)	25,1 (6,4)	35,8 (4,0)	3,2	0,9	11	35	50	46	96
		A + E	4,76	5,2 (0,6)	16,3 (1,3)	22,8 (1,6)	3,2	0,9	11	34	48	45	93
Espodosolo Ferrocárbico	Campos de Altitude	Bh	2,72	13,7 (0,7)	12,1 (0,0)	5,7 (0,5)	0,9	4,5	50	44	21	94	115
		Bhs	2,70	13,3 (0,1)	9,5 (0,6)	3,4 (1,4)	0,7	6,8	49	35	12	84	96
		Bs/C	0,52	3,5 (0,3)	1,1 (1,1)	0,9 (0,4)	0,3	4,8	67	20	18	87	105
		C	0,76	5,1 (0,1)	1,2 (0,0)	2,0 (0,7)	0,2	3,1	67	16	27	83	110
Cambissolo Húmico		A ₁	8,99	13,1 (2,3)	29,6 (0,4)	40,8 (5,4)	2,3	1,0	15	33	45	48	93
		A ₂	7,51	14,7 (1,1)	19,7 (1,8)	34,5 (2,8)	1,3	1,0	20	26	46	46	92
		2Bi	4,99	21,2 (0,1)	7,1 (1,1)	21,7 (2,9)	0,3	1,3	42	14	43	56	99
Latossolo Vermelho-Amarelo	Mata Atlântica	A	4,68	9,8 (1,6)	11,1 (2,5)	22,7 (1,7)	1,1	0,9	21	24	48	45	93
		AB	3,42	10,3 (0,0)	6,7 (3,0)	14,8 (1,3)	0,6	1,1	30	19	43	49	92
		Bw ₁	2,50	7,2 (1,6)	4,1 (2,2)	9,9 (1,4)	0,6	1,1	29	16	39	45	84
		Bw ₂	1,14	4,3 (0,7)	1,9 (0,5)	3,7 (1,5)	0,4	1,7	38	17	32	55	87

⁽¹⁾ COT: Carbono orgânico total (Yoemans & Bremner, 1988). ⁽²⁾ EA: Extrato alcalino = FAH+FAF. ⁽³⁾ S: Soma das frações = FAH + FAF + H.

nos grãos de quartzo quanto em grãos de gibbsita, na forma de nódulos capeados. As cores de interferência alaranjadas sob nicóis cruzados indicaram a presença de materiais ferruginosos, possivelmente géis de Fe/Al, em estágio incipiente de cristalização (De Coninck & Mckeague, 1985; Fitzpatrick, 1993). O grau de arredondamento e de seleção dos grãos foi baixo. A conspícua microdeposição dessas películas indicou serem os fenômenos de podzolização bem pronunciados, indicando a ação de um novo ciclo pedogenético sobre o material preexistente.

Caracterização da matéria orgânica do solo e sua relação com os processos de pedogênese

A FAH apresentou a melhor correlação com o carbono orgânico total (COT) e a menor variação em termos relativos, representando, em média, 26% do COT (Quadro 4). A fração humina foi a fração predominante, principalmente nos horizontes superficiais. A FAF apresentou a menor variação em termos absolutos entre todas as amostras ($9,95 \pm 5,13 \text{ g kg}^{-1}$ de C no solo) e a maior variação em termos de percentual do COT ($35 \pm 19\%$) (Quadro 4). Esse resultado reflete a característica de alta solubilidade e mobilidade da FAF através do solo, distribuindo-se por todos os horizontes e representando o principal fluxo de carbono no sistema.

Em todos os perfis estudados, a redução da relação FAH:FAF em profundidade foi observada, evidenciando a maior mobilidade da FAF e a concentração da FAH na superfície, sendo este processo ainda mais evidente nos solos de textura mais arenosa (Quadro 4). A presença de argilominerais no solo, em especial os oxidróxidos com alta capacidade de troca aniônica, favoreceu a fixação dos compostos orgânicos solúveis, agindo como um filtro e impedindo a percolação desses compostos para o lençol freático, em solos de textura mais fina (McDowell & Wood, 1984; Mendonça & Rowell, 1996).

