



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

Rizzato Coelho, Maurício; Moreira Martins, Vanda; Vidal-Torrado, Pablo; Gouveia Souza, Célia Regina
de; Otero Perez, Xosé Luis; Macías Vázquez, Felipe

**RELAÇÃO SOLO-RELEVO-SUBSTRATO GEOLÓGICO NAS RESTINGAS DA PLANÍCIE COSTEIRA
DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 34, núm. 3, mayo-junio, 2010, pp. 833-846

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180215874024>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

SEÇÃO V - GÊNESE, MORFOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

RELAÇÃO SOLO-RELEVO-SUBSTRATO GEOLÓGICO NAS RESTINGAS DA PLANÍCIE COSTEIRA DO ESTADO DE SÃO PAULO⁽¹⁾

Maurício Rizzato Coelho⁽²⁾, Vanda Moreira Martins⁽³⁾, Pablo Vidal-Torrado⁽⁴⁾, Célia Regina de Gouveia Souza⁽⁵⁾ Xosé Luis Otero Perez⁽⁶⁾ & Felipe Macías Vázquez⁽⁶⁾

RESUMO

Atributos morfológicos de 28 pedons, descritos e amostrados em cronosequências, e datações absolutas por luminescência (TL e LOE) e ^{14}C foram utilizados para elucidar os principais fatores envolvidos na formação e evolução dos Espodossolos nos depósitos marinhos quaternários da planície costeira do Estado de São Paulo. Os solos estudados localizam-se nos municípios de Bertioga (Baixada Santista), Cananeia e Ilha Comprida (Litoral Sul). Essa abordagem, pouco comum nos estudos dos ambientes de planície costeira brasileiros, possibilitou as seguintes interpretações: (a) o relevo, a dinâmica hídrica e o tempo (incluindo as variações do nível relativo do mar) são os principais condicionantes da diferenciação espacial dos Espodossolos nos terraços marinhos; (b) os Espodossolos mais antigos e bem drenados, devido às condições de relevo e rebaixamento do nível do lençol freático, apresentam grande variabilidade e diversidade de seus horizontes e atributos morfológicos, diferindo daqueles mal drenados (antigos ou jovens), em que os horizontes são mais homogêneos; (c) os Espodossolos mais antigos, quando bem drenados, mostram-se em avançado estádio de degradação, enquanto os mal drenados encontram-se bem preservados, indicando que a sua gênese e permanência na paisagem estão ligadas ao relevo, que, por sua vez, controla a dinâmica hídrica; (d) os Espodossolos mais evoluídos e antigos, dotados de horizontes cimentados (*orstein*), podem ser considerados indicadores pedolitoestratigráficos dos depósitos marinhos pleistocênicos da Formação Cananeia; e (e) a gênese do horizonte *orstein* se deu em condições topográficas e hidrológicas pretéritas diferentes das atuais, indicando se tratar de solos poligenéticos ou paleossolos.

Termos de indexação: datações por luminescência e ^{14}C , Espodossolos, podzolização, depósitos marinhos quaternários.

⁽¹⁾ Parte das Teses de Doutorado dos dois primeiros autores apresentadas à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP. Realizadas com auxílio da CAPES e FAPESP. Recebido para publicação em março de 2009 e aprovado em março de 2010.

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

⁽³⁾ Professora do Curso de Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE-MCR. Rua Pernambuco, 1777, CEP 85960-000, Marechal Cândido Rondon (PR). E-mail: mmvanda@hotmail.com

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP. Caixa Postal 09, CEP 13418-900, Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: pablo@esalq.usp.br

⁽⁵⁾ Pesquisadora do Instituto Geológico-SMA/SP; celia@igeologico.sp.gov.br

⁽⁶⁾ Professores do Departamento de Edafología y química agrícola de la Universidad de Santiago de Compostela. Campus Universitario Sur. Facultad de Bioloxía. Espanha. E-mails: xl.oteroy@usc.es; felipe.macias.vazquez@usc.es

SUMMARY: RELATIONSHIP BETWEEN SOIL, LANDSCAPE AND GEOLOGICAL SUBSTRATE OF THE SANDY COASTAL PLAIN OF SÃO PAULO STATE

This paper presents the results of morphological properties and absolute dating by luminescence and ^{14}C of 28 pedons from Quaternary marine deposits located in three counties along the coast in São Paulo State, Brazil: Bertioga, Cananéia, and Ilha Comprida. The objective was to provide evidence to elucidate the main processes of the genesis of Spodosols. This approach, which is unusual in research concerned with Brazilian Quaternary coastal plains, resulted in the following interpretations: (a) relief, hydrologic conditions and time were the main soil formation factors responsible for the spatial differentiation of the Spodosols in marine terraces; (b) The horizon morphologic features of the most aged and well-drained Spodosols are highly variable and diverse. On the other hand, poorly drained Spodosols (old or young) are more homogeneous; (c) the oldest Spodosols, when well-drained, are in an advanced degradation stage while the poorly drained are well-preserved. This suggests that the genesis and permanence of the Spodosols on the landscape depend on the relief features controlling the hydrologic dynamics; (d) the most aged and developed Spodosols with orstein horizons can be considered lithostratigraphic indicators of marine deposits of the Pleistocene age in the Cananéia Formation; (e) the orstein horizon genesis took place under ancient topographic and hydrologic conditions that differ from the current. This indicates that such Spodosols are polygenetic or paleosols.

Index terms: dating by luminescence and ^{14}C ; Spodosols; podzolization; quaternary marine deposits.

INTRODUÇÃO

As planícies costeiras paulistas apresentam grande diversidade de ambientes sedimentares quaternários, cujas unidades geológico-geomorfológicas quaternárias foram estudadas por poucos autores (Barcelos et al., 1976; Suguió & Tessler, 1992; Souza et al., 2008; Martins, 2009). Entre as unidades quaternárias mapeadas por esses autores, três são de especial interesse para o presente estudo: (a) cordões litorâneos arenosos holocénicos, (b) terraços marinhos holocénicos e (c) terraços marinhos pleistocénicos. Nesses ambientes arenosos, genérica e inapropriadamente denominados de “restinga” (Souza et al., 2008), predominam os Espodossolos e os Neossolos Quartzarênicos (Oliveira et al., 1992; Rossi & Queiroz Neto, 2001).

O termo “restinga” apresenta várias definições, entre elas a geológica-geomorfológica, a botânica e a ecológica. No sentido geológico-geomorfológico, refere-se a barras ou barreiras arenosas, especialmente quando fecham lagunas costeiras (Suguió & Tessler, 1984; Suguió, 1992). As comunidades vegetais associadas às praias, dunas, cordões arenosos, depressões entre cordões, margens de lagoas, de ambientes paludosos e brejosos e até manguezais também são descritas como vegetação de restinga (Lacerda et al., 1982). A fim de evitar a utilização inadequada do termo “restinga”, Souza (2006) propôs a denominação dessas diferentes fitofisionomias de vegetação de planície costeira e baixa encosta.

Suguió & Martin (1976, 1978a,b) ressaltaram que as oscilações do nível relativo do mar (NRM) durante o Quaternário desempenharam importante papel na evolução das planícies costeiras em todo o mundo. Na planície costeira paulista, dois eventos transgressivo-regressivos foram registrados: o de Cananeia e o de Santos. O primeiro, de idade pleistocênica, teve seu pico máximo de oscilação positiva há 120.000 anos A.P. (antes do presente); o segundo, de idade holocênica, teria atingido seu pico máximo há 5.100 anos A.P.

Os depósitos pleistocénicos associados ao evento transgressivo-regressivo Cananeia são denominados Formação Cananeia, enquanto os holocénicos, associados ao evento transgressivo-regressivo Santos, são designados de Formação Ilha Comprida (Suguió & Martin, 1976, 1978a, 1994). Ao relacionar os componentes da paisagem nas bacias dos rios Itaguaré e Guaratuba em Bertioga-SP, Rossi & Queiroz Neto (2001) e Souza et al. (2009) encontraram estreita relação entre o substrato geológico, os solos e a vegetação: os Espodossolos predominam nos terraços marinhos pleistocénicos sob Floresta Alta de Restinga. Relações semelhantes também ocorrem no litoral norte de São Paulo (Souza & Luna, 2008).

