

DIVISÃO 1 - SOLO NO ESPAÇO E NO TEMPO

Comissão 1.1 - Gênese e morfologia do solo

MICROMORFOLOGIA DE HORIZONTES ESPÓDICOS NAS RESTINGAS DO ESTADO DE SÃO PAULO⁽¹⁾

Maurício Rizzato Coelho⁽²⁾, Vanda Moreira Martins⁽⁴⁾, Xosé Luiz Otero Pérez⁽⁵⁾, Felipe Macías Vázquez⁽⁵⁾, Felipe Haenel Gomes⁽⁶⁾, Miguel Cooper⁽³⁾ & Pablo Vidal Torrado⁽³⁾

RESUMO

Os solos de restinga são pouco estudados e conhecidos no Brasil. Neste trabalho, a micromorfologia de horizontes espódicos foi investigada em quatro locais do litoral do Estado de São Paulo (Bertioga, Ilha de Cananeia, Ilha do Cardoso e Ilha Comprida). A técnica possibilitou caracterizar as diferentes formas da matéria orgânica, e, juntamente com a descrição morfológica de oito perfis de solos representativos das restingas do Estado de São Paulo, objetivou-se discutir os mecanismos envolvidos na gênese dos horizontes espódicos desses ambientes. Entre os resultados alcançados, destaca-se: a presença de revestimentos orgânicos monomórficos na superfície dos constituintes grossos da maioria dos horizontes analisados, bem como o preenchimento quase completo da porosidade entre grãos de alguns horizontes cimentados e brandos, são evidências de que a clássica teoria da mobilização, transporte e precipitação de complexos organometálicos é válida para os solos estudados. No entanto, matéria orgânica polimórfica e, ou, resíduos vegetais em diferentes estádios de decomposição foram as principais pedofeições observadas em horizontes espódicos mal drenados e sotopostos a horizontes históricos. Nesses, a decomposição pela mesofauna e microbiológica das raízes *in situ* é um importante mecanismo de acumulação de matéria orgânica em profundidade e formação dos horizontes espódicos. A atuação das raízes na formação desses horizontes, no entanto, vai além da sua decomposição: a fábrica e as feições da matéria orgânica de um horizonte cimentado, incluindo remanescentes

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP. Realizada com auxílio da CAPES e FAPESP. Recebido para publicação em 23 de dezembro de 2011 e aprovado em 06 de agosto de 2012.

⁽²⁾ Pesquisador do Centro Nacional de Pesquisa em Solos, Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico, 1024. Jardim Botânico. CEP 22460-000 Rio de Janeiro (RJ). E-mail: mauricio@cnps.embrapa.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ-USP. Caixa Postal 09 CEP 13.418-900 Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: mcooper@usp.br; pvidal@usp.br

⁽⁴⁾ Professora do Curso de Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Unioeste, Campus de Marechal Cândido Rondon. Rua Pernambuco, 1777. Centro. CEP 85.960-000 Marechal Cândido Rondon (PR). E-mail: mmartins@unioeste.br

⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Edafología de la Universidad de Santiago de Compostela. Campus Universitario Sur. Facultad de Biología. Espanha. E-mail: xl.otero@usc.es; felipe.macias.vazquez@usc.es

⁽⁶⁾ Engenheiro Agrônomo, Técnico do Centro de Tecnologia Canavieira. Fazenda Santo Antônio, s/n. Caixa Postal 169 CEP 13400-970 Piracicaba (SP). E-mail: felipegomes@hotmail.com

radiculares, indicaram que as raízes podem atuar na imobilização da matéria orgânica por meio de seu mecanismo de absorção seletiva. Nesse processo, a solução do solo rica em carbono orgânico dissolvido é absorvida seletivamente pelas raízes, segregando parte do carbono complexado em sua superfície e no entorno destas, absorvendo água e nutrientes. A atuação continuada desse processo leva à precipitação da matéria orgânica iluviada e segregada por meio de sua desidratação, que é condicionada pela própria absorção radicular.

Termos de indexação: matéria orgânica monomórfica, matéria orgânica polimórfica, mecanismos de (i)-mobilização de complexos organometálicos, Ortstein.

SUMMARY: MICROMORPHOLOGY OF SPODIC HORIZONS OF THE RESTINGA REGION OF SÃO PAULO STATE

The soils, especially the Spodosols, of the “restinga”, a coastal plain, are poorly studied and understood in Brazil. In this work, the micromorphology of spodic horizons was investigated at four sites of the coastal plain of the State of São Paulo (Bertioga, Ilha de Cananeia, Ilha do Cardoso, and Ilha Comprida). This allowed the characterization of different organic matter forms. These data, together with macromorphology, were used in the analysis of the main processes involved in the genesis of spodic horizons of eight representative soil profiles of the coastal plain of São Paulo. The observations of occurrence of organic monomorphic coatings on the surface of coarse grains in most of the studied horizons as well as the total filling of voids between grains in some cemented and friable horizons are evidence of the classic theory of metal-organic complex mobilization, transport and precipitation in the studied soils. However, the polymorphic organic matter and/or plant residues in different decomposition stages were the most important soil features observed in poorly-drained spodic horizons and below the histic horizons. In these poorly-drained spodic horizons, root decomposition by mesofauna and microorganisms in situ are important mechanisms of organic matter accumulation in the deeper B horizons. However, there are other ways in which roots influence the genesis of these horizons: the organic matter features of a cemented horizon, containing root rests, indicated that roots can contribute to organic matter immobilization through selective absorption mechanisms. In this process, the soil solution with high metal-organic complex contents is selectively absorbed by the roots. This leads to the segregation of metal-organic complexes at the surface and in the proximity of roots, as water and nutrients are being absorbed. If this process is continued, it leads to the precipitation of illuviated and segregated organic matter by its dehydration, which is a consequence of the proper root absorption.

Index terms: monomorphic organic matter, polymorphic organic matter, (i)-mobilization, mechanisms of metal-organic complexes, ortstein.

INTRODUÇÃO

Muitos solos têm na matéria orgânica seu principal componente e agente de formação, cujos processos pedogenéticos ainda são muito pouco entendidos (Buurman et al., 2008). Nesses, a matéria orgânica (MO) é constituída por uma grande diversidade de resíduos de plantas, de animais e microbiológicos em diferentes estádios de decomposição (Bardy et al., 2008). Os Espodossolos pertencem a esse grupo de solos: são mais comuns em climas úmidos, desenvolvendo-se sob materiais de origem preferencialmente permeáveis e sob diversos tipos de vegetação, que, em geral, produzem serapilheira ácida, lentamente degradável e pobre em nutrientes (Sauer et al., 2007).

A fauna e os fungos do solo desempenham papel-chave na quebra da MO das diferentes classes de solo,

as quais, juntamente com a sua iluviação ao longo do perfil, são particularmente importantes na formação dos Espodossolos (Phillips & Fitzpatrick, 1999). Nestes solos, a MO pode ser derivada de duas fontes: iluviação e reciclagem de raízes (Buurman et al., 2008). A micromorfologia é capaz de distingui-las (De Coninck et al., 1974; De Coninck, 1980), permitindo a separação de várias fontes, formas e estádios de sua decomposição, os quais auxiliam a interpretação dos dados químicos (Buurman et al., 2005) de perfis e horizontes de solos.

Bardy et al. (2008) argumentam que, nos Espodossolos boreais, temperados e, em menor extensão, nos tropicais, as estruturas da MO têm sido investigadas sob diferentes escalas de observação. Na escala microscópica, esses autores ressaltam que o exame de lâminas delgadas proporciona a descrição

morfológica da MO e sua relação com outros constituintes do solo. Com essas informações, os mecanismos de mobilização e subsequente imobilização de compostos organometálicos na formação dos Espodosolos podem ser testados por meio do exame micromorfológico de feições dos horizontes B espódicos, tal como afirma De Coninck (1980) em seu clássico trabalho sobre a gênese de horizontes espódicos.

Tendo em vista que as principais teorias correntes sobre os processos de podzolização dizem respeito, sobretudo, a transporte, mobilização e precipitação de compostos organometálicos na formação dos horizontes espódicos e Espodosolos, bem como à contribuição de raízes por meio de sua decomposição *in situ* (De Coninck, 1980; Phillips & Fitzpatrick, 1999; Buurman & Jongmans, 2005), a micromorfologia é uma ferramenta valiosa na elucidação dos mecanismos de podzolização, uma vez que possibilita nítida e visual distinção das duas formas de MO típicas dos horizontes espódicos (De Coninck et al., 1974): MO iluvial (monomorfa) e aquela proveniente da decomposição de raízes *in situ* (polimorfa).

Considerando que a literatura micromorfológica sobre os Espodosolos tropicais é bastante escassa (Buurman & Jongmans, 2005) e que sua MO pode se apresentar com uma grande variedade de formas sob a óptica micromorfológica (Bullock et al., 1985), o presente trabalho teve por objetivo analisar a micromorfologia dos horizontes espódicos de Espodosolos e solos afins do litoral do Estado de São Paulo, a fim de caracterizá-los e, com isso, auxiliar na elucidação dos mecanismos envolvidos na sua gênese.

MATERIAL E MÉTODOS

Meio Físico

Os solos estudados foram descritos e classificados por Coelho (2008) nos municípios de Bertioga (perfis P3, P6, P9 e P10) e Cananeia (Ilha de Cananeia; perfis P29 e P30), bem como por Gomes (2005) na Ilha do Cardoso (perfis H13 e J14). A figura 1 mostra a localização deles no Estado de São Paulo.