No Espodosolo, o horizonte C, que apresentou mineralogia predominantemente gibbsítica, agiu como um filtro, acumulando compostos orgânicos de forma que os valores de carbono total neste horizonte superassem os do horizonte sobreposto e de textura mais grossa e os teores de carbono na FAF chegassem a valores cerca de quatro vezes superiores aos de FAH (Quadro 4).

A relação entre a fração extraível pela solução alcalina e o resíduo da extração (EA/H) também forneceu informações relativas à gênese do solo, identificando zonas de movimentação ou acúmulo de carbono. Pelos dados quantitativos do fracionamento das substâncias húmicas, pôde-se identificar a diferença de comportamento desta relação ao longo dos perfis (Quadro 4). No Espodosolo, a relação EA/H foi máxima nos horizontes espódicos e decresceu no horizonte C, embora apresentasse, neste horizonte, valores ainda elevados. No Latossolo, a

relação cresceu continuamente em profundidade, acompanhando o aumento no teor de argila, demonstrando o efeito de complexação de compostos orgânicos pela matriz mineral.

Em todos os perfis, os valores desta relação foram geralmente menores nos horizontes superficiais (Quadro 4). Os valores superiores a 2,0 estiveram relacionados com os horizontes espódicos e com o horizonte C gibbsítico do Espodosolo. Schnitzer et al. (1958), estudando as frações húmicas de um Espodosolo, encontraram os menores valores percentuais de humina associados a horizontes espódicos. Essa relação deve ser mais bem estudada, podendo vir a ser utilizada na identificação destes horizontes.

Os teores de carbono na FAF apresentaram correlação significativa com os teores de Fe ($R = 0,93^{0,1\%}$) e Al ($R = 0,88^{0,1\%}$) extraídos pelo oxalato, nos solos sob Campos de Altitude ($n = 9$), enquanto esta correlação não ocorreu no solo sob mata ($n = 4$), evidenciando a diferença do papel da matéria orgânica nos processos de gênese dos solos nos dois biomas (Quadros 2 e 4). O acúmulo de ácido fúlvico associado aos oxidróxidos amorfos de Fe e Al em horizontes espódicos tem sido reportado por vários autores (De Coninck, 1980; Duchaufour, 1982; Kennedy et al., 1996). Grande parte do ferro extraído pelo oxalato foi utilizado como capeamento de grãos de areia e como géis organometálicos, como evidenciado pela análise micromorfológica. O ácido fúlvico foi considerado o agente de transporte de Fe e Al na forma de sóis eletronegativos que percolam através do perfil até atingirem uma camada rica em cátions metálicos, onde são complexados e se precipitam (Deb, 1949). Após a precipitação, as formas de ferro tiveram sua cristalização inibida pela presença dos compostos orgânicos, permanecendo na condição de minerais de baixa cristalinidade (Schwertmann, 1966). O solo sob mata apresentou formas de Fe mais cristalinas, evidenciadas pelo índice Fe_o/Fe_d , em contraste com a natureza pouco cristalina dos óxidos nos solos sob Campos de Altitude (Quadro 2).

Caracterização espectroscópica da matéria orgânica

Espectroscopia de absorção no Infravermelho - Os espectros de absorção no infravermelho dos AH purificados, extraídos de diferentes solos, revelaram feições bastantes semelhantes, com pequenas diferenças entre as posições dos picos e a intensidade destes na faixa de 1.800 a 800 cm^{-1} (Figura 3). Na seqüência Neossolo – Espodosolo – Cambissolo – Latossolo, podem ser observadas algumas diferenças que indicam aumento de alifacidade e, conseqüentemente, redução na aromaticidade dos AH. O pico próximo de 1.712 cm^{-1} , característico de grupos carboxílicos, apresentou sua maior expressão no AH extraído do horizonte Bhs do Espodosolo (Figura 3). Paralelamente, observaram-