Neste trabalho são apresentadas as principais relações solo-relevo-substrato geológico encontradas em depósitos marinhos arenosos quaternários de três municípios costeiros paulistas: Bertioga, Cananeia e Ilha Comprida. Estudos dessa natureza contribuem tanto para o entendimento dos frágeis ecossistemas de “restinga”, constantemente submetidos à

degradação ambiental, como para trabalhos futuros de caracterização das planícies costeiras.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Pedons foram descritos e amostrados em três municípios do litoral do Estado de São Paulo: Bertioga, Cananeia (Ilha de Cananeia) e Ilha Comprida (Figura 1). O clima do litoral paulista é do tipo Af, com precipitação média anual de 1.800 a 2.000 mm e médias de temperaturas mínimas de 19 °C e de temperaturas máximas de 27 °C (Köppen & Geiger, 1928). A geologia dos locais estudados é composta por depósitos arenosos pleistocénicos e holocénicos de origem marinha (Petri & Fúlfaro, 1970; Suguió & Martin, 1978a,b). Sobre eles desenvolvem-se principalmente florestas altas e baixas de restinga (Souza et al., 2009) associadas a Espodossolos e Neossolos Quartzarênicos (Oliveira et al., 1992; Rossi & Queiroz Neto, 2001).

Com cerca de 240 km², a planície costeira de Bertioga, localizada ao norte da Baixada Santista (Figura 1), apresenta quatro gerações de depósitos marinhos: duas de idade pleistocénica (terraços marinhos correlatos à Formação Cananeia e provavelmente à Formação Morro do Icapara) e duas holocénicas (terraços marinhos e cordões litorâneos correlatos à Formação Ilha Comprida) (Souza et al., 2009).

A Ilha Comprida, localizada no litoral sul do Estado de São Paulo, possui 63 km de comprimento por até 5 km de largura. É constituída por sedimentos

arenosos quaternários, predominantemente holocénicos, exceto para poucos remanescentes de terraços marinhos pleistocénicos e um morrote constituído de rochas alcalinas (Morrete), ambos localizados no extremo sul da Ilha. Dunas frontais holocénicas de até 10 m de altitude estão presentes sobre os cordões e os terraços arenosos (Suguió et al., 1999). Martin & Suguió (1978) interpretaram como uma ilha-barreira relacionada às mudanças do NRM no Quaternário, cujo prolongamento para o norte teria se iniciado entre 6.000 e 7.000 anos A.P., com a transgressão marinha.

A Ilha de Cananeia é composta, predominantemente, por sedimentos arenosos marinhos pleistocénicos (Suguió et al., 1999). Sua origem estaria relacionada ao período ocorrido entre 80 e 130.000 anos A.P. (Watanabe et al., 1997).

Trabalhos de campo

As prospecções foram realizadas por meio de sondagens com trado manual, observações de afloramentos e abertura de minitrincheiras para selecionar os locais de amostragem. Estes consistiram de 28 pedons representativos das unidades geológico-geomorfológicas alvos, sendo 24 de Espodossolos e quatro de Neossolos Quartzarênicos. Em Bertioga, 13 pedons foram descritos e coletados em cronosequência (P1 a P13); em Ilha Comprida, 10 pedons (P17 a P26); e na Ilha de Cananeia, cinco pedons (P27 a P31). Os solos foram descritos e amostrados conforme Santos et al. (2005) e classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos-SiBCS (Embrapa, 2006). A descrição completa, a classificação e os dados analíticos dos pedons estão apresentados em Coelho (2008) e Martins (2009).

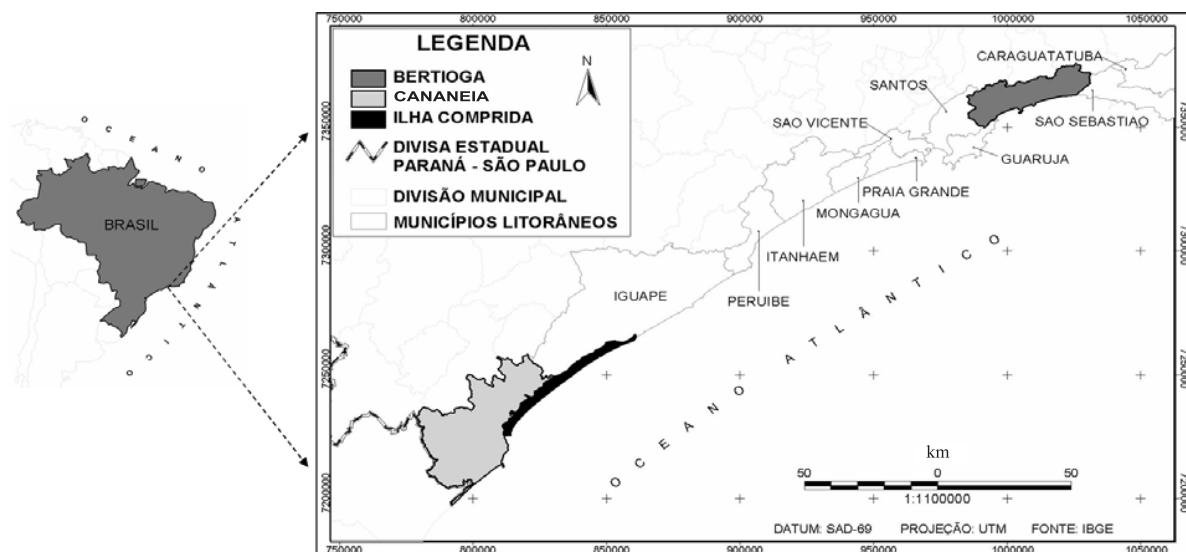


Figura 1. Localização dos municípios de Bertioga, Cananeia e Ilha Comprida no litoral do Estado de São Paulo-SP.

Datações

As datações por Termoluminescência (TL) e Luminescência Opticamente Estimulada (LOE) foram realizadas no Laboratório de Vidros e Datação (LVD) da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP), utilizando-se o protocolo de análise MAR (*multiple aliquot regenerative-dose*), segundo Murray & Wintle (2000) e Wintle & Huntley (1980). Os procedimentos e a forma de coleta e acondicionamento das amostras foram realizados conforme Sallun et al. (2007). Fragmentos de restos vegetais (tronco) soterrados a 1,2 m de profundidade (P7), bem como a fração TFSA (terra fina seca ao ar) de três horizontes *orstein* de diferentes pedons (P3, P10 e P30), foram utilizados para datação ao ^{14}C . As amostras foram datadas no Laboratório de ^{14}C do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), em Piracicaba (SP), o qual utiliza os métodos de síntese de benzeno e espectrometria de cintilação líquida para determinar a atividade do ^{14}C (Pessenda & Camargo, 1991).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A sequência de solos do município de Bertioga, representada pelos pedons P1 a P13 (Figura 2), é a

mais extensa (aproximadamente 2,8 km). Seu material de origem, areias marinhas quartzosas, é de idade pleistocênica (P1 a P6) a holocênica (P13), correlato às Formações Cananeia e Ilha Comprida, respectivamente. Nessa sequência, algumas inconsistências cronológicas foram observadas entre as idades obtidas e aquelas utilizadas para definir os eventos transgressivo-regressivos do litoral paulista por Suguió & Martin (1978a). Por outro lado, as idades geológicas (TL e LOE) da sequência da Ilha de Cananeia (Figura 3) aproximam-se daquelas sugeridas por Suguió & Petri (1973), Suguió & Martin (1978a,b) e Watanabe et al. (1997). Na sequência de Ilha Comprida (Figura 4), uma estreita faixa de sedimentos de idade pleistocênica (P17) antecede cronologicamente os sedimentos holocénicos da Formação Ilha Comprida no sentido Mar de Cananeia-Oceano Atlântico, corroborando os estudos de Martin & Suguió (1978) e Suguió et al. (1999).

Apesar dos problemas e considerações sobre a avaliação da idade ^{14}C em Espodossolos, documentados por Matthews (1980) e Schwartz (1988), algumas de suas interpretações parecem relevantes, além de contribuírem para os estudos estratigráficos, evolutivos e paleoclimáticos da planície costeira paulista.