O clima do litoral do Estado de São Paulo é do tipo Af, segundo a classificação climática de Köppen (Setzer, 1966), com temperatura e precipitação pluvial médias anuais de, respectivamente, 24,8 °C e 3.200 mm, segundo dados climatológicos obtidos em Bertioga entre 1941 e 1970. É considerada uma das regiões mais úmidas do Brasil (Martins et al., 2008).

A geologia dos locais estudados é composta por sedimentos arenosos quaternários de origem marinha (Petri & Fúlfaro, 1970; Suguio & Martin, 1978). Neles se desenvolveu uma vegetação genericamente denominada de restinga. É característica das zonas

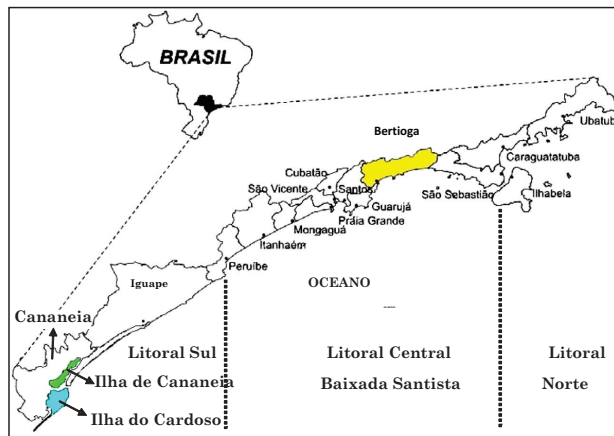


Figura 1. Localização dos municípios e locais amostrados no litoral do Estado de São Paulo.

costeiras (Suguio & Tessler, 1984), cujos solos predominantes pertencem às classes dos Espodosolos e Neossolos Quartzarênicos (Oliveira et al., 1992). Outros solos, como os Organossolos intermediários para Espodosolos, formados em posição de entrecordões, foram observados nas restingas da Ilha do Cardoso (Gomes, 2005).

Análises Micromorfológicas

Para os estudos micromorfológicos, amostras indeformadas da transição entre horizontes e da parte central do horizonte espódico foram obtidas no campo, utilizando-se, para isso, de caixas de cartolina com dimensões de 12 x 7 x 4 cm. As amostras foram impregnadas com resina de poliéster e cortadas, sendo confeccionadas as lâminas delgadas (7,6 x 5 cm), de acordo com o procedimento descrito por Castro et al. (2003). As lâminas foram analisadas em microscópio petrográfico dotado de luz polarizada e descritas segundo Bullock et al. (1985), sendo as formas de húmus classificadas conforme De Coninck et al. (1974).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparação morfológica e ambiental dos solos e áreas estudadas

No quadro 1 são mostrados os dados morfológicos selecionados dos perfis estudados. Os solos da Ilha do Cardoso são fortemente influenciados pelo hidromorfismo, o que lhes imprime condições favoráveis ao desenvolvimento de horizontes hísticos e organossolos (perfis H13 e J14), os quais são ausentes naqueles estudados em Bertioga e Cananeia. Como atributos marcantes, os solos desses dois locais são mais bem drenados em relação aos da Ilha do Cardoso e manifestam horizontes cimentados em todos os perfis estudados, ausentes na Ilha do Cardoso.

Quadro 1. Dados morfológicos selecionados e classificação dos perfis estudados

Horiz.	Prof.	Cor úmida ⁽¹⁾	Estrutura ⁽²⁾		Grau de transição entre horizontes	Consistência úmida ⁽³⁾	Cimentação
			Tipo	Grau			
cm							
Bertioga - Perfil P3 - Espodossolo Ferrilúvico órtico dúrico, A moderado, textura arenosa, bem drenado							
A1	0-6	5YR 3/1	gran.	fraca	plana/clara	solta	não
A2	6-13	5YR 4/1-5YR 8/1	gran.	fraca	plana/clara	solta	não
EA	13-25	5YR 6/1	ausente	g.s.	plana e clara	solta	não
E1	25-71	5YR 8/1	ausente	g.s.	plana/clara	solta	não
E2	106-180	5YR 6/1	ausente	g.s.	descontínua/abrupta	solta	não
EB	94-113	5YR 5/1	ausente	g.s.	descontínua/abrupta	solta	não
BE1	71-82	5YR 5/1-5YR 3/1	ausente	maciça	descontínua/clara	solta a muito friável	não
BE2	73-91	5YR 3/1-5YR 4/1	ausente	maciça	descontínua/ondulada	muito friável	não
Bh1	82-119	5YR 3/1	ausente	maciça	descontínua/abrupta	firme	não
Bh2	107-125	5YR 3/2	ausente	maciça	descontínua/abrupta	muito friável	não
Bh3	135-170	5YR 3/2	ausente	maciça	–	friável a firme	não
Bhm1	89-125	5YR 2,5/2	ausente	maciça	ondulada/abrupta	extr. firme	fortemente
Bhm2	120-142	5YR 3/1	ausente	maciça	descontínua/abrupta	extr. firme	fortemente
Bs1	107-125	7,5YR 4/2	ausente	maciça	descontínua/abrupta	firme	não
Bs2	125-180	10YR 5/6	ausente	maciça	–	friável	não
Bsm1	122-144	5YR 4/3	ausente	maciça	descontínua/abrupta	muito firme	fortemente
Bsm2	153-180	5YR 4/3-5YR 4/3	ausente	maciça	plana/abrupta	muito firme	fortemente
Bsm3	132-170	7,5YR 5/4	ausente	maciça	descontínua/abrupta	muito firme	fortemente
Bsm4	157-180	5YR 4/3	ausente	maciça	descontínua/abrupta	firme a muito firme	fracamente
Plácico	..	5YR 3/1	ausente	maciça	–	extr. firme	extr.
Bertioga - Perfil P6 - Espodossolo Humilúvico órtico espessarênico, A moderado, textura arenosa, imperfeitamente drenado							
A	0-15	5YR 6/1	gran.	fraca	plana/clara	solta	não
AE	15-41	5YR 6/1	gran.	fraca	plana/clara	solta	não
EA	41-71	5YR 7/1	ausente	g. s.	plana e difusa	solta	não
E	71-153	5YR 8/1	ausente	g. s.	plana/abrupta	solta	não
Bhg	153-156	5YR 5/1-10YR 3/1	ausente	maciça	plana/clara	friável a firme	não
Bh1	156-165	5YR 2,5/1	ausente	maciça	descontínua/abrupta	firme	não
Bhm1	156-205	5YR 2,5/1	ausente	maciça	descontínua/abrupta	muito firme e firme	fracamente
Bhm2	158-205+	5YR 2,5/1	ausente	maciça	descontínua/clara	muito firme	fortemente
Bh2	165-205+	5YR ¾	ausente	maciça	–	friável e muito firme	fortemente
Bertioga - Perfil P9 - Espodossolo Humilúvico hidromórfico dúrico, A moderado, textura arenosa, muito mal drenado							
O	0-7	5YR 2,5/1	–	–	plana/abrupta	muito friável	não
A	7-12	5YR 3/1	gran.	fraca	plana/abrupta	muito friável	não
AE	12-17	5YR 4/2-5YR 5/1	gran.	fraca	plana/clara	solta	não
E	17-(27-32)	5YR 6/1-5YR 5/1	ausente	g. s.	ondulada/abrupta	solta	não
BE	(27-32)-(37-40)	5YR 3/1-5YR 5/1	ausente	maciça	ondulada/abrupta	friável a firme	não
Bh1	(37-40)-(46-53)	5YR 3/1	ausente	maciça	ondulada/abrupta	firme	não
Bhm	(46-53)-89	5YR 2,5/2-5YR 3/2	ausente	maciça	ondulada/clara	muito firme	fortemente
Bh2	89-106+	5YR ¾	ausente	maciça	plana/gradual	friável a firme	não
Bh3	106-130+	5YR 4/4	ausente	maciça	–	friável a firme	não
Bertioga - Perfil P10 - Espodossolo Humilúvico hidromórfico espessarênico, A moderado, textura arenosa, mal drenado							
A	0-7	5YR 2,5/1	gran.	fraca	plana/abrupta	muito friável	não
AE	7-11	5YR 3/1-5YR 6/1	gran.	fraca	plana/abrupta	muito friável	não
EA	11-(18-30)	5YR 4/2-5YR 6/1	ausente	g. s.	ondulada/clara	solta	não
E	(18-30)-(35-48)	5YR 6/1	ausente	g. s.	ondulada/abrupta	solta	não
EB	(35-48)-74	5YR 5/1-5YR 6/1	ausente	g. s.	plana/clara	solta	não
BE	(60-74)-83	5YR 4/1	ausente	g. s.	plana/abrupta	muito friável	não
Bh1	83-(90-103)	5YR 2,5/1	ausente	maciça	plana/abrupta	firme	não
Bh2	(90-103)-117	5YR 2,5/1	ausente	maciça	plana/clara	firme a muito firme	fracamente
Bhm	117-150+	5YR 2,5/1	ausente	maciça	–	muito firme/extr. firme	fraca/fortemente

Continua...