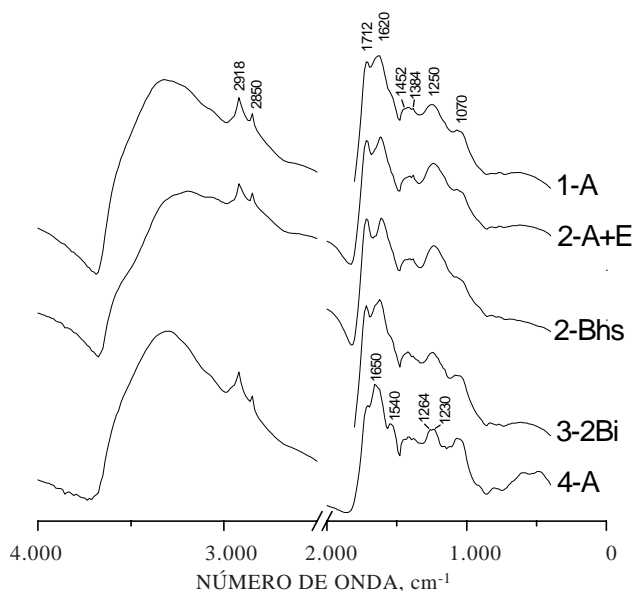


Figura 3. Espectros de absorção no infravermelho de ácidos húmicos purificados, extraídos de um Neossolo Litólico (1-A), de um Espodossolo Ferrocárbico (2-A + E e 2-Bhs), de um Cambissolo Húmico (3-2Bi) e de um Latossolo Vermelho-Amarelo (4-A) da Serra do Brigadeiro. Os espectros estão dispostos de cima para baixo, de acordo com a posição do perfil de solo no transecto estudado e de acordo com a posição do horizonte no perfil.

se aumentos da banda centrada em 1.250 cm^{-1} , graças à deformação axial da ligação C-OH em grupos carboxílicos ou fenólicos, e banda larga em 2.600 cm^{-1} , graças à deformação axial de O-H em grupo carboxílico.

O AH extraído do Latossolo sob mata apresentou menor intensidade do sinal em 1.712 cm^{-1} , observando-se um sinal centrado em aproximadamente 1.650 cm^{-1} , que pode estar relacionado com o grupo carboxílico ligado covalentemente a metais livres ou a superfícies de argilominerais (Vinkler et al., 1976), muito embora essa afirmativa seja dificultada pela interferência do sinal da deformação angular da molécula de água, centrado em 1.640 cm^{-1} (MacCarthy & Rice, 1985). Nessa amostra, o espectro apresentou sinal duplo em torno de 1.250 cm^{-1} , e o sinal em maior frequência (1.264 cm^{-1}) relacionou-se com a deformação axial de C-OH de grupos fenólicos, enquanto o sinal em torno de 1.230 cm^{-1} relacionou-se com a deformação axial de C-OH de grupos carboxílicos (Baes & Bloom, 1989).

Nos espectros dos outros AH, esse sinal apareceu como uma banda larga centrada em 1.250 cm^{-1} , indicando maior concentração de grupos carboxílicos nestes. O sinal em torno de 1.620 cm^{-1} apareceu em todos os espectros, com exceção do AH do Latossolo sob mata. Este sinal deveu-se à deprotonação de

parte dos grupos COOH em contato com o sal KBr sob condições de alta pressão (Nguyen et al., 1991). A maior intensidade da banda em 1.548 cm^{-1} nesse espectro evidenciou a presença de polissacarídeos nesta amostra, constatada pela maior intensidade do pico em 1.070 cm^{-1} , que ocorreu associado ao sinal em 1.548 cm^{-1} , atribuído à deformação axial da ligação C-O em polissacarídeos (Stevenson, 1996) e é normalmente encontrado em maior intensidade em amostras de AH recém-formados, podendo indicar resíduos de celulose ou hemicelulose (Inbar et al., 1989). Moléculas alifáticas apresentaram também, como característica, uma série de pequenos picos na região próxima a 1.400 cm^{-1} (Niemeyer et al., 1992) (Figura 3). Os sinais em 2.918 , 2.850 , 1.452 e 1.385 cm^{-1} , relativos a ligações C-H alifáticas, foram encontrados em todos os AH (Figura 3).