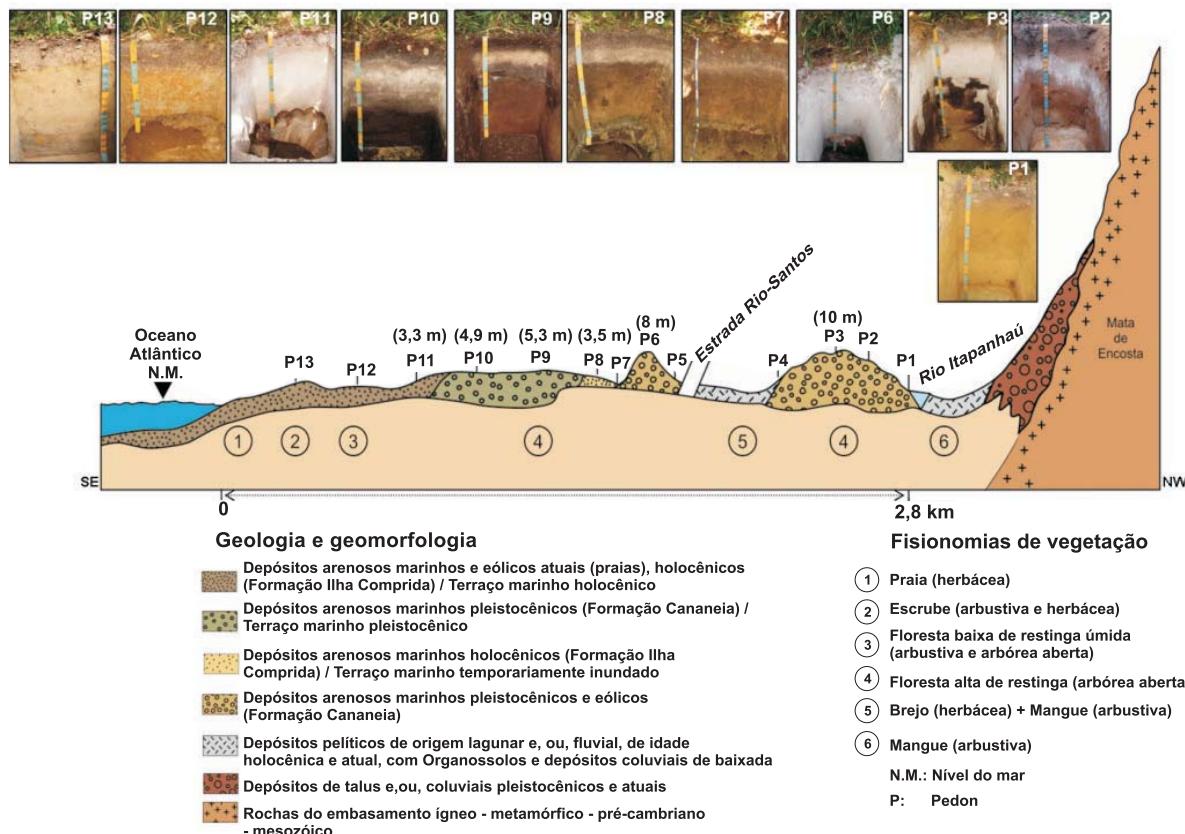


Figura 2. Cronossequência de Bertioga. As cotas altimétricas aproximadas estão apresentadas acima da indicação dos pedons.

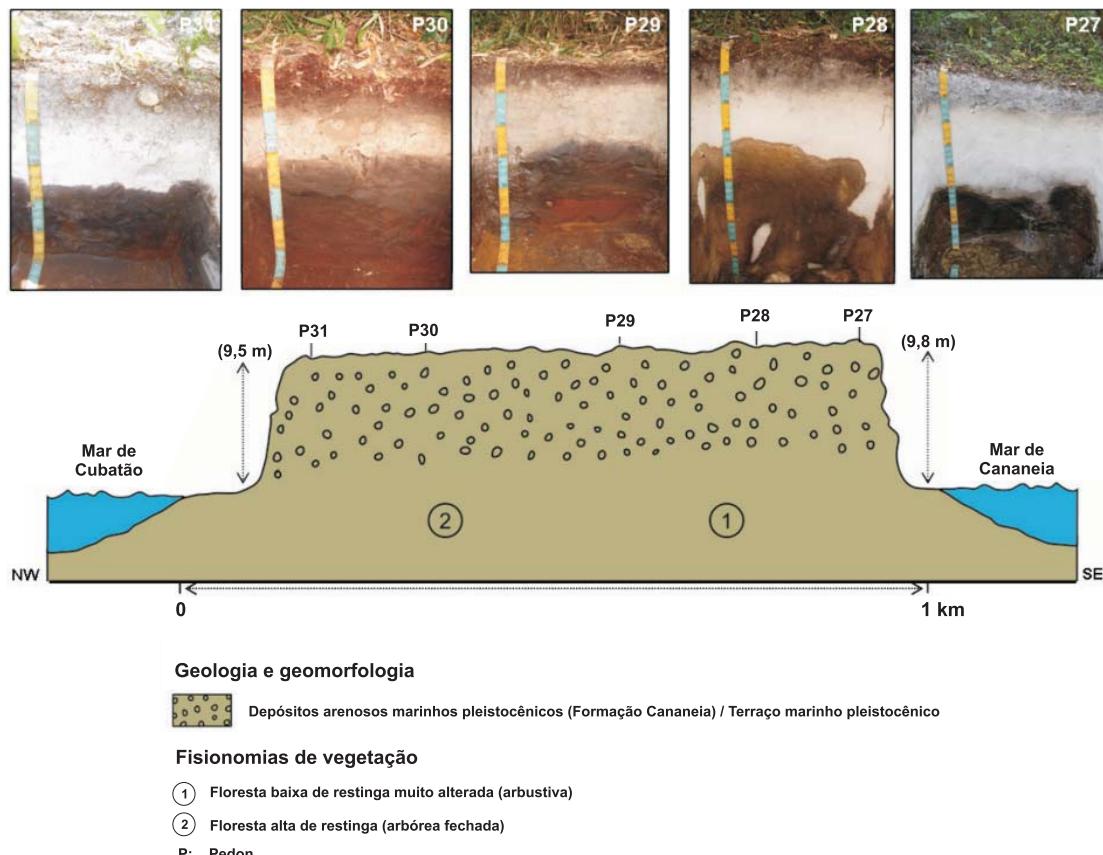


Figura 3. Cronossequência da Ilha de Cananeia. As cotas altimétricas aproximadas estão apresentadas nas extremidades da sequência.

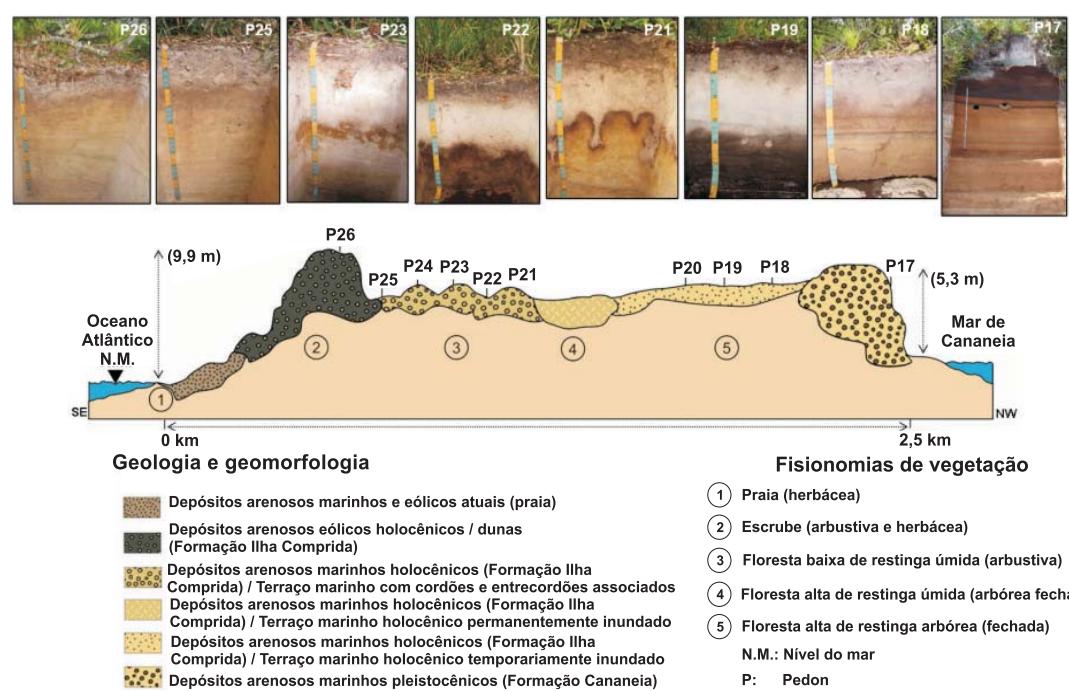


Figura 4. Cronossequência da Ilha Comprida.