Quadro 1. Continuação

Horiz.	Prof.	Cor úmida ⁽¹⁾	Estrutura ⁽²⁾		Grau de transição entre horizontes	Consistência úmida ⁽³⁾	Cimentação
			Tipo	Grau			
cm							
Cananeaia - Perfil P29 - Espodossolo Humilúvico órtico dúrico, A fraco, textura arenosa, imperfeitamente drenado							
A	0-14	7,5YR 3/1	gran.	fraca	plana/abrupta	muito friável	não
E	14-(47-60)	7,5YR 7/1	ausente	g. s.	ondulada/clara	solta	não
Bh	(47-60)-(60-70)	10YR 2/1	ausente	maciça	ondulada/clara	firme	não
Bhm1	(60-70)-87	10YR 2/1	ausente	maciça	plana/abrupta	extr. firme	fortemente
Bhm2	87-104	7,5YR 2,5/2	ausente	maciça	plana/abrupta	muito firme	fortemente
Bs	104-115+	10YR 5/6	ausente	maciça	–	firme	não
Cananeaia - Perfil P30 - Espodossolo Humilúvico órtico dúrico, A fraco, textura arenosa, imperfeitamente drenado							
A	0-10	7,5YR 3/1	gran.	fraca	plana/clara	muito friável	não
E	10-18	7,5YR 7/1-7,5YR 7/2	ausente	g. s.	plana/abrupta	solta	não
Bhg	18-(33-40)	7,5YR 4/1-10YR 2/1	ausente	maciça	ondulada/abrupta	firme	não
Bh	(33-40)-(40-44)	7,5YR 2/1	ausente	maciça	ondulada/clara	firme e muito firme	fracamente
Bhm	(40-44)-(58-76)	5YR 2,5/2	ausente	maciça	–	extr. firme	fortemente
Ilha do Cardoso - Perfil H13 - Espodossolo Ferrilúvico hidromórfico hístico, textura arenosa, mal drenado							
Ho	0-10	5YR 3/1	–	maciça	plana e clara	–	não
HD	10-20	10YR 4/1	ausente	maciça	plana e clara	–	não
E	20-38	10YR 7/2	ausente	g. s.	ondulada e abrupta	solta	não
Bhsj1	38-55	10YR 3/2	ausente	maciça	plana e gradual	firme	fracamente
Bhsj2	55-75	10YR 4/3	ausente	g. s.	plana e gradual	muito friável	não
Bhsj3	75-130	10YR 4/3	ausente	g. s.	plana e gradual	muito friável	não
Cgj	130-165	10YR 6/2	ausente	g. s.	–	solta	não
Ilha do Cardoso - Perfil J14 - Organossolo Tiomórfico sáprico espódico, muito mal drenado							
Hd1	0-20	5YR 2,5/1	ausente	maciça	plana e gradual	–	–
Hd2	20-50	5YR 2,5/1	ausente	maciça	plana e gradual	–	–
Hd3	50-60	7,5YR 2,5/2	ausente	maciça	plana e gradual	–	–
Hd4	60-70	5YR 2,5/1	ausente	maciça	plana e clara	–	–
Bhsj1	70-100	5YR 2/1	ausente	g. s.	plana e gradual	firme	fracamente
Bhsj2	100-130	5YR 2/1	ausente	g. s.	–	muito friável	não

Horiz. = horizonte; Prof. = profundidade; ⁽¹⁾Munsell; ⁽²⁾gran. = granular; g. s. = grãos simples; ⁽³⁾extr. = extremamente; – Não se aplica.

O perfil P3 de Bertioiga é o mais bem drenado de todos os analisados. Esse fato, associado à sua maior idade e condições geomorfológicas locais diferenciadas, propiciaram o desenvolvimento de solos com grande variabilidade lateral e vertical de seus horizontes (Coelho et al., 2010a e Buurman et al., 2012), com presença de horizontes Bs, Bsm e plácico, os quais se manifestam no P3 e estão ausentes nos demais perfis estudados (Quadro 1). Os perfis P9 e P10, mais jovens em relação ao P3, mostram seus horizontes contínuos no perfil, aproximadamente paralelos à superfície do terreno, evidenciando que foram formados sob condições de acentuado hidromorfismo (Buurman et al., 2005) e atualmente manifestam significativa oscilação do lençol freático durante o ano.

Micromorfologia

A morfologia da matéria orgânica dos solos estudados varia de acordo com o tipo de horizonte, sua consistência e as condições hidrológicas a que são

submetidos. As mais relevantes feições micromorfológicas de interesse à caracterização e à gênese dos horizontes espódicos são descritas (Quadro 2), agrupando os perfis de acordo com as similaridades (macro e micromorfológicas) ou proximidade geográfica e, conseqüentemente, quanto aos processos de formação envolvidos.

Micromorfologia dos horizontes espódicos dos solos de Bertioiga

Perfis P3 e P6

A matéria orgânica (MO) dos horizontes espódicos dos perfis P3 e P6 é exclusivamente do tipo amorfa, uma vez que foi completamente transformada, não se identificando tanto estruturas celulares como formas originais de remanescentes de plantas (De Coninck et al., 1974). Muitos campos observados nas lâminas mostram revestimentos preenchendo quase que completamente o espaço poroso (distribuição relativa

Quadro 2. Distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ predominante (DRP), tipo de poro predominante (TPP), porosidade, resíduo de raiz (RR) e matéria orgânica monomórfica (MOM) e polimórfica (MOP) dos horizontes e solos estudados

Horizonte	Prof. ⁽¹⁾	DRP ⁽²⁾	TPP	Porosidade	RR	MOM	MOP
cm							
Bertioga							
Perfil P3 - Espodossolo Ferrilúvico órtico dúrico, A moderado, textura arenosa, bem drenado							
Bh1	82-119	porfírica	..	-	-	++++	-
Bhm1	89-125	porfírica-quitônica-gefúrica	cavidades	+++	-	++++	-
Bhm2	120-142	porfírica-quitônica-enáulica	cavidades	++	-	++++	+
Bs2	125-180	complexa, predominando gefúrica e mônica	cavidades e empacotamento	++++	-	+++	-
Perfil P6 - Espodossolo Humilúvico órtico espessarênico, A moderado, textura arenosa, imperfeitamente drenado							
Bhm1	156-205	porfírica-quitônica-gefúrica	cavidades	+	-	++++	-
Perfil P9 - Espodossolo Humilúvico hidromórfico dúrico, A moderado, textura arenosa, muito mal drenado							
Bhm	46-89	quitônica-gefúrica, localmente enáulica e porfírica	cavidades	++	++	++++	-?
Perfil P10 - Espodossolo Humilúvico hidromórfico espessarênico, A moderado, textura arenosa, mal drenado							
Bh1	83-103	quitônica, localmente gefúrica	cavidades	+++	+	++++	-
Bh2	90-117	quitônica, localmente gefúrica	cavidades	++	++	++++	-
Bhm	117-150	quitônica, localmente gefúrica	cavidades	++	-	++++	-
Cananeia							
Perfil P29 - Espodossolo Humilúvico órtico dúrico, A fraco, textura arenosa, imperfeitamente drenado							
Bhm2	87-104	quitônica; localmente porfírica e gefúrica	cavidades	+	-	++++	-
Perfil P30 - Espodossolo Humilúvico órtico dúrico, A fraco, textura arenosa, imperfeitamente drenado							
Bhm	40-76	quitônica, localmente gefúrica e enáulica	cavidades	++	+	++++	-
Ilha do Cardoso							
Perfil H13 - Espodossolo Ferrilúvico hidromórfico hístico, textura arenosa, mal drenado							
E	20-38	quitônica, localmente gefúrica, enáulica e mônica	empacotamento	++++	++	++	+++
Bhsj1	38-55	quitônica-gefúrica, localmente enáulica	cavidades	+++	+++	+	+++
Bhsj2	55-75	quitônica-gefúrica, localmente enáulica, porfírica e mônica	cavidades	+++	++++	+	++++
Perfil J14 - Organossolo Tiomórfico sáprico espódico, muito mal drenado							
Bhsj1	70-100	quitônica-gefúrica	cavidades	+++	+++	+	+++
Bhjs2	100-130	gefúrica, localmente chitônica e enáulica	cavidades	+++	++++	-	++++

⁽¹⁾Prof. = profundidade; ⁽²⁾DRP = Distribuição relativa grosseiros/finos, cuja dimensão que os separa é de 2 μm (Bullock et al., 1985); Sinais utilizados: -, ausente; +, muito pouco; ++, pouco; +++, comum; +++++, abundante.

$g/f_{2\mu m}$ porfírica), fato já observado por McKeague & Wang (1980) em horizontes ortstein formados em materiais de origem essencialmente arenosos do Canadá. No entanto, diferentes tipos básicos de distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ podem ser observados no plano das lâminas dos horizontes B espódicos (Quadro 2), os quais estão associados aos processos de formação e evolução desses horizontes. A figura 2 mostra os principais tipos morfológicos da matéria orgânica dos horizontes espódicos brando e cimentado estudados.

O horizonte Bh1, o mais próximo à superfície, apresenta seus constituintes finos de coloração uniforme, bruno escuro a negro, cuja fábrica é praticamente destituída de espaço poroso (Figura 2a). A MO deste horizonte é do tipo monomórfica, visto que apresenta uma massa contínua, relativamente uniforme quanto à cor e densidade (De Coninck et al., 1974). Por outro lado, os horizontes cimentados, aqui representados pelo Bhm1 e Bhm2, manifestam outras características micromorfológicas (Quadro 2). Sua distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ é composta, havendo o

desenvolvimento de porosidade, predominantemente do tipo cavitária policôncava. Os poros entre os grãos grossos, no entanto, encontram-se majoritariamente preenchidos por um constituinte fino e orgânico de tons negro, bruno-avermelhado-escuro e bruno-avermelhado-claro.