Segundo a classificação proposta por Kumada (1987), os AH podem ser classificados, pelas características gerais dos espectros de infravermelho, em quatro grupos (A, B, R_p e P). Os AH extraídos das amostras sob Campos de Altitude podem ser incluídos no grupo A, cujo espectro característico está representado por bandas fortes em 1.710 , 1.615 , e 1.200 cm^{-1} , com as duas primeiras apresentando aproximadamente a mesma intensidade. Tate et al. (1990), trabalhando em solos da Nova Zelândia, encontraram AH do tipo A, caracterizados por alta aromaticidade, avaliada por RMN, e atribuíram esta característica ao efeito das queimadas comuns na região. O AH extraído do horizonte A do Latossolo sob mata pode ser incluído no grupo R, cujo espectro apresenta as mesmas bandas do grupo 1, com uma banda fraca, mas facilmente identificável, próxima a 1.540 cm^{-1} , indicando a presença de carboidratos, como celulose e hemicelulose. A região do espectro entre 1.600 e 1.700 cm^{-1} apresenta um único pico, ao invés dos dois picos individualizados observados nos espectros do tipo A. O AH extraído do Cambissolo apresenta as feições típicas do espectro do tipo A, porém com um

Quadro 5. Valores resultantes da interpretação dos espectros de ressonância paramagnética eletrônica, como quantidade de radicais livres e valor-g, para ácidos húmicos purificados, extraídos de diferentes ambientes

Solo	Horizonte	Radicais livres		Valor-g
		$10^{17}\text{ spins.g}^{-1}\text{ AH}$		
Neossolo	A	18,07 (1,56)		2,0039
Espodossolo	A + E	25,99 (0,21)		2,0040
	Bhs	30,05 (2,28)		2,0039
Cambissolo	2 Bi	19,56 (1,37)		2,0040
Latossolo	A	1,27 (0,05)		2,0041

pequeno sinal em 1.540 cm^{-1} , indicando a presença de carboidratos. Esta amostra representa um horizonte enterrado que atualmente está em processo de podzolização, conforme evidenciado pela análise micromorfológica.

Espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica (RPE)

Os espectros de RPE de todos os ácidos húmicos analisados demonstraram a ocorrência de radicais livres semiquinona. A identificação da natureza do sinal, atribuindo-o a radicais semiquinona, foi confirmada pelos valores-g calculados nos espectros (Quadro 5), que corresponderam aos valores determinados para este radical por outros pesquisadores (Riffaldi & Schnitzer, 1972; Steelink & Tollin, 1985; Senesi & Steelink, 1989).

A quantidade de spins nas amostras de AH foi decrescente, na ordem: Bhs (Espodossolo) > A + E (Espodossolo) > 2Bi (Cambissolo) > A (Neossolo) >>> A (Latossolo) (Quadro 5). A maior concentração de radicais livres no horizonte espódico e a menor concentração no horizonte A do Latossolo sob mata corresponderam às expectativas, corroborando a idéia de maior aromaticidade e grau de humificação do primeiro, deduzida pelos espectros no infravermelho. Embora Senesi & Steelink (1989) reportem que não se percebeu uma relação direta entre parâmetros de RPE e o caráter aromático de substâncias húmicas, outros autores encontraram correlações significativas entre maiores concentrações de radicais livres e baixas relações H:C, indicando maior aromaticidade (Riffaldi & Schnitzer, 1972), com aromaticidade medida por RMN (Bayer, 1995).