Considerando as idades ^{14}C obtidas para os horizontes *orstein* e a premissa de que o tempo de residência médio (TRM) da matéria orgânica corresponde, aproximadamente, à metade do intervalo desde que sua acumulação se iniciou (De Coninck, 1980; Schwartz, 1988), pode-se inferir que as acumulações desse material nos horizontes B espódicos (*orstein*) iniciaram-se há cerca de 18.500, 9.600 e 4.260 anos A.P., respectivamente para os pedons P30, P03 e P10 (Quadro 1).

Assim, as idades ^{14}C e o TRM da matéria orgânica dos horizontes *orstein* (Bhm) dos pedons P30, P03 e P10 evidenciam numa primeira análise que: o pedon mais velho é o de Cananeia, o qual coincide com o depósito mais antigo (Quadro 2); e as idades ^{14}C dos pedons de Bertioga (P13 e P10) variam em conformidade com aquelas obtidas dos sedimentos por TL e LOE (Quadro 2), ou seja, os depósitos mais antigos apresentaram idades ^{14}C mais elevadas.

Quadro 1. Idade ^{14}C da matéria orgânica dos horizontes cimentados (*orstein*) e de um tronco de árvore (horizonte Cg) nos pedons selecionados

Pedon	Horizonte	Profundidade	Município	Idade ^{14}C	TRM do material orgânico
		cm		(anos A.P.) ⁽¹⁾	(anos A.P.)
P3	Bhm2	120–142	Bertioga	4.800 ± 80	9.600
P10	Bhm	117–150	Bertioga	2.130 ± 70	4.260
P30	Bhm	58–105	Cananeia	9.250 ± 90	18.500
P7	Cg	120	Bertioga	3.700 ± 70	-

⁽¹⁾A.P.: antes do presente.

Quadro 2. Dados de Termoluminescência (TL) e de Luminescência Opticamente Estimulada (LOE) de 13 amostras dos pedons estudados em Bertioga, Ilha Comprida e Ilha de Cananeia-SP

Município	Coordenada	Pedon	Profundidade	Dose ± anual	Dose acumulada	Idade LOE	Idade TL
Bertioga	383.330 S 7.364.836 W	P1	0,80	932 ± 61	116,98	125.600 ± 14.500	131.500 ± 15.100
Bertioga		P1	1,85	1.338 ± 165	235,00	175.000 ± 30.000	171.100 ± 30.000
Bertioga	384.524 S 7.364.581 W	P6	0,60	770 ± 64	25,29	33.600 ± 4.500	32.800 ± 4.400
Bertioga		P6	1,30	309 ± 13	52	168.000 ± 15.000	150.000 ± 13.500
Bertioga	384.919 S 7.364.284 W	P9	1,05	272 ± 9	11,6	42.700 ± 3.500	41.200 ± 3.400
Bertioga	387.643 S 7.365.241 W	P11	1,10	677 ± 107	3,5	5.100 ± 1.000	4.800 ± 1.000
Ilha Comprida	211.136 S 7.236.517 W	P17	0,83	1.533 ± 105	10,76	7.000 ± 800	10.400 ± 1.200
Ilha Comprida		P17	4,50	710 ± 68	9,38	13.200 ± 1.900	22.800 ± 3.300
Ilha Comprida	212.077 S 7.235.756 W	P21	0,50	603 ± 103	2,77	4.600 ± 1.100	4.800 ± 1.100
Ilha Comprida		P21	1,55	931 ± 196	3,02	3.200 ± 900	- ⁽¹⁾
Ilha Comprida	212.849 S 7.234.721 W	P26	1,75	1.683 ± 99	0,75	500 ± 50	3.000 ± 300
Cananeia	206.083 S 7.236.264 W	P31	0,40	794 ± 210	222,38	280.300 ± 88.200	271.000 ± 85.300
Cananeia		P31	2,80	1.280 ± 193	400,91	313.100 ± 62.900	272.300 ± 54.700

⁽¹⁾Dado numérico não disponível.

Essas idades coincidem com os registros de variações do NRM na costa paulista: no Pleistoceno Superior, durante o último máximo glacial, ocorrido há aproximadamente 17.000–18.000 anos A.P., o NRM encontrava-se em profundidades próximas às atuais isóbatas de -110 m a -130 m (Suguio & Martin, 1976, 1978a). Provavelmente, os Espodossolos de Cananeia tiveram seu início de formação e máximo desenvolvimento nos primórdios do estádio interglacial subsequente, período mais úmido do que o glacial que o antecedeu (Shell-Ybert et al., 2003), quando o NRM rapidamente se elevou. Condições favoráveis à podzolização teriam dado origem a esses solos: clima úmido e expansão de espécies vegetais arbóreas que produzem a serapilheira ácida; elevação do nível do lençol freático e diminuição da atividade biológica no solo; e material arenoso de origem marinha, pobre em bases, o qual exerce papel fundamental na gênese dos Espodossolos na planície costeira (van Breemen & Buurman, 2002; Sauer et al., 2007).

O fato de a idade estimada para o TRM da matéria orgânica (18.500 anos A.P.) do horizonte *orstein*, na Ilha de Cananeia (P30), coincidir com o período de transição climática no final do Pleistoceno (17.000–18.000 anos A.P.) indica que os Espodossolos podem não ser atuais e teriam sua máxima expressão pedogenética associada à transição do Pleistoceno Superior para o Holoceno Inferior.

O início do período de formação dos Espodossolos da cronosequência de Bertioga também é condizente com os eventos transgressivo-regressivos marinhos do Quaternário no Estado de São Paulo. Suguio & Martin (1978b) mapearam os depósitos onde se localiza o pedon P3 (Figura 2) como pleistocênicos e correlatos à Formação Cananeia. A suposta idade do início de formação do horizonte *orstein* (Bhm2) do pedon P3 (cota altimétrica de 10 m), de 9.600 anos A.P., corrobora as interpretações desses autores. Por outro lado, o TRM da matéria orgânica (4.260 anos A.P.) do pedon P10 (cota altimétrica de 5,3 m) e a idade ^{14}C de fragmentos de madeira enterrados (3.700 ± 70 anos A.P.) encontrados no pedon P7 (cota altimétrica de 3,5 m) indicam que o início do processo de formação dos seus horizontes B espódicos estaria associado à fase regressiva do NRM, ocorrida desde 5.100 anos A.P. (Suguio & Martin, 1976, 1978a) ou 5.600 anos A.P. (Martin et al., 2003), quando o NRM se elevou $4 \pm 0,5$ m acima do atual, até o presente; portanto, mais jovens que a idade do TRM da matéria orgânica do pedon P3.

As idades TL e LOE obtidas e aquelas utilizadas para reconstruir as antigas posições do NRM para o litoral paulista, no tempo e no espaço, indicam que a idade dos depósitos em que se localizam os pedons P1 (171.100 ± 30.000 anos A.P.) e P6 (150.000 ± 13.500 anos A.P.) ultrapassa 120.000 anos A.P. (Quadro 2). Algumas interpretações podem ser auferidas a partir desses resultados: o setor em que se situa o pedon P6 representa um remanescente dos depósitos marinhos

da Formação Cananeia, isolado na paisagem, e é contemporâneo ao setor do pedon P3 (Figura 2). Os sedimentos desses depósitos podem ter sido retrabalhados pelo vento em período pós-deposicional, conforme consideraram Suguio & Martin (1978b) e Martins (2009). Nesses setores, é provável que os horizontes *orstein* dos Espodossolos tenham contribuído para a resistência à erosão e permanência dos remanescentes pleistocênicos na paisagem atual; a discrepância entre as idades dos sedimentos de topo e de subsuperfície (Quadro 2) indica que eles podem ter sido depositados em diferentes períodos e, ou, retrabalhados pelo vento após deposição marinha. Também não podem ser descartadas as limitações da técnica e do protocolo de análise (MAR) utilizado nas datações de TL e LOE (Sallum et al., 2007); da mesma forma, as idades superiores a 120.000 anos A.P. dos depósitos (pedons P3 e P6) também podem estar relacionadas às limitações da técnica e ao protocolo de análise (MAR), bem como às condições de sedimentação, como argumentado por Nott et al. (1994) para Espodossolos em ambientes de dunas da costa australiana. Por algum motivo, a idade residual (TL e LOE) de parte dos sedimentos aqui considerados, com diferenças entre as idades avaliadas verticalmente num mesmo pedon, pode não ter sido completamente zerada. É possível que o rápido transporte e deposição dos grãos de quartzo, bem como as condições de luminosidade do ambiente, não tenham propiciado suficiente exposição à radiação solar ultravioleta (Wintle & Muray, 2006) para zerar as suas idades TL e LOE residuais. Esses sedimentos teriam sido depositados em diferentes períodos e, associados às condições diferenciadas de transporte (mar, vento), condicionaram valores muito heterogêneos de intensidade luminescente residual. Isso explicaria as diferentes idades, mais antigas que as esperadas, encontradas num mesmo perfil (P3 e P6) e entre os depósitos marinhos e aqueles retrabalhados pelo vento.