No horizonte Bhm1 (Figura 2b), observa-se que os constituintes orgânicos finos são predominantemente

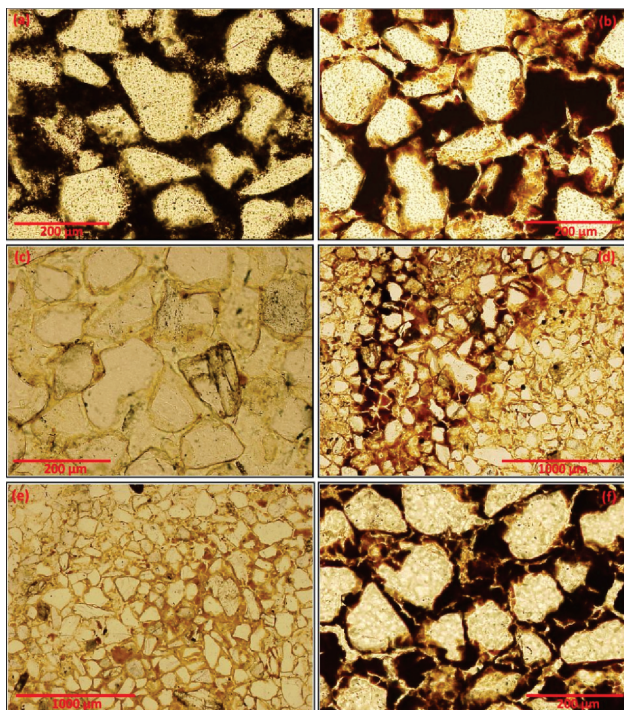


Figura 2. Fotomicrografias mostrando: (a) horizonte Bh1 (perfil P3) com matéria orgânica exclusivamente monomórfica preenchendo totalmente a porosidade (distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ porfírica); (b) fábrica característica do horizonte Bhm1 (perfil P3); distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ complexa. Notar desenvolvimento de porosidade cavitária policôncava, sendo formada pela decomposição do material fino que outrora preenchia totalmente a porosidade. Notar bordas mais claras, dégradé de cores e fendilhamento nas maiores concentrações de finos, com sua separação em unidades menores. Feições de incipiente despodzolização do perfil; (c) fábrica característica do horizonte Bs2; (d) finos mais escuros referem-se ao horizonte plácico (Bs2); (e) finos amarelados neste horizonte estão relacionados à presença de matéria orgânica, com pouco ferro, cuja consistência é muito mais branda em relação ao horizonte plácico; (f) fábrica característica do horizonte Bhm1 do perfil P6. Notar porosidade do tipo cavitária policôncava, possivelmente originada da fissuração e dissolução dos finos. Início do processo de despodzolização do horizonte.

escuros na parte central, de tons negros ou bruno-avermelhado-escuros, transicionando-se, geralmente de maneira gradual, para colorações cada vez mais claras, avermelhadas e vivas nas extremidades. Essa mudança de coloração, em geral, evolui para a formação de microfissuras, com posterior desprendimento e separação desses constituintes em unidades menores. A MO neste horizonte é do tipo monomórfica (De Coninck et al., 1974).

Os horizontes Bs são significativamente diferenciados dos Bh e Bhm relatados, química (Coelho et al., 2010b), macro ou micromorfológicamente. Sob esta última óptica, mostram um padrão de distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ composto, ora do tipo gefúrica-quitônica (Figura 2c), ora somente gefúrica ou mônica, cujos materiais finos são de coloração predominantemente bruno-amarelada. A presença de delgados pans cimentados (horizonte plácico) altera o padrão de constituintes do solo neste horizonte: uma distribuição relativa porfírica é encontrada nesses domínios cimentados, ora de coloração bruno-avermelhado-escuro e bruno-avermelhado, ora bruno-amarelado (Figura 2d,e), cujas diferenças de cores possivelmente estão relacionadas à maior ou menor presença e tipo de oxidróxidos de ferro e de MO e, conseqüentemente, ao grau de cimentação do pan.

Os horizontes cimentados do perfil P6 diferem sutilmente daqueles do perfil P1 em basicamente dois aspectos, sobretudo quantitativos: (1) menor porosidade total, restando maior conteúdo de material fino nestes; e (2) esse material fino apresenta-se com padrão mais homogêneo de cores, predominantemente negro e bruno-avermelhado-escuro, embora variações destas para colorações mais claras e vivas nas bordas também sejam observadas nos constituintes orgânicos finos, bem como o descoramento de sua porção central, ambos seguidos de microfissuração e separação em unidades menores. A figura 2e evidencia alguns padrões relatados e que o húmus monomórfico foi o único encontrado.

Interpretação micromorfológica

A ausência de remanescentes vegetais, sobretudo de raízes, e a presença de húmus predominantemente monomórfico nos horizontes espódicos são evidências da mobilização, iluviação e precipitação da MO na sua formação (De Coninck et al., 1974; De Coninck, 1980; Buurman et al., 2005). No entanto, os padrões micromorfológicos relatados e relacionados aos horizontes cimentados de ambos os perfis convergem para a conclusão de que tais horizontes se encontram em estágio incipiente de decomposição: o material fino está progressivamente sendo removido do espaço intergranular por meio da dissolução/perda dos constituintes orgânicos, originando uma porosidade cavitária policôncava. A descoloração desses constituintes finos com posterior fissuração e sua separação em unidades menores - como observado em maior ou menor intensidade em todos os horizontes cimentados dos perfis estudados - parecem indicar a

ação de processos de fragmentação e remoção da MO do espaço intergrãos e geração de porosidade, outrora totalmente preenchida por material orgânico fino; este último, mobilizado dos horizontes superficiais na forma de complexos organometálicos, redistribuído em profundidade e acumulado/precipitado nos horizontes espódicos (Coelho et al., 2010b). A porosidade gerada nos horizontes cimentados, por sua vez, intensifica o fluxo hídrico e a renovação frequente da água intersticial em contato com um material orgânico de superfície específica cada vez maior, favorecendo sua oxidação/decomposição, até a completa remoção dos constituintes finos orgânicos. Sua permanência nos poros de empacotamento, de variada coloração e densidade, sugere incipiente estágio de decomposição. Os horizontes cimentados do perfil P3, no entanto, mostram-se mais evoluídos: sua maior porosidade e variação de cor e densidade dos constituintes finos em relação ao perfil P6 convergem para um estágio mais avançado de decomposição.

Buurman et al. (2005) salientam que o rebaixamento definitivo do lençol freático tem forte influência na dinâmica da MO de solos formados em condições de acentuado hidromorfismo. É de se supor que os horizontes espódicos cimentados aqui estudados tiveram sua gênese relacionada à elevada atividade de água no sistema, fato já relatado por vários autores (Andriessse, 1968/1969; Wang et al., 1978; De Coninck, 1980; McKeague & Wang, 1980; Lee et al., 1988a), e que as condições químicas e hidrológicas atuais divergem daquelas de sua formação, levando-o à instabilidade de sua MO. O fato de o perfil P3 mostrar sua MO em estágio ligeiramente mais avançado de decomposição deve estar relacionado aos maiores períodos de exposição e de intensidade dos processos hidrológicos atuais, diferenciados em relação às condições de sua formação, já que é mais antigo e melhor drenado que o perfil P6 (Coelho et al., 2010a).

Apesar de a ocorrência comum de forte fissuração dos constituintes finos ser considerada um fenômeno natural nos horizontes cimentados de Espodosolos (Fitzpatrick, 1993), frequentemente interpretado como feições de dissecação da matéria orgânica no estado gel e fortemente hidratada (De Coninck, 1980; Buurman & Jongmans, 2005), os aqui descritos possivelmente estão relacionados a processos diferenciados. A formação de microfissuras nos horizontes cimentados parece suceder a descoloração do material orgânico fino. O gradiente de cores da borda para o centro de alguns constituintes orgânicos intergrãos ou mesmo o surgimento de cores mais vivas no interior desses constituintes, seguidos da formação de microfissuras, corroboram a atuação de processos químicos, os quais podem ser sucedidos por aqueles físicos relacionados à contração dessa MO modificada e com diferente capacidade de (re)hidratação em relação ao seu entorno.

A morfologia diferenciada da MO do horizonte espódico brando em relação ao cimentado, também observada em outros perfis de Cananeia (dados não

mostrados), sugere tipos e condições diferenciadas de formação da MO. Possivelmente, os horizontes espódicos brancos sotopostos aos cimentados foram originados em função das condições hidrológicas impostas pelos horizontes cimentados, fato já relatado por Andriessse (1968/1969) e Buurman et al. (2005), as quais ainda estão em conformidade com a hidrologia atual do perfil, favorecendo a preservação desses horizontes e, conseqüentemente, da MO no espaço intergrãos. Esta se mostra monomórfica, formando uma massa contínua, de coloração e densidade uniformes (De Coninck et al., 1974), preenchendo totalmente o espaço intergrãos.

Os horizontes Bs do perfil P3 são química, macro (Quadro 1) e micromorfológicamente (Figura 2c,d,e) bastante diferenciados dos demais espódicos aqui estudados. Macromorfológicamente, é caracterizado pela coloração amarelada (Quadro 1) e presença de delgados e exíguos horizontes plácicos escuros, que convolam em poucos centímetros. Sob a ótica micromorfológica, os domínios representativos geféricos revelam baixo conteúdo de constituintes finos, inferior a 1 % do plano da lâmina, de coloração brunada e bruno-amarelada (Figura 2c), cuja composição possivelmente está relacionada à presença de MO, com pouco ferro. Este último elemento concentra-se nos horizontes plácicos, juntamente com o maior teor de MO observado no horizonte Bs2 (Coelho et al., 2010b).