Os AH extraídos de solos sob Campos de Altitude apresentaram concentração de radicais livres muito superior à encontrada no AH sob mata (Quadro 5). Segundo Riffaldi & Schnitzer (1972), os radicais semiquinona são formados pela remoção oxidativa de hidrogênio dos grupos OH de fenóis; portanto, a concentração de fenóis no material de origem pode influenciar a concentração de spins das substâncias húmicas formadas a partir deste. Condições de distrofismo e presença de alumínio solúvel podem influenciar mecanismos fisiológicos de produção de polifenóis, como taninos e flavonóides, pela cobertura vegetal, alterando a qualidade da manta orgânica (Davies et al., 1964). Traghetta et al. (1997) encontraram uma concentração de radicais livres em amostras de manta orgânica do Campos de Altitude cerca de dez vezes superior à registrada nas amostras da manta orgânica sob mata.

É provável que, além da qualidade da manta orgânica, a ação do fogo nas áreas de Campos de Altitude constitua importante fator no aumento de aromaticidade das substâncias húmicas (Tate et al., 1990). Incêndios têm sido reportados na área, bem como eventos históricos de fogo têm sido evidenciados por fragmentos de carvão encontrados nos perfis.

CONCLUSÕES

1. Os solos encontrados sob a vegetação de Campos de Altitude apresentaram características contrastantes em relação ao solo encontrado sob vegetação florestal, indicando o papel destes diferentes pedoambientes na sustentabilidade e no controle da cobertura vegetal.

2. A análise micromorfológica dos solos sob Campos de Altitude evidenciou a ação dos mecanismos de podzolização, responsáveis pela formação de horizontes espódicos e horizontes plácicos, além da coloração escura da água de drenagem.

3. A caracterização da matéria orgânica evidenciou a ação de compostos orgânicos mais solúveis (fração ácidos fúlvicos) nos processos de queluviação e transporte de cátions metálicos pelo sistema. A elevada aromaticidade dos ácidos húmicos extraídos sob Campos de Altitude em relação aos AH extraídos sob vegetação florestal revelou diferentes mecanismos de gênese nestes dois ambientes. As causas para as diferentes características da matéria orgânica nestes dois sistemas podem estar relacionadas com o efeito pirogenético sobre a matéria orgânica do solo nas áreas de Campos de Altitude, ou, ainda, com característica das mantas orgânicas, decorrente de diferenças fisiológicas entre os dois tipos vegetacionais.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Dinis Gomes Traghetta e ao Dr. Sérgio Saab, pelo auxílio nas análises espectroscópicas de Infravermelho e de Ressonância Paramagnética Eletrônica e pelas sugestões na interpretação dos espectros.

LITERATURA CITADA

- BAES, A.U. & BLOOM, P.R. Diffuse reflectance and transmission Fourier transform infrared (DRIFT) spectroscopy of humic and fulvic acids. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:695-700, 1989.
- BAYER, C. Dinâmica da matéria orgânica em sistemas conservacionistas de manejo de solos. Porto Alegre, Depto de Solos/FA-UFRGS, 1995, 100p. (Tese de Doutorado)
- BENITES, V.M.; MENDONÇA, E.S.; SCHAEFER, C.E.G.R. & MARTIN NETO, L. Caracterização dos ácidos húmicos extraídos de um Latossolo Vermelho-Amarelo e de um Podzol por análise termo-diferencial e pela espectroscopia de absorção no infravermelho. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:543-551, 1999.
- BIODIVERSITAS. Atlas das prioridades para conservação da biodiversidade do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Biodiversitas, 1999. 45p.