Apesar das diferenças entre as idades TL e LOE (Quadro 2), verificou-se que há redução destas em direção aos horizontes superficiais dos pedons analisados, concorrendo para considerar os resultados satisfatórios, os quais, associados às idades ^{14}C e aos aspectos pedológicos, possibilitaram as seguintes interpretações: na cronosequência de Bertioga, os Espodossolos de idades ^{14}C holocénicas formaram-se nos sedimentos pleistocênicos da Formação Cananeia (P3 e P10); as variações de solo e de relevo entre o P11 e o P12, juntamente com a idade aproximada de 5.100 anos do depósito no pedon P11 (Quadro 2), de cota altimétrica de 3,3 m (Figura 2), sugerem que o máximo transgressivo do NRM holocênico (Transgressão Santos) deu-se nesse setor da sequência; a diferença entre as idades TL e LOE a 0,6 e 1,3 m de profundidade no material mineral do horizonte E do pedon P6 (Quadro 2) sugere a ocorrência de duas fases deposicionais nesse pacote sedimentar durante o Pleistoceno: uma muito antiga (marinha) e outra mais jovem no final dessa época, durante a qual houve

remobilização ou retrabalhamento dos sedimentos superficiais (horizontes A + E), provavelmente por processos eólicos. O material mineral que forma os horizontes subsuperficiais B espódicos consolidados (*orstein*) seria preservado, conforme constatado por Nott et al. (1994) em Espodossolos da costa australiana.

No Brasil, a presença de *orstein* foi empiricamente utilizada por alguns geólogos quaternaristas como indicativo de sedimentos pleistocênicos costeiros (Suguio & Martin, 1978b). A partir dos dados obtidos e das observações de campo, presume-se certa veracidade em tal assertiva. Embora os Espodossolos estejam presentes em depósitos marinhos tanto pleistocênicos quanto holocênicos, o horizonte *orstein* ocorre apenas nos pleistocênicos. Na sequência de Ilha Comprida, o horizonte *orstein* não foi observado nos depósitos holocênicos, enquanto na sequência de Cananeia, dominada por sedimentos pleistocênicos, quase todos os Espodossolos apresentaram horizonte *orstein* dentro de 2 m de profundidade, com exceção do pedon P28 (Quadro 3). Em Bertioga esse horizonte está presente apenas nos pedons mais antigos (P3, P4, P6, P9 e P10), formados nos depósitos da Formação Cananeia, mas ausente no pedon P11 desenvolvido sobre os depósitos holocênicos. Também está ausente nos pedons P7 (3.700 ± 70 anos A.P.) e P8 formados por sedimentos pleistocênicos remobilizados e depositados sobre ambientes fluviais holocênicos. Da mesma forma, em Caraguatatuba (litoral norte de São Paulo), Souza (1992) encontrou o horizonte *orstein* somente nos terraços marinhos pleistocênicos, embora os Espodossolos também estejam presentes nos cordões litorâneos holocênicos mais antigos. Essas informações, associadas às observações do relevo local, sugerem que os horizontes *orstein* podem ser utilizados como indicadorespedoestratigráficos dos depósitos marinhos das planícies costeiras, desde que associados a outros indicadores geológicos e geomorfológicos locais e regionais.

Nas planícies costeiras paulistas, as condições climáticas, progressivamente mais úmidas desde o final do Pleistoceno (Shell-Ybert et al., 2003), associadas à instalação da vegetação de floresta, às variações do NRM e ao material de origem, contribuíram para a formação dos antigos Espodossolos com horizontes *orstein*. É provável que a origem e a preservação do *orstein* decorram da atuação e maior estabilidade do lençol freático na posição em que se formaram.

As idades obtidas por meio das datações ao ^{14}C e do TRM da matéria orgânica presentes nesses horizontes (Quadro 1), discutidas anteriormente, levam a supor que a maioria dos Espodossolos desenvolvidos sobre os terraços marinhos pleistocênicos das sequências estudadas em Bertioga e Ilha de Cananeia são paleossolos ou, ao menos, poligenéticos, sobretudo quando dotados de horizontes *orstein*. Na sequência de solos estudada em Ilha Comprida, os Espodossolos mais jovens formaram-se nos depósitos sedimentares da formação de mesmo nome, bem drenados e

caracterizados pelo alinhamento de cordões arenosos reafeiçoados. Por isso, esses Espodossolos são pouco desenvolvidos e, atualmente, encontram-se em diferentes estádios de formação.

Solos: classes, distribuição na paisagem e morfologia

Na sequência de Bertioga (sentido mar-serra), na transição do setor de pós-praia para os cordões litorâneos, ocorrem os Neossolos Quartzarênicos (P13). A ausência de características hidromórficas até cerca de 1,0 m de profundidade decorre de o lençol freático estar abaixo de 1,5 m na maior parte do ano. Nesse segmento não há evidência de podzolização e sim de mobilização de Fe, o qual imprime a coloração amarela aos horizontes nos primeiros 0,7 m de profundidade. À medida que se distancia da praia, a hidromorfia aumenta, juntamente com o aparecimento de mosqueados avermelhados e concentração de Fe, típicos de feições redoximórficas que caracterizam o pedon P12, representado por um Neossolo Quartzarênico Hidromórfico típico (Figura 2).

A transição dos Neossolos Quartzarênicos hidromórficos (P12) para os Espodossolos se dá por uma suave ruptura de declive, sucedida por uma área deprimida (Figura 2), mal drenada, onde ocorrem Organossolos. A partir daí ocorre o Espodossolo Humilúvico hidromórfico espessarênico (P11), destituído de horizonte *orstein*, mas bem desenvolvido e com horizontes A + E de espessura superior a 1,0 m (Quadro 3).

O segmento plano, que se inicia no setor do pedon P11, prolonga-se no sentido mar-serra. A partir da cota de 4,5 m é dominado por Espodossolos Humilúvicos hidromórficos com horizontes *orstein* (Bhm), que ocorrem entre 0,4 e 1,4 m, sob horizontes E com diferentes espessuras, as quais diminuem do pedon P10 para o P9. Os pedons P8 e P7, representados por Espodossolos hidromórficos com exíguo horizonte E e destituídos de horizonte *orstein*, localizam-se em uma área deprimida e muito mal drenada que antecede o remanescente de terraço marinho pleistocênico onde está situado o pedon P6 (Figura 2). Os limites entre os horizontes dos pedons P8 e P7 são os mais difusos, e os horizontes B espódicos, os menos desenvolvidos entre os Espodossolos dessa cronosequência. Uma peculiaridade desses Espodossolos é a presença de horizontes Cg (hidromórficos), sendo que no pedon P8 é de textura média e se inicia a 1,3 m de profundidade. Nesse horizonte, os abundantes fragmentos fósseis de troncos de árvores de idade holocênica (3.700 ± 70 ; Quadro 1), associados à cota altimétrica (3,5 m) e à presença de argila e de restos vegetais, evidenciam que os Espodossolos (P7 e P8) se formaram a partir dos sedimentos marinhos pleistocênicos remobilizados e depositados sobre um ambiente fluvial.