A gênese dos horizontes Bs e do plácico neles presente, possivelmente, é extemporânea e mais recente que a dos horizontes espódicos sobrepostos. É provável que sua formação esteja relacionada ao rebaixamento definitivo do lençol freático e mobilização do ferro ferroso (Fe^{2+}) dissolvido nas águas de drenagem, com posterior precipitação (Fe^{3+}) na zona de vadosa, a qual se encontrava oscilando no então horizonte C e abaixo dos horizontes espódicos já formados. No entanto, o conteúdo do elemento precipitado foi muito baixo, tal como relatado por Coelho et al. (2010b), devido (1) ao também pequeno conteúdo de Fe^{2+} nas águas de drenagem e no lençol freático e, ou, (2) à elevada macroporosidade, inerente a esses materiais essencialmente arenosos e de granulometria bem selecionada, ocasionando a inadequação do potencial de oxirredução à precipitação do ferro ferroso em massa.

Em alguns sítios, no entanto, é provável que a porosidade de empacotamento ou as condições locais, incluindo o desenvolvimento de raízes e a transição entre os horizontes, tenham propiciado esses potenciais de oxirredução adequados à precipitação de pequenos, mas maiores, conteúdos de ferro em relação ao restante do horizonte. Nesses sítios, o carbono orgânico dissolvido (COD), mobilizado dos horizontes espódicos sobrepostos, foi adsorvido nos oxidróxidos recém-precipitados, cujo mecanismo foi demonstrado por Jardine et al. (1989), originando os delgados e convolados horizontes plácicos, cujos constituintes

finos são majoritariamente orgânicos, com muito pouco ferro (Coelho et al., 2010b).

Micromorfologia dos Perfis P9 e P10

Os principais tipos morfológicos (De Coninck et al., 1974) de frações orgânicas encontrados nos horizontes espódicos desses perfis são:

a) Resíduos de plantas em diferentes estádios de decomposição, com reconhecíveis ou não estruturas celulares. Nos resíduos ditos transformados não se consegue reconhecer alguma estrutura original da célula, as quais são visíveis somente nos não transformados;

b) Matéria orgânica amorfa, sem visíveis estruturas de plantas ou fungos, exclusivamente do tipo monomórfica, formando uma massa contínua de cor e densidade uniformes.

O horizonte Bhm do perfil P9 mostrou a maior presença de tecidos vegetais entre os analisados (Quadro 2). A ocorrência destes, juntamente com o material fino denso e do entorno a eles relacionado (Figura 3b,c,d), ocupam aproximadamente 30 % do plano da lâmina deste horizonte. Sua fábrica representativa (70 % do plano da lâmina) é mostrada na figura 3a. Nela se observa distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ predominantemente quitônica, com o material grosso total ou parcialmente circundando pelo material fino e de coloração bruno-avermelhada e bruno-avermelhado-escuro, fato também constatado por Kaczorek et al. (2004) em horizontes ortstein na Alemanha. A MO é do tipo monomórfica (De Coninck et al., 1974).

Os resíduos de plantas não transformados mostram, dependendo da seção de corte, células buliformes e alongadas (Twiss, 1992), isotrópicas e com material orgânico bruno-avermelhado-escuro sempre presente nas suas bordas ou, em determinados locais, sobrepondo estas (Figura 3b,c,d). Em menor aumento óptico se observa um material fino, negro ou bruno-avermelhado-escuro circundando os remanescentes vegetais, totalmente isotrópico, de coloração e densidade homogêneas. Em muitos locais esse constituinte fino escuro encontra-se completamente contínuo no entorno dos grosseiros, configurando uma fábrica de domínios porfíricos, em que os grãos de quartzo estão embebidos na densa matriz orgânica.

O horizonte Bh2 do perfil P10 (Figura 3e) é o que apresentou a maior frequência de resíduos de plantas do perfil, exclusivamente não transformados, os quais, associados à matriz fina e escura do entorno, com distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ porfírica, ocupam aproximadamente 20 % do plano da lâmina. A figura 3f mostra a fábrica representativa deste horizonte, com distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ predominantemente quitônica, localmente com tendência gefúrica, a qual não difere significativamente daquela observada nos horizontes Bh1 e Bhm do mesmo perfil (Quadro 2).

Este último horizonte, no entanto, não apresentou remanescentes de plantas, tanto em nível macro como microscópico. Sua matéria orgânica é exclusivamente monomórfica (Quadro 2).

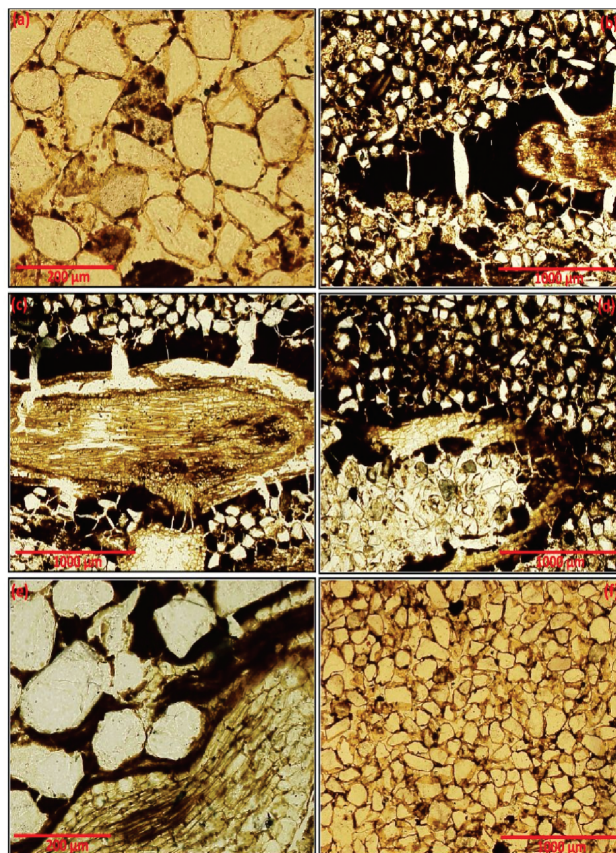


Figura 3. Fotomicrografias mostrando: (a) fábrica representativa do horizonte Bhm, perfil P9 com distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ quitônica-gefúrica; (b) resíduo de raiz (estrutura articulada silicosa; P9; Bhm). Em maior aumento, observam-se células buliformes nas extremidades meristemáticas e alongadas no restante da estrutura. Maior concentração de carbono orgânico se dá na extremidade meristemática da raiz devido à maior intensidade dos processos vitais da raiz; (c) resíduo de raiz (perfil P9; Bhm), com finos isotrópicos e uniformes em cor e densidade possivelmente relacionados à iluviação de matéria orgânica e deposição no entorno da raiz, favorecidos pela própria atividade radicular; (d) resíduo de raiz com distribuição relativa porfírica ao seu redor e presença de constituintes grossos no seu interior (perfil P9; Bhm); (e) resíduo radicular do perfil P10, horizonte Bh2; distribuição relativa porfírica no seu entorno. Notar células alongadas no interior da estrutura articulada silicosa e buliformes nas extremidades (f) fábrica representativa do horizonte Bh2 do perfil P10; distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ quitônica com tendências locais gefúricas.

Interpretação micromorfológica dos horizontes espódicos dos perfis P9 e P10

Os resíduos de plantas são exclusivamente de raízes, possivelmente de gramíneas, devido à predominância de células alongadas e buliformes (Figura 3b,c,e), inseridas numa estrutura articulada silicosa de morfologia característica (Twiss, 1992).

Os revestimentos monomórficos predominam em praticamente todos os horizontes estudados, brandos ou cimentados, excetuando-se no Bhm do perfil P10. Comprovadamente, estão relacionados à iluviação de MO (De Coninck et al, 1974; De Coninck, 1980; Phillips & Fitzpatrick, 1999; Buurman et al., 2005, 2008) e sua imobilização na superfície dos constituintes grossos e poros, sendo este, portanto, o principal mecanismo de formação dos horizontes espódicos acima relatados. No entanto, alguma contribuição da decomposição de raízes para a formação dos horizontes cimentados e brandos pode ser especulada, quer pela presença de resíduos de plantas, quer pela proeminente matriz fina e escura que os circunda (Figura 3b,c,d,e), cuja origem não é conclusiva, bem como não se consegue elucidá-la plenamente com os resultados obtidos e o procedimento analítico aqui utilizado. Algumas hipóteses e teorias, no entanto, podem ser auferidas:

(1) A presença da matriz fina, densa, escura e porfírica exclusivamente associada à ocorrência de remanescentes não transformados de raízes, evidencia que ambos, raízes e matriz fina densa, estão intimamente relacionadas quanto às suas origens;

(2) A predominância dessa matriz fina e densa ocupando perfeitamente seu entorno, intimamente entremeada aos constituintes grossos e em perfeita continuidade ao material vegetal (Figura 3b,c,d), sugere mobilização de MO dos horizontes sotopostos e deposição preferencial nas zonas de desenvolvimento de raízes;