- BREWER, R. Fabric and mineral analysis of soils. New York, John Wiley & Sons, 1964. 470p.
- BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. & BABEL, U. Handbook for soil thin section description. Wolverhampton, Waine Research Publications, 1985. 366p.
- CAMPOS, J.C.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; KER, J.C.; SAADI, A. & ALBUQUERQUE FILHO, M.R. Gênese e micropedologia de solos do Médio Jequitinhonha, de Turmalina a Pedra Azul, MG. Geonomos, 5:41-54, 1997.
- CHAUVEL, A.; LUCAS, Y. & BOULET, R. On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brazil. *Experientia*, 43:234-241, 1987.
- DAVIES, R.I.; COULSON, C.B. & LEWIS, D.A. Polyphenols in plant, humus and soil. *J. Soil Sci.* 15:299-309, 1964.
- DE CONINCK, F. & McKEAGUE, J.A. Micromorphology of spodosols. In: DOUGLAS, L.A. & THOMPSON, M.L., eds. *Soil Micromorphology and soil classification*. Madison, 1985. p.121-144. (SSSA Special Publications, 15)
- DE CONINCK, F. & RIGHI, D. Podzolisation and the spodic horizon. In: BULLOCK, P. & MURPHY, C.P. eds. *Soil micromorphology: soil genesis*. AB Academic Publishers, Rothamsted, 1983. V2. p.389-418.
- DE CONINCK, F. Major mechanisms in formation of spodic horizons. *Geoderma*, 24:101-128, 1980.
- DEB, B.C. The movement and precipitation of iron oxides in Podzol soils. *J. Soil Sci.*, 1:112-122, 1949.
- DUBROEUCQ, D. & VOLKOFF, B. From Oxisols to Spodosol and Histosols: evolution of the soil mantles in the Rio Negro basin (Amazonia). *Catena*, 32:245-280, 1998.
- DUCHAUFOR, P. *Pedology: Pedogenesis and classification*. London, George Allen & Unwin, 1982.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Estudo expedito de solos do estado do Rio Grande do Sul e parte de Santa Catarina, para fins de classificação, correlação e legenda preliminar. Rio de Janeiro, 1982. p.51-59. (Boletim técnico SNLCS, 75)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos e análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997.
- FITZPATRICK, E.A. *Soil Microscopy and micromorphology*. Chichester, John Wiley & Sons, 1993. 304p.
- GOMES, J.B.V.; RESENDE, M.; REZENDE, S.B. & MENDONÇA, E.S. Solos de três áreas de restinga: morfologia, caracterização e classificação. *Pesq. Agropec. Bras.*, 33:1907-1919, 1998.
- HAYES, M.H.B.; MACCARTHY, P.; MALCOLM, R.L. & SWIFT, R.S. The search for structure: setting the scene. In: HAYES, M.H.B. et al., eds. *Humic substances II: In search of structure*. Chichester, John & Wiley, 1989. p.3-33.
- HSU, P.H. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B. eds. *Minerals in soils environments*. Madison, Soil Science Society of American, 1989. p.1051-1088.
- INBAR, Y.; CHEN, Y. & HADAR, Y. Solid-state carbon-13 nuclear magnetic resonance and infrared spectroscopy of composted organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1695-1701, 1989.
- JOLY, A.B. *Conheça a vegetação brasileira*. São Paulo, EDUSP, 1979. 181p.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. Relações entre óxidos de Fe e a cor em solos cauliniticos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:27-32, 1983.
- KENNEDY, J.; BILLET, M.F.; DUTHIE, D.; FRASER, A.R. & HARRISON, A.F. Organic matter retention in an upland humic Podzol; the effects of pH and solute type. *Europ. J. Soil Sci.*, 47:615-625, 1996.
- KLINGE, H. Podzol soils in the Amazonian basin. *J. Soil Sci.*, 16:96-103, 1965.
- KUMADA, K. *Chemistry of soil organic matter*. Tokyo, Japan Scientific Society Press, 1987. 220p.
- LIMA, P.C.; CURI, N. & LEPSCH, I. Terminologia de micromorfologia do solo. *B. Inf. SBCS*, 10:33-43, 1985.
- MACCARTHY, P. & RICE, J.A. Spectroscopic methods (other than NMR) for determining functionality in humic substances. In: AIKEN, G.R.; McKNIGHT, D.M.; WERSHAW, R.L. & MACCARTHY, P., eds. *Humic substances in soil, sediment and water: geochemistry, isolation and characterization*. New York, John Wiley & Sons, 1985. p.527-560.
- MACKEAGUE, J.A. & DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.*, 46:13-22, 1966.
- MARTIN NETO, L.; ANDRIULO, A.E. & TRAGHETTA, D.B. Effects of cultivation on the ESR spectra of organic matter from soil size fractions of a Mollisol. *Soil Sci.*, 156:365-372, 1994.
- MCDOWELL, W.H. & WOOD, T. Podzolization processes control dissolved organic carbon concentrations in stream water. *Soil Sci.*, 137:23-32, 1984.
- MENDONÇA, E.S. & ROWELL, R.L. Mineral and organic fractions of two oxisols and their influence on effective cation-exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1888-1892, 1996.
- MICROCAL ORIGIN. *Scientific and technical graphics for windows. Versão 3.5*, Northampton, Microcal Software, 1994.
- NGUYEN, T.T.; JANIK, L.J. & RAUPACH, M. Diffuse reflectance infrared fourier transform (DRIFT) spectroscopy in soil studies. *Aust. J. Soil Res.*, 29:49-67, 1991.
- NIEMEYER, J.; CHEN, Y. & BOLLAG, J.M. Characterization of humic acids, composts, and peat by diffuse reflectance Fourier-transform infrared spectroscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:135-140, 1992.
- RIFFALDI, R. & SCHNITZER, M. Electron spin resonance spectrometry of humic substances. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36:301-305, 1972.
- SCHAEFER, C.E.G.R.; CRUZ, N.M.C.; SILVA, C.M. & REZENDE, S.B. Palinologia de paleosolos de Roraima, Norte Amazônico. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:325-333, 1994.