Quadro 3. Dados morfológicos selecionados e classificação dos principais pedons estudados em Bertioga, Ilha Comprida e Ilha de Cananeia-SP

Hor. ⁽¹⁾	Prof. (cm)	Cor úmida (Munsell)	Estrutura ⁽²⁾		Grau de transição entre horizontes	Consistência úmida ⁽³⁾	Cimentação
			Tipo	Grau			
Bertioga – Pedon P1 – Neossolo Quartzarênico órtico típico, A moderado, excessivamente drenado							
A1	0– 8	5YR 5/1	gran./g. simples	fraca	plana/clara	solta	não
A2	8– 25	5YR 4/1	gran./g. simples	fraca	plana/gradual	muito friável	não
AC	25– 38	5YR 4/2	gran./g. simples	fraca	plana/clara	muito friável	não
CA	38– 84	10YR 4/6	Ausente	g. simples	ondulada/difusa	muito friável	não
C1	84–140	10YR 6/4	Ausente	g. simples	plana/gradual	solta	não
C2	140–160	10YR 6/6	Ausente	g. simples	plana/gradual	solta	não
C3	160–175	10YR 6/8	Ausente	g. simples	plana/abrupta	solta	não
C4	175–210	10YR 6/6	Ausente	g. simples	—	solta	não
Bertioga – Pedon P3 – Espodossolo Ferrilúvico órtico dúrico, A moderado, textura arenosa, bem drenado							
A1	0– 6	5YR 3/1	gran./g. simples	fraca	plana/clara	solta	não
A2	6– 13	5YR 4/1–5YR 8/1	gran./g. simples	fraca	plana/clara	solta	Não
EA	13– 25	5YR 6/1	ausente	g. simples	plana/clara	solta	Não
E1	25– 71	5YR 8/1	ausente	g. simples	plana/clara	solta	Não
E2	106–180	5YR 6/1	ausente	g. simples	descontínua/abrupta	solta	Não
EB	94–113	5YR 5/1	ausente	g. simples	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	Extremamente
Bertioga – Pedon P6 – Espodossolo Humilúvico órtico espessarênico, A moderado, textura arenosa, acentuadamente/imperfeitamente drenado							
A	0– 15	5YR 6/1	gran./g. simples	fraca	plana/clara	solta	Não
AE	15– 41	5YR 6/1	gran./g. simples	fraca	plana/clara	solta	Não
EA	41– 71	5YR 7/1	ausente	g. simples	plana e difusa	solta	Não
E	71–153	5YR 8/1	ausente	g. simples	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 %	ausente	maciça	—	friável e muito firme	Fortemente
Bertioga – Pedon 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./g. simples	fraca	plana/clara	solta	não
E	17–(27–32)	5YR 6/1–5YR 5/1	ausente	g. simples	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 %	ausente	maciça	plana/gradual	friável a firme	Não
Bh3	106–130+	5YR 4/4	ausente	maciça	—	friável a firme	Não
Bertioga – Pedon P11 – Espodossolo Humilúvico hidromórfico espessarênico, A moderado, textura arenosa, mal drenado							
A	0–14	10YR 6/1	gran./g. simples	fraca	plana/clara	muito friável	não
EA	14–35	7,5YR 6/2	ausente	g. simples	ondulada/clara	solta	não
E1	29–71	5YR 8/1	ausente	g. simples	ondulada/abrupta	solta	não
E2	53–100	5YR 6/1	ausente	g. simples	ondulada/clara	solta	não
E3	84–112	5YR 6/1	ausente	g. simples	plana/clara	solta	não
EB	112–122	5YR 4/2	ausente	g. simples	plana/abrupta	solta	não
Bh1	122–140	5YR 3/2	ausente	maciça	plana/abrupta	friável	Não
Bh2	140–160	5YR 3/1	ausente	maciça	—	firme	Fracamente

Continua...

Quadro 3. Continuação

Hor. ⁽¹⁾	Prof. (cm)	Cor úmida (Munsell)	Estrutura ⁽²⁾		Grau de transição entre horizontes	Consistência úmida ⁽³⁾	Cimentação
			Tipo	Grau			
Ilha Comprida – Pedon P17 – Espodossolo Ferrihumilúvico órtico espessarênico, A moderado, textura arenosa, moderadamente drenado							
A	0– 30	5YR 5/1	gran./g. simples	fraca	plana/clara	Solta	não
EA	30– 52	5YR 6/1	ausente	g. simples	plana/clara	Solta	não
E1	52– 88	5YR 7/1	ausente	g. simples	plana/clara	Solta	não
E2	88–115	5YR 6/1	ausente	g. simples	ondulada/abrupta	Solta	não
BE	115–130	5YR 5/1	ausente	g. simples	plana/gradual	muito friável	não
Bh	130–243	10YR 2/2	ausente	g. simples	descontínua/gradual	firme e muito firme	fracamente
Bs	243–485	10YR 5/6	ausente	maciça	plana/difusa	firme e friável	não
C	485–500	10YR 6/4	ausente	maciça	–	firme e friável	Não
Ilha Comprida – Pedon P24 – Espodossolo Ferrilúvico órtico espessarênico, A fraco, textura arenosa, fortemente drenado							
A	0– 18	7,5YR 5/1	gran./g. simples	fraca	plana/clara	solta	Não
AE	18– 32	7,5YR 6/1	ausente	g. simples	plana/clara	solta	não
E	32– 78	7,5YR 7/1	ausente	g. simples	plana/clara	solta	não
EB	66– 88	10YR 6/3	ausente	g. simples	ondulada/abrupta	solta	não
Bs1	70– 95	7,5YR 4/4/10YR 5/6	ausente	maciça	plana/gradual	firme	não
Bs	84–144	10YR 5/6/2,5YR 6/6	ausente	maciça	descontínua/gradual	friável e firme	não
C1	112–160	10YR 4/3/10YR 3/3	ausente	g. simples	plana/difusa	muito friável	não
C2	143–180	10YR 7/2	ausente	g. simples	–	friável	não
Ilha Comprida – Pedon P26 – Neossolo Quartzarênico órtico típico, A moderado, excessivamente drenado							
A	0– 27	7,5YR 5/2	gran./g. simples	fraca	ondulada/clara	solta	não
AC	22– 45	10YR 5/3	ausente	g. simples	plana/clara	solta	não
C1	45– 70	10YR 7/1	ausente	g. simples	plana/abrupta	solta	não
C2	70–128	10YR 6/4	ausente	g. simples	plana/difusa	muito friável	não
C3	128–210	2,5YR 7/2	ausente	g. simples	–	muito friável	não
Cananeia – Pedon P28 – Espodossolo Ferrihumilúvico órtico espessarênico, A fraco, textura arenosa, bem drenado							
A	0– 21	10YR 5/1	gran./g. simples	fraca	plana/clara	solta	não
E	21–126	7,5YR 7/1	ausente	g. simples	descontínua/abrupta	solta	não
Bhs1	54– 73	10YR 4/3	ausente	maciça	descontínua/abrupta	firme e muito firme	fracamente
Bhs2	65– 88	10YR 4/4	ausente	maciça	descontínua/abrupta	firme e friável	não
Bhs3	60–108	7,5YR 3/2–10YR 5/3	ausente	maciça	descontínua/abrupta	firme e muito firme	fracamente
Bhs4	77–177	7,5YR 2,5/2	ausente	maciça	descontínua/abrupta	friável e firme	não
Bhs5	111–200	10YR 2/1/10YR 7/6	ausente	maciça	descontínua/clara	muito friável	não
Bhs6	134–160	10YR 5/4	ausente	maciça	descontínua/abrupta	muito friável	não
Bhs7	150–200	10YR 5/5	ausente	maciça	–	firme e muito firme	fracamente
Cananeia – Pedon P29 – Espodossolo Humilúvico órtico dúrico, A fraco, textura arenosa, imperfeitamente drenado							
A	0–14	7,5YR 3/1	granular	fraca	plana/abrupta	muito friável	não
E	14–(47–60)	7,5YR 7/1	ausente	g. simples	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	extremamente
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
Cananeia – Pedon P30 – Espodossolo Humilúvico órtico dúrico, A fraco, textura arenosa, imperfeitamente drenado							
A	0–10	7,5YR 3/1	granular	fraca	plana/clara	muito friável	não
E	10–18	7,5YR 7/1–7,5YR 7/2	ausente	g. simples	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	extremamente

⁽¹⁾ Horiz.: horizonte. ⁽²⁾ g.: grãos simples. ⁽³⁾ extr.: extremamente.

Na base do remanescente de terraço marinho pleistocênico, os Organossolos e Gleissolos são muito comuns. Alinhado e aproximadamente paralelo à atual linha de costa, esse remanescente, com 8 m de altitude, apresenta, nas áreas de topo, Espodossolos com horizonte *orstein* a partir de 1,6 m de profundidade e horizonte E (P6) com a máxima expressão pedogenética entre aqueles identificados na cronosequência (Figura 2). Espodossolos bem drenados (P5) ocorrem nas bordas desses remanescentes, acompanhando a boa drenagem lateral e vertical.