(3) Essa deposição preferencial pode ter ocorrido devido à atividade destas, funcionando como uma bomba de absorção de água e nutrientes, a qual também veicula conteúdos expressivos de COD, provindo dos horizontes sotopostos na forma de complexos organometálicos, segregando-o e precipitando-o na superfície das raízes durante o processo de absorção seletiva;

(4) A maior atividade da extremidade meristemática pode ter sido a responsável pela morfologia da matéria orgânica mostrada na figura 3b. É evidente na figura a maior concentração do material orgânico na borda meristemática da raiz, acompanhando perfeitamente sua morfologia;

(5) Essa teoria da raiz como a responsável pela imobilização da MO iluvial vai ao encontro daquela argumentada por De Coninck (1980). Segundo esse autor, um dos processos de imobilização da MO eluvial é a sua dissecação, resultando num aumento da concentração de íons, contração da dupla camada

difusa e expulsão da água dos poros no interior das partículas orgânicas, ocasionando sua polimerização e formação de agregados grandes, inicialmente em estado gel, evoluindo para o sólido juntamente com a desidratação;

(6) Essa desidratação e concentração iônica responsáveis pela imobilização da MO iluviada podem perfeitamente ser orquestradas pela atividade biológica, sobretudo de raízes durante sua absorção seletiva de água e nutrientes, conduzindo à precipitação do carbono orgânico iluvial já segregado no seu entorno;

(7) A absorção radicular faz com que o volume de solo do seu entorno seque mais rapidamente em relação aos locais livres da ação de raízes, o que favorece a precipitação do carbono iluvial no seu entorno.

A gênese de horizontes espódicos cimentados ainda não é totalmente entendida (Kaczorek et al., 2004). A maioria dos trabalhos considera que o Al-húmus translocado na forma de complexos é essencial para a gênese do ortstein (De Coninck, 1980; McKeague & Wang, 1980; McHardy & Robertson, 1983; Koopman, 1988; Lee et al., 1988a,b; Kaczorek et al., 2004) e que se necessita de um período de dissecação para seu endurecimento (Andriessse, 1968/1969; De Coninck, 1980; Bronick et al., 2004; Kaczorek et al., 2004). Portanto, processos físico-químicos parecem estar relacionados à gênese do ortstein, primeiro (químico) com a mobilização de MO complexada com Al, fato constatado aqui pelos revestimentos no entorno dos materiais grossos (distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ quitônica), típicos de iluviação de MO, a qual se mostra com elevada saturação por Al (Coelho et al., 2010b); segundo pela dissecação (física), a qual pode ser promovida ou intensificada pelas raízes, nos microssítios de seu entorno.

Desta forma, a presença de raízes é um possível fator que concorre para a cimentação dos horizontes espódicos, conforme argumentado anteriormente, ao contrário do que argumentam De Coninck (1980) e van Breemen & Buurman (2002).

É provável que ciclos frequentes e curtos de umedecimento e secagem sejam mais eficazes que o completo dessecação do perfil na formação do ortstein, em razão de a oscilação do lençol freático promover condições mais adequadas dos seguintes fatores:

(1) Umidade ao longo do ano à produção e mobilização do COD;

(2) Atividade radicular, absorvendo mais água no período de menor disponibilidade da mesma, intensificando a secagem do solo, segregação do COD e sua desidratação, precipitando-o na superfície e entorno das raízes ativas;

(3) Suprimento de Al do lençol freático (Farmer et al., 1983), promovendo a imobilização dos complexos organometálicos provindos da superfície, que se tornam saturados no elemento em contato com a água freática e precipitam (De Coninck, 1980), quer na

superfície dos constituintes grossos (Figura 3d), quer na porosidade, preenchendo-a totalmente.

A ausência de resíduos de plantas não transformados nos horizontes espódicos dos perfis P3 e P6 e sua influência na formação desses horizontes pode estar relacionada às mudanças que ocorrem com a melhoria de drenagem (Buurman et al., 2005), considerando-se que tais perfis foram formados sob condições de hidromorfismo acentuado. Essas mudanças podem ser devidas às alterações na microbiota e condições químicas (pH) do meio com o rebaixamento definitivo do lençol freático, induzindo a completa decomposição dos remanescentes vegetais, ressolubilização e remobilização da MO. A baixa ou mesmo a nula atividade da fauna, condicionada, sobretudo, pela pobreza dos substratos orgânico e mineral, impossibilita a formação de MO polimórfica nos horizontes espódicos dos perfis P9 e P10. A morfologia típica da MO monomórfica no entorno das raízes desses perfis (Figura 3b,c,d), caracterizada por uma massa contínua de cor e densidade relativamente uniformes, tal como argumentado por De Coninck et al. (1974), converge para a origem iluvial dessa MO. Isso corrobora um dos mecanismos supramencionados: precipitação da MO pela absorção seletiva da raiz e sua precipitação no entorno desta.

Micromorfologia e interpretação dos solos de Cananeia (Perfis P29 e P30)

A micromorfologia desses perfis apresenta mais semelhanças do que diferenças em relação aos anteriores (Quadro 2). A diferença mais marcante é mostrada na figura 4a, referente ao perfil P29. Nela observa-se que minerais pesados estão alinhados, formando estratificações oriundas da dinâmica sedimentar marinha, fato já evidenciado nas observações macromorfológicas. Esses minerais estão distribuídos por toda a lâmina, ora mais adensados e alinhados (Figura 4a), ora dispersos na fábrica predominantemente quitônica (Figura 4b). Quando alinhados e empacotados, atuam como uma barreira mecânica à iluviação do COD (Figura 4a), contribuindo para a imobilização da MO e formação do horizonte espódico. Sempre acima dos minerais pesados, empacotados e alinhados, a fábrica é porfírica, com a matriz fina preenchendo praticamente todo o espaço poroso. No plano da lâmina, essa matriz porfírica localizada acima das estratificações tem espessura média de 1 cm; abaixo, a fábrica é predominantemente quitônica (Figura 4a), evidenciando que a barreira mecânica imposta pelo empacotamento de grãos impede a passagem apenas de parte do COD; o que passa deposita-se na superfície dos constituintes grossos, numa fábrica característica de iluviação e precipitação de MO na formação de horizonte espódico (De Coninck, 1980; Phillips & Fitzpatrick, 1999; Buurman et al., 2005, 2008). Matéria orgânica monomórfica é única nesse horizonte.

O perfil P30, por outro lado, não apresenta estratificações, e sua MO mostra remanescentes vegetais e MO monomórfica. A micromorfologia característica do seu horizonte Bhm é mostrada na figura 3c. Nota-se que este horizonte está se desmantelando. Isso é evidenciado pelo desmoronamento da fábrica original, originando uma porosidade cavitária que se inicia e se funde possivelmente por dois processos, os quais podem atuar concomitantemente: (1) penetração e decomposição radicular, favorecendo o fluxo hídrico preferencial (Figura 4c); e (2) decomposição da MO (Figura 4d), evidenciada pelo gradiente de suas cores e densidade, com presença de microfissuras separando os constituintes orgânicos em unidades menores que outrora preenchiam totalmente o espaço poroso. A porosidade cavitária policôncava e os constituintes finos orgânicos de variada cor e densidade da figura

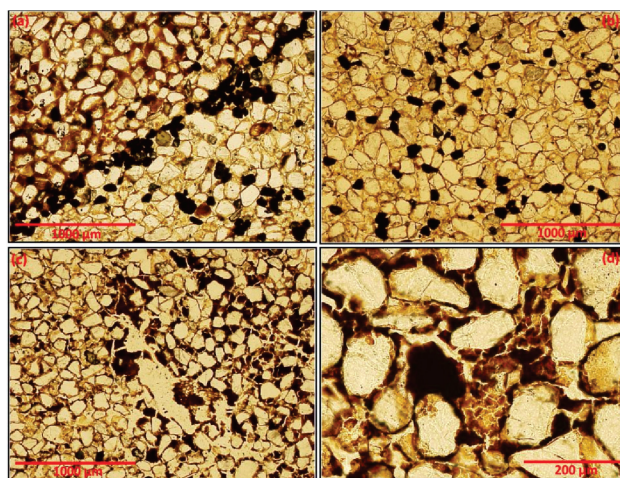


Figura 4. Fotomicrografias dos perfis 29 e 30, mostrando: (a) concentração de minerais pesados no horizonte Bhm2 do perfil 29, típicos da dinâmica sedimentar marinha. O alinhamento e adensamento reduzem considerável e abruptamente a porosidade, levando à imobilização físico-mecânica da matéria orgânica iluvial. Distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ porfírica acima dos pesados alinhados e quitônica abaixo; (b) fábrica característica desse horizonte, com pesados dispersos na matriz predominantemente quitônica; (c) remanescente de raiz no horizonte Bhm do perfil P30, gerando uma porosidade cavitária com a sua decomposição, a qual favorece o fluxo preferencial de água e início do processo de desmantelamento do horizonte; (d) detalhe do horizonte anterior, evidenciando a porosidade cavitária policôncava e a matriz fina com variadas cor e densidade, sugerindo decomposição da matéria orgânica (despodzolização incipiente) e geração da porosidade, outrora totalmente preenchida pela matéria orgânica iluviada.

4d, bem acomodados em relação ao material fino adjacente e a maioria interconectados entre si, sugerem a decomposição da MO e geração da porosidade, a qual, por sua vez, favorece o fluxo hídrico preferencial, acelerando o processo. A penetração radicular pode ser um dos mecanismos que desencadeiam o dismantelamento dos horizontes ortstein e espódicos nesses solos, os mais antigos aqui estudados, os quais se encontram bem drenados na maior parte do ano.