- SCHNITZER, M. Organic matter characterization. In: PAGE, A.L. et al., eds. *Methods of soil analysis, Part 2.*, Agronomy 9, Madison, Soil Science Society of American, 1982. p.581-594.
- SCHNITZER, M.; WRIGHT, J.R. & DESJARDINS, J.G. A comparison of the effectiveness of various extractants for organic matter from two horizons of a Podzol profile. *Can. J. Soil Sci.*, 38:49-53, 1958.
- SCHWERTMANN, U. Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxides. *Nature*, 212:645-646, 1966.
- SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soils environments*. Madison: Soil Science Society of American, 1989. p.1051-1088.
- SENESI, N. & STEELINK, C. Application of ESR spectroscopy to the study of Humic substances. In: HAYES, M.H.B.; MacCARTHY, P.; MALCOLM, R.L. & SWIFT, R.S., eds. *Humic substances II: In search of structure*. Chichester, John Wiley & Sons, 1989. p.373-408.
- STEELINK, C. & TOLLIN, G. Free radicals in soil. In: McLAREN, A.D. & PETERSON, G.M., eds. *Soil biochemistry*. vol.5, New York, Marcel Dekker, 1985. V.5. p.147-169.
- STEVENSON, F.J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. New York, John Wiley & Sons, 1996. 496p.
- TATE, K.R.; YAMAMOTO, K.; CHURCHMAN, G.J.; MEINHOLD, R. & NEWMAN, R.H. Relationships between the type and carbon chemistry of humic acids from some New Zealand and Japanese soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 36:611-621, 1990.
- TRAGHETTA, D.G.; BENITES, V.M.; MARTIN NETO, L. & MENDONÇA, E.S. Determinação de radicais livres em liteiras pela técnica de ressonância paramagnética eletrônica (EPR). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Rio de Janeiro, 1997. (CD ROM)
- VALETON, I. *Developments in soil science 1: Bauxites*. Amsterdam, Elsevier, 1972. 226p.
- VINKLER, P.; LAKATOS, B. & MEISEL, J. Infrared spectroscopic investigations of humic substances and their metal complexes. *Geoderma*, 15:231-242, 1976.
- YOEMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.
- YOUNG, A. & STEPHEN, I. Rock weathering and soil formation of high-altitude plateaux of Malawi. *J. Soil Sci.*, 16:322-333, 1965.