Na sequência, os depósitos marinhos são interrompidos por uma área de depósitos pelíticos e orgânicos (Figura 2). Os Espodossolos bem drenados e com horizontes *orstein* (P3) aparecem associados aos depósitos marinhos pleistocênicos mais antigos da cronosequência. Na base do terraço são hidromórficos e, à medida que a topografia aumenta, tornam-se mais bem drenados e muito heterogêneos, com grande variabilidade lateral e vertical (P3). Os fluxos hídricos diferenciados e a atividade biológica (raízes e microrganismos decompositores) favorecem a evolução

e as transformações dos Espodossolos, cujos horizontes heterogêneos, muitas vezes, se iniciam e terminam em uma única face do pedon (transição abrupta e descontínua). Os Espodossolos bem drenados (P3) diferenciam-se morfologicamente dos mal drenados, quer pela variabilidade espacial e transição irregular e, ou, descontínua dos horizontes B espódicos, quer pela presença de horizontes Bs na base dos pedons, de tons amarronzados a amarelados. Essa coloração é intensa em alguns horizontes, refletindo o maior teor de Fe e, ou, a natureza diferenciada dos constituintes orgânicos.

O pedon P1 distancia-se 8 m do P2, que, por sua vez, se encontra a 15 m do P3, que está a cerca de 30 m do pedon P4 (Figura 2). Todos estão localizados em terraço marinho pleistocênico, com topo estreito, plano e vertentes ligeiramente convexas. Nesse terraço, a transição dos Espodossolos para os Neossolos Quartzarênicos dá-se na direção do rio Itapanhaú (Figura 2). Nessa direção, do topo para a baixa vertente, ocorre a degradação e o desaparecimento paulatino dos horizontes B espódicos, inclusive do *orstein* (P3). Remanescentes destes horizontes são visíveis nos pedons de Neossolos Quartzarênicos (P1) e de Espodossolos em avançado estádio de degradação (P2), aparecendo na profundidade média de 1,4 m a partir da superfície. Apesar de desconectados, os fragmentos relictuais de *orstein* constituem evidências da preexistência de um horizonte B espódico bem desenvolvido devido ao paralelismo, à disposição lateral e à congruência entre as suas faces.

Na base dos pedons P1 e P2 (Figura 2) também há remanescentes de horizontes cimentados por Fe e matéria orgânica (Plácicos), de coloração avermelhada a amarelada intensa, com espessura média de 3 cm e aproximadamente paralelo à superfície do terreno. Tais remanescentes evidenciam que esses solos foram, no passado, Espodossolos bem desenvolvidos e formados sob condições de hidromorfismo. Nesse setor da sequência, a evolução do relevo e as alterações do nível de base e da hidrologia da vertente aceleram os fluxos laterais e desencadeiam a degradação dos Espodossolos, que evolvem para os Neossolos Quartzarênicos Órticos espódicos ou típicos.

Alterações morfológicas e mecanismos semelhantes foram descritos por Klinge (1965) para Espodossolos da Amazônia. Segundo esse autor, o desaparecimento dos horizontes iluviais foi acentuado nos locais com forte movimento lateral e vertical da água. Esse processo é inicialmente marcado pela presença de transição irregular (*tonguing*) entre os horizontes E e B devido à dissolução do Bh, como se observa no pedon P2, até seu completo desaparecimento, restando somente o horizonte E. Este último, característico do Neossolo Quartzarênico do pedon P1 (Figura 2), difere daqueles amazônicos descritos por Klinge (1965) pela coloração amarelada, indicando a remobilização de Fe e o “tingimento” homogêneo do extinto horizonte E, renomeado de C neste pedon.

A cronosequência da Ilha Comprida está representada por dois principais compartimentos geomorfológicos: (a) o segmento do pedon P17 ao P20, composto por depósitos marinhos mais antigos, reafeiçoados, sobre os quais se desenvolvem os Espodossolos mal drenados, com morfologia dos horizontes B espódicos homogênea, transições planas claras a abruptas; e (b) o segmento entre os pedons P21 e P25 é caracterizado por cordões litorâneos mais jovens e pouco reafeiçoados, em que predominam os Espodossolos bem drenados, com horizontes heterogêneos, transições claras a abruptas e descontínuas.

Com aproximadamente 2,5 km de extensão, a sequência de Ilha Comprida revela algumas similaridades em relação à descrita em Bertioga. Entre elas, pode-se destacar a ocorrência dos alinhamentos de cordões arenosos (Figura 4) e a ausência de horizontes *orstein* nos Espodossolos desses setores. Nessa sequência, em direção à linha de costa, os horizontes B espódicos tornam-se cada vez menos evoluídos até o aparecimento dos Neossolos Quartzarênicos Órticos (P25).

O pedon P17 está representado por um Espodossolo bem desenvolvido, descrito na face exposta do barranco (5 m de altura) voltado para o Mar de Cananeia (Figura 4), cujos depósitos remontam ao Pleistoceno Tardio (Quadro 2). É bem desenvolvido, com transições planas e abruptas entre os horizontes, os quais possuem coloração e consistência bem contrastadas.

Na direção da linha de costa, a aproximadamente 250 m do P17, encontra-se o pedon P18 (Figura 4). Trata-se de um Espodossolo em incipiente estádio de desenvolvimento. A 340 m do anterior, o pedon P19 caracteriza-se pelos baixos cromas dos horizontes espódicos, bem desenvolvidos e formados por lamelas negras e brunadas que se intercalam. Do pedon P18 ao P20, o relevo é praticamente plano e a altura do lençol freático eleva-se até se manifestar a 0,4 m de profundidade neste último.

A partir do P20 a topografia é marcada por uma área úmida, com cerca de 800 m de extensão e lençol freático à superfície durante todo o ano. Na sequência, aparece o segmento em que ocorrem cordões litorâneos (largura média de 6 m e altura de 1 m) e entrecordões bem marcados, que se alternam até as dunas frontais. Nesse segmento, a organização da rede de drenagem, em geral paralela à linha de costa, é comandada pelo alinhamento dos cordões. A hidrologia instalada nos topos dos cordões (bem drenados) e nos setores de entrecordão (mal drenados) controla a pedogênese dos Espodossolos e sua morfologia heterogênea. As transições claras a abruptas, irregulares ou descontínuas, as várias tonalidades de cores amarela, laranja e marrom e as diferentes profundidades e espessuras dos horizontes B espódicos resultam das variações topográficas e da oscilação sazonal do nível do lençol freático nos cordões arenosos holocénicos. Esse fenômeno promove a deposição e distribuição

irregular do material orgânico em subsuperfície, caracterizando a morfologia heterogênea dos horizontes B espódicos dos Espodossolos, como aqueles desenvolvidos no setor mais antigo e reafeiçado da Ilha (P17-P20). Essa heterogeneidade morfológica dos horizontes B espódicos (P24 e P25) é similar à morfologia de degradação observada nos Espodossolos antigos e bem drenados de Bertioga.

Dessa forma, os Espodossolos dos depósitos holocénicos da Ilha Comprida têm transição irregular entre os horizontes E e Bh (P21; Figura 4), com interpenetrações do E no B espódico (*tonguing*). Este último torna-se cada vez menos espesso na direção das dunas frontais e com menores conteúdos de carbono orgânico (P23). Nos setores entrecordões, os horizontes B espódicos são mais evoluídos (P22) que os situados no topo, devido à maior influência e estabilidade do lençol freático. No setor dos depósitos marinhos mais antigos em que o Espodossolo com horizonte *orstein* (P17) tem maior expressão morfológica, mesmo sob drenagem livre, ele não apresenta sinais de degradação. Isso pode ser explicado pelo maior tempo de formação a que foi submetido e, ou, pelas condições hidrológicas pretéritas em que o nível do lençol freático permaneceu estável na zona de formação desse solo. Essas condições favoreceram seu maior desenvolvimento e preservação na paisagem em relação aos solos mais jovens, desenvolvidos sobre os depósitos holocénicos da Formação Ilha Comprida.

O P26 situa-se a cerca de 10 m do P25, no topo de uma duna frontal com cota superior a 8 m. Caracteriza-se pela estratificação cruzada de minerais pesados a partir de 0,6 m da superfície, pela ausência de podzolização e pela coloração amarelada, que se torna cada vez mais pálida em profundidade.