Micromorfologia dos solos da Ilha do Cardoso

Micromorfologia e interpretação dos perfis H13 e J14

O hidromorfismo e, sobretudo, a presença de horizontes orgânicos nos solos estudados da Ilha do Cardoso influenciaram sobremaneira os horizontes espódicos sotopostos: quanto mais espessos e sujeitos ao hidromorfismo permanente, maior é a participação de raízes na sua formação. Os principais tipos morfológicos da MO nos horizontes minerais desses perfis são:

a) Resíduos de raízes em diferentes estádios de decomposição, com reconhecíveis estruturas celulares;

b) Matéria orgânica amorfa, sem visíveis estruturas de plantas ou fungos, a qual pode ser de três tipos: (1) estrutura polimórfica do tipo agregados, formada de pelotas fecais transformadas com limites claros entre as unidades; (2) estruturas monomórfica e polimórfica na forma de revestimentos; e (3) estrutura polimórfica do tipo acumulações, oriundas das transformações microbiológicas e coalescência das pelotas fecais, sem limites distintos entre as unidades.

Os resíduos em diferentes estádios de decomposição predominam nos horizontes espódicos, aumentando em profundidade de tal forma que ocupam mais de 50 % da fábrica dos horizontes mais profundos de ambos os perfis. A figura 5 mostra os diferentes tipos de MO e a fábrica, característicos dos horizontes espódicos do perfil H13.

A presença de pelotas fecais na forma de agregados (Figura 5a) e acumulações (Figura 5b) é resultado da decomposição de raízes pela mesofauna no caso dos agregados (De Coninck et al., 1974; Phillips & Fitzpatrick, 1999), com atuação microbiológica originando as acumulações (Buurman et al., 2005), ambas estimuladas pela abundância de resíduos orgânicos nos horizontes hísticos e espódicos. A profundidade de ocorrência dessas pelotas fecais (aproximadamente 70 cm) indica que o horizonte espódico mais profundo, Bhsj2, encontra-se ou já esteve bem drenado por algum período durante o ano. Observando-se a olho nu a lâmina deste horizonte (foto não mostrada), sua base é formada por faixas horizontais aproximadamente paralelas e de diferentes tonalidades: as mais escuras intercalam-se com as mais claras, ambas com espessuras que variam de

0,8 a 2,5 cm. Entre as escuras, as de menor croma localizam-se próximas à base do horizonte e estão relacionadas ao desenvolvimento e decomposição de raízes que cresceram aproximadamente paralelas à superfície do terreno (Figura 5c,d), onde estruturas celulares de plantas ainda estão visíveis e inseridas numa matriz de tonalidades bruno-avermelhada-

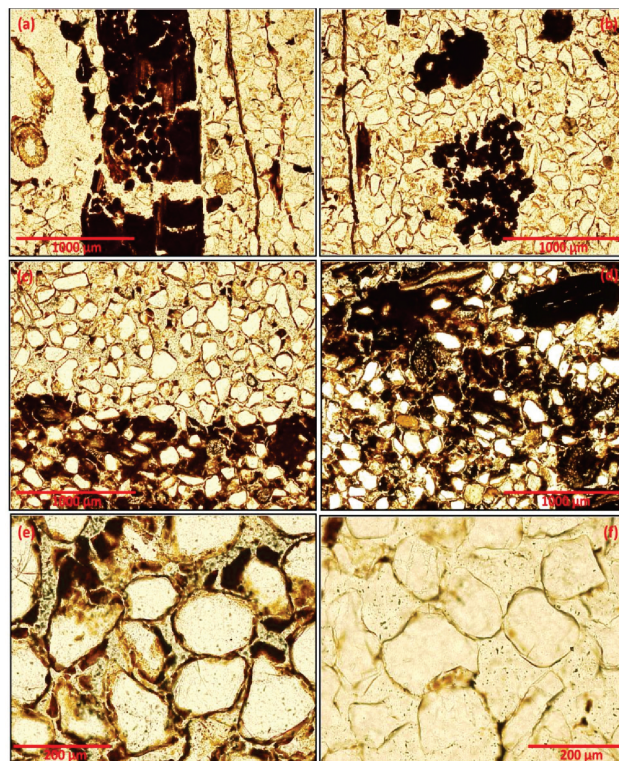


Figura 5. Fotomicrografias do perfil H13, horizonte Bhsj2, mostrando: (a) pelotas fecais na forma de agregados (De Coninck et al., 1974) no interior de uma raiz em diferentes estádios de decomposição; (b) pelotas fecais transformadas e coalescidas pela atividade microbiológica (Bullock et al., 1985), originando uma morfologia denominada de acumulação (De Coninck et al., 1974). Notar finos revestimentos predominantemente uniformes em cor e densidade nos constituintes grossos, típicos de iluviação; (c) remanescentes radiculares na base do horizonte Bhsj2 intimamente associados à matéria orgânica polimórfica de diferentes cores e densidades e paralelos à superfície do terreno, indicando decomposição radicular; (d) idem anterior, mais próximo à base do horizonte; (e) detalhes da matriz do horizonte Bhsj2. Notar revestimentos de diferentes cores, espessuras e densidades, possivelmente polimórficos; (f) parte superior do horizonte. Notar baixo conteúdo de finos, presença de grossos desprovidos de revestimentos e insertos numa matriz mônica-gefúrica, evidenciando ausência de iluviação de complexos organometálicos.

escura, bruno-escura e negra, de diferentes densidades, evidenciando decomposição de matéria orgânica *in situ*.

Segundo Bullock et al. (1985), o material orgânico polimórfico frequentemente contém resíduos de parede celular, em geral altamente transformados e cobertos com uma espessa crosta de substâncias orgânicas (Figura 5c,d). Por outro lado, as faixas escuras mais distantes da base do horizonte Bhsj2 caracterizam-se pela presença exclusiva de constituintes amorfos orgânicos, formando uma fábrica com distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ complexa, do tipo quitônica-gefúrica-enáulica (Figura 5e).

Do exposto, pode-se concluir que o principal mecanismo de formação dos horizontes espódicos e Espodossolos sujeitos ao hidromorfismo frequente e com horizontes hísticos em superfície é a decomposição de raízes *in situ*. No entanto, revestimentos estão presentes nos constituintes grossos. São polimórficos, segundo a definição de De Coninck et al. (1974). A figura 5e mostra detalhes dos revestimentos característicos dos horizontes espódicos, com diferentes cores, densidades e espessuras. Devem estar relacionados a remanescentes de raízes totalmente decompostas que aderiram aos constituintes grossos por meio de forças eletrostáticas e, ou, à solubilização dessas raízes e sua mobilização na fase líquida a curtas distâncias, precipitando na superfície da matriz grossa. A relação dos revestimentos ditos polimórficos às raízes é corroborada pela ausência destes na parte superior do horizonte Bhsj2 (faixa clara), onde há pouca ou nula presença de raízes e de seus produtos de decomposição (Figura 5f; distribuição relativa $g/f_{2\mu m}$ mônica-gefúrica).

O perfil J14 não apresenta MO proveniente da ação da mesofauna (agregados e acumulações), possivelmente devido ao hidromorfismo acentuado durante a maior parte do ano. Os remanescentes vegetais são dominantes (>70 %), sobretudo no horizonte mais profundo (Bhsj2), com estruturas celulares bem preservadas (Figura 6a,b) e MO amorfa e escura, intimamente associada a células vegetais (Figura 6c), denotando seu estágio avançado de decomposição. Uma fábrica exclusivamente quitônica-gefúrica pode ser observada no topo do horizonte Bhsj1 (Figura 6d), formando revestimentos mais uniformes em cor, densidade e espessura em relação aos descritos no perfil H13 (Figura 5e). São monomórficos em sua maioria, oriundos da translocação da MO dissolvida e precipitada na superfície da matriz grossa (De Coninck, 1980). No entanto, a grande participação de raízes em diferentes estágios de decomposição, sobretudo no horizonte espódico mais profundo, torna evidente que a sua decomposição *in situ* é o principal mecanismo responsável pela formação desses horizontes que se encontram submersos na maior parte do ano e estão sotopostos a horizontes hísticos. Revestimentos monomórficos estão ausentes no horizonte Bhsj2 do perfil J14.

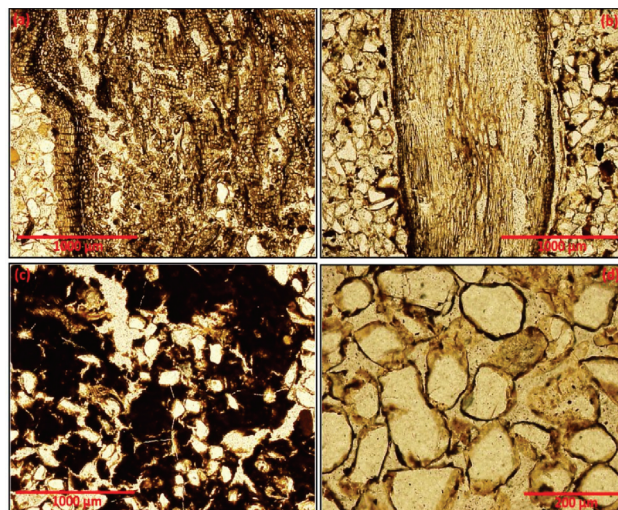


Figura 6. Fotomicrografias dos horizontes Bhsj1 e Bhsj2 do perfil J14, mostrando: (a) e (b) resíduos vegetais que são abundantes nos horizontes Bhsj1 (a) e Bhsj2 (b); (c) resíduos vegetais intimamente associados a constituintes finos, negros e orgânicos em avançado estágio de decomposição (horizonte Bhsj2); (d) detalhe dos revestimentos e fábrica da porção superior do horizonte Bhsj1. Notar revestimentos orgânicos uniformes em cor e densidade distribuídos numa fábrica de distribuição $g/f_{2\mu m}$ predominantemente quitônica, típicos de matéria orgânica iluvial e, portanto, monomórfica.

CONCLUSÕES

1. A micromorfologia indicou que a matéria orgânica da maioria dos horizontes espódicos estudados é dominada por material iluvial. No entanto, a decomposição de raízes é o principal mecanismo de acumulação de carbono em horizontes espódicos sotopostos aos hísticos, em solos sujeitos a fortes condições de hidromorfismo.

2. A participação de raízes, entretanto, vai além do clássico modelo de sua decomposição na formação dos horizontes espódicos e Espodossolos. As observações micromorfológicas convergiram para o seguinte e inédito mecanismo de podzolização: as raízes reconhecidamente funcionam como uma bomba seletiva, absorvendo água e nutrientes, a qual pode veicular carbono orgânico dissolvido em quantidades expressivas. A absorção seletiva da água e nutrientes pelas raízes faz com que parte do carbono dissolvido segregue no seu entorno durante a atividade radicular. A continuidade do processo conduz à desidratação do material orgânico segregado e sua precipitação devido à secagem preferencial do entorno das raízes (absorção), em relação às demais áreas do solo livres da interferência radicular.

LITERATURA CITADA

- ANDRIESESSE, J.P. A study of the environment and characteristics of tropical podzols in Sarawak (east-Malaysia). *Geoderma*, 2:201-227, 1968/1969.
- BARDY, M.; FRITSCH, E.; DERENNE, S.; ALLARD, T.; NASCIMENTO, N.R. & BUENO, G.T. Micromorphology and spectroscopic characteristics of organic matter in waterlogged podzols of the upper Amazon basin. *Geoderma*, 145:222-230, 2008.
- BRONICK, C.J.; MOKMA, D.L.; LI, H. & BOYD, S.A. Recementation of crushed ortstein by blueberry leaf extract. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:558-561, 2004.
- BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G. & TURSINA, T. Handbook for soil thin section description. Albrighton, Waine Research Publication, 1985. 152p.
- BUURMAN, P. & JONGMANS, A.G. Podzolisation and soil organic matter dynamics. *Geoderma*, 125:171-183, 2005.
- BUURMAN, P.; VIDAL-TORRADO, P. & LOPES, M.J. The podzol hydrowequence of Itaipuaré (São Paulo, Brazil) 2 Soil organic matter chemistry by Pyrolysis - Gas chromatography/Mass Spectrometry. No prelo. *Soil Sci. Soc. Am. J.* doi: 10.2136/sssaaaj12.0047, 2012.
- BUURMAN, P.; JONGMANS, A.G. & NIEROP, K.G.J. Comparison of Michigan and Dutch podzolized soils: organic matter characterization by micromorphology and pyrolysis-GC/MS. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72:1344-1356, 2008.
- BUURMAN, P.; van BERGEN, P.F.; JONGMANS, A.G.; MEIJER, E.L.; DURAN, B. & van LAGEN, B. Spatial and temporal variation in podzol organic matter studied by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry and micromorphology. *Eur. J. Soil Sci.*, 56:253-270, 2005.
- CASTRO, S.S.; COOPER, M.; SANTOS, M.R. & VIDAL-TORRADO, P. Micromorfologia do solo: Bases e aplicações. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2003. v.3. p.107-164.
- COELHO, M.R. Caracterização e gênese de Espodossolos da planície costeira do estado de São Paulo. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 2008. 270p. (Tese de Doutorado).
- COELHO, M.R.; MARTINS, V.M.; VIDAL-TORRADO, P.; SOUZA, C.R.G.; PEREZ, X.L.O. & VÁSQUEZ, F.M. Relação solo-relevo-substrato geológico nas restingas da planície costeira do estado de São Paulo. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:833-846, 2010a.
- COELHO, M.R.; VIDAL-TORRADO, P.; OTERO-PÉREZ, X.L.; MARTINS, V.M. & VÁSQUEZ, F.M. Química e gênese de solos desenvolvidos sob vegetação de restinga no estado de São Paulo. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1951-1964, 2010b.
- DE CONINCK, F. Major mechanisms in formation of spodic horizons. *Geoderma*, 24:101-126, 1980.
- DE CONINCK, F.; RIGHI, D.; MAUCORPS, J. & ROBIN, A.M. Origin and micromorphology of organic matter in sandy spodosols. In: RUTHEFORD, G.K., ed. Soil microscopy. Ontario, Limestone Press, 1974. p.263-273.
- FARMER, V.C.; SKJEMSTAD, J.O. & THOMPSON, C.H. Genesis of humus B horizons in hydromorphic humus podzols. *Nature*, 304:342-344, 1983.
- FITZPATRICK, E.A. Soil microscopy and micromorphology. Chichester, John & Wiley, 1993. 304p.
- GOMES, F.H. Gênese e classificação de solos sob vegetação de restinga na Ilha do Cardoso-SP. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 2005. 107p. (Tese de Doutorado)
- JARDINE, P.M.; WEBER, N.L. & McCARTHY, J.F. Mechanisms of dissolved organic carbon adsorption on soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1378-1385, 1989.
- KACZOREK, D.; SOMMER, M.; ANDRUSCHKEWITSCH, L.; OKTAB, L.; CZERWINSKI, Z. & STAHR, K. A comparative micromorphological and chemical study of "Raseneisenstein" (bog iron ore) and "Orstein". *Geoderma*, 121:83-94, 2004.
- KOOPMAN, G.J. "Waterhard": A hard brown layer in sand below peat, the Netherlands. *Geoderma*, 42:147-157, 1988.
- LEE, F.Y.; YUAN, T.L. & CARLISLE, V.W. Nature of cementing materials in ortstein horizons of selected Florida Spodosols: I. Constituents of cementing materials. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1411-1418, 1988a.
- LEE, F.Y.; YUAN, T.L. & CARLISLE, V.W. Nature of cementing materials in ortstein horizons of selected Florida Spodosols: II. Soil properties and chemical forms of aluminium. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1796-1801, 1988b.
- McKEAGUE, J.A. & WANG, C. Micromorphology and energy dispersive analysis of orstein horizons of podzolic soils from New Brunswick and Nova Scotia, Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 60:9-21, 1980.
- MARTINS, S.E.; ROSSI, L.; SAMPAIO, P.S.P. & MAGENTA, M.A.G. Caracterização florística de comunidades vegetais de restinga em Bertiooga, SP, Brasil. *Acta Bot. Bras.*, 22:249-274, 2008.
- McHARDY, W.J. & ROBERTSON, L. An optical, scanning electron microscopic and microanalytical study of cementation in some podzols. *Geoderma*, 30:161-170, 1983.
- OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T. & CAMARGO, M.N. Classes gerais de solos do Brasil: Guia auxiliar para seu reconhecimento. 2.ed. Jaboticabal, FUNEP, 1992. 201p.
- PETRI, S. & FÚLFARO, V.J. Nota sobre a geologia e terraços marinhos da Ilha do Cardoso. *Notícias Geomorfol.*, 10:21-31, 1970.
- PHILLIPS, D.H. & FITZPATRICK, E.A. Biological influences on the morphology and micromorphology of selected Podzols (Spodosols) and Cambisols (Inceptisols) from the eastern United States and north-east Scotland. *Geoderma*, 90:327-364, 1999.
- SAUER, D.; SPONAGEL, H.; SOMMER, M.; GIANI, L.; JAHN, R. & STAHR, K. Review article – Podzol: Soil of the year 2007 – A review on its genesis, occurrence, and functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 170:581-597, 2007.

- SETZER, J. Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo. São Paulo, Centrais Elétricas de São Paulo, 1966. 61p.
- SUGUIO, K & MARTIN, L. Formações quaternárias marinhas do litoral paulista e sul fluminense. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COASTAL EVOLUTION IN THE QUATERNARY, 1978, São Paulo. Anais... São Paulo, IGCB/IG-USP/SBG, 1978. 55p. (Special Publication, 1)
- SUGUIO, K. & TESSLER, M.G. Planícies de cordões litorâneos quaternários do Brasil: Origem e nomenclatura. In: LACERDA, L.D.; ARAÚJO, D.S.D.; CERQUEIRA, R. & TURQ, B. Restingas: Origem, estrutura e processos. Niteroi: CEUFF, 1984. p. 15-26.
- TWISS, P.C. Predicted world distribution of C₃ and C₄ grass phytoliths. In: RAPP, G.J. & MULHOLLAND, S.C., eds. Phytolith systematics. Emerging issues. Advances in archaeological and museum science. New York, Plenum Press, 1992. v.1. p.113-128.
- van BREEMEN, N. & BUURMAN, P. Soil formation. 2.ed. Dordrecht, Kluwer Academic, 2002. 404p.
- WANG, C.; BEKE, G.J. & McKEAGUE, J.A. Site characteristics, morphology and physical properties of selected ortstein soils from the Maritime provinces. Can. J. Soil Sci., 58:405-420, 1978.