A cronosequência de Cananeia (Figura 3), com extensão aproximada de 1.000 m, está representada pelo terraço marinho de idade pleistocênica (>120.000 anos A.P.) com cotas em torno de 10 m de altitude. O relevo é plano e marcado pela presença comum de Espodossolos com horizontes *orstein* bem preservados (P27, P29, P30 e P31). Estes ocorrem em profundidades que variam entre 0,5 e 1,0 m a partir da superfície e são os de maior consistência entre os solos estudados: são extremamente duros quando secos e extremamente firmes quando úmidos (Quadro 3). O nível do lençol freático, via de regra, encontra-se acima dos 5 m de profundidade. Entretanto, o horizonte *orstein*, pouco permeável, associado à topografia plana condiciona a lenta infiltração e o escoamento das águas pluviais.

Diante do exposto, as observações de campo evidenciam que os solos estudados, sobretudo os Espodossolos, são morfológicamente muito variados. Essa variabilidade está relacionada, predominantemente, aos fatores tempo, relevo e condições hídricas. O tempo determina o intervalo necessário para que os processos atuem na formação dos Espodossolos e na

evolução das formas de relevo dos depósitos marinhos, de forma que os mais antigos e bem drenados, situados nas cotas mais elevadas da paisagem e desenvolvidos nos sedimentos pleistocênicos, mostram-se com acentuada variabilidade lateral e vertical. Já os Espodossolos mais recentes e sujeitos a um hidromorfismo temporário ou permanente são mais homogêneos, com horizontes contínuos lateralmente e paralelos à superfície do terreno.

Eventuais alterações do nível de base local e, ou, da direção dos fluxos hídricos desencadeiam a degradação dos horizontes espódicos, mesmo dos *orstein*, restando os Neossolos Quartzarénicos intermediários para Espodossolos. Esses Neossolos, que evoluem para o típico da classe, possuem coloração amarelada, evidenciando a mobilização e a distribuição homogênea de Fe nos horizontes. A coloração amarela das areias também é observada nos depósitos marinhos holocénicos mais jovens e próximos às praias, indicando que a movimentação do Fe está presente nos estádios finais e iniciais do processo de podzolização.

Como a evolução dos solos nas planícies arenosas quaternárias se dá de maneira cíclica, a pedogênese converge para solos semelhantes nas situações extremas de evolução da paisagem. Esse ciclo, no entanto, parece mais curto nos Espodossolos mais jovens, como pode ser observado naqueles descritos e amostrados nos setores mais elevados dos cordões litorâneos em Ilha Comprida (P21, P23), onde os horizontes espódicos parecem estar sendo degradados mesmo antes de atingirem seu máximo desenvolvimento. Esse fato, associado às datações ao ¹⁴C, à presença e à estabilidade do lençol freático por um longo período de tempo na posição em que se formou o horizonte B espódico, indica que os processos de podzolização do passado foram mais pujantes na formação dos Espodossolos, como sugerem os mais evoluídos e dotados de horizontes *orstein*. Esses horizontes parecem condicionar a permanência dos Espodossolos mais antigos nos terraços marinhos, a exemplo dos observados no setor sul da Ilha Comprida, na Ilha de Cananeia e em Bertioga.

As observações de campo, bem como as datações ao ¹⁴C e por luminescência (LOE e TL), permitem inferir que a ocorrência dos *orstein* está relacionada tanto à idade da MOS e dos depósitos quanto às condições de drenagem atual: se mal drenados, permanecem na paisagem com colorações bruno escura ou negra, de baixo croma (Bhm); se bem drenados, são mais claros, sobretudo em profundidade, com algum conteúdo de Fe (Bsm), o que lhes imprime tons amarelados na base do pedon. Nessas condições, horizontes plácicos também ocorrem e, em geral, são negros, manifestando os maiores teores de C e Al do pedon (Coelho, 2008). Se bem drenados, e sob intensos fluxos hídricos laterais, há completo desaparecimento dos horizontes espódicos, inclusive do *orstein*. Estes evoluem para horizontes do tipo C e de tonalidades

amarelas, típico dos Neossolos Quartzarénicos órticos identificados nos terraços marinhos mais antigos, alguns deles ainda com remanescentes de *orstein*. As situações e variações de drenagem são condicionadas pela variação do nível de base e, ou, relevo local, que, por sua vez, estão relacionados à dinâmica geológica/sedimentar dos ambientes costeiros.

CONCLUSÕES

1. As diferenças em morfologia e no estádio de evolução dos Espodossolos nas duas principais gerações de terraços marinhos (pleistocênicos e holocênicos) da planície costeira são comandadas pela topografia e pela oscilação do nível do lençol freático.

2. Os Espodossolos mais antigos foram encontrados na sequência da Ilha de Cananeia (^{14}C de 9.250 ± 90 anos A.P. e TRM de 18.500 anos A.P.) e em Bertioga (^{14}C de 4.800 ± 80 anos A.P. e TRM de 9.600 anos A.P.), cujos depósitos marinhos apresentam idades (LOE e TL) superiores a 120.000 anos A.P.

3. Os Espodossolos mais recentes foram identificados nas áreas de cordões litorâneos em Ilha Comprida e Bertioga, condizentes com a menor idade dos depósitos (< 6.000 anos).

4. Há estreita relação entre a idade dos depósitos e os atributos morfológicos dos Espodossolos: os mais jovens (P11 e P21) contrastam com os mais antigos (P01, P03, P06, P30 e P31), tanto pela menor espessura e desenvolvimento dos horizontes espódicos, como pela completa ausência de cimentação (horizontes *orstein* e plácico).

5. Alguns milhares de anos são necessários para a cimentação dos horizontes Bh e a formação de *orstein*. Este foi encontrado apenas em terraços marinhos pleistocênicos da Formação Cananeia e, por isso, pode ser considerado como indicador litoestratigráfico edáfico na planície costeira quaternária paulista.

6. Na cronosequência de Bertioga, os Espodossolos mais antigos (P3; ^{14}C de 4.800 ± 80 anos e TRM de 9.600 anos A.P.), ao contrário dos mais jovens e próximos à praia, são bem drenados e apresentam grande variabilidade espacial de seus atributos morfológicos. Horizontes *orstein*, plácicos e espódicos com transição abrupta irregular e, ou, descontínua são comuns e, associados ao relevo e às condições de drenagem locais, indicam que o tempo condicionou processos diferenciados de morfopedogênese, predominantemente relacionados à dinâmica sedimentar e às condições específicas de drenagem nos terraços marinhos da planície costeira.

7. É provável que os Espodossolos mais antigos, dotados de horizontes *orstein*, sejam paleossolos ou, ao menos, poligenéticos, e seu estádio de evolução na paisagem indica que: quando submetidos às boas condições de drenagem, natural ou artificial, estão

visivelmente se degradando; os mais evoluídos e antigos dotados de horizonte *orstein* permanecem na paisagem devido ao hidromorfismo e, ou, ao elevado grau de desenvolvimento que alcançaram durante sua evolução.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelas bolsas de estudo concedidas aos dois primeiros autores; e à FAPESP, por meio do projeto “Solos sob vegetação de restinga no Estado de São Paulo: relações solo-paisagem, pedogênese e alterações com o uso agrícola”, pelo apoio financeiro.

LITERATURA CITADA

- BARCELOS, J.H.; SUGUIO, K. & COIMBRA, A.M. Sedimentação e subambientes deposicionais da Ilha Comprida, São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., Ouro Preto. 1976. Anais. Ouro Preto, Sociedade Brasileira de Geologia, 1976. v.1. p.107-135.
- COELHO, M.R. Caracterização e gênese de Espodossolos da planície costeira do Estado de São Paulo. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2008. 270p. (Tese de Doutorado)
- DE CONINCK, F. Major mechanisms in formation of spodic horizons. *Geoderma*, 24:101-126, 1980.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- KÖPPEN, W. & GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha, Verlag Justus Perthes, 1928. (Wall-map 150 x 200 cm)
- KLINGE, H. Podzols soils in the Amazon Basin. *Eur. J. Soil Sci.*, 16:95-103, 1965.
- LACERDA, L.D., ARAÚJO, D.S.D. & MACIEL, N.C. Restingas brasileiras: Uma bibliografia. Rio de Janeiro, Fundação Universidade José Bonifácio, 1982. 48p.
- MARTIN L.; DOMINGUEZ J.M.L. & BITTENCOURT A.C.S.P. Fluctuating Holocene sea levels in Eastern and Southeastern Brazil: Evidence from multiple fossil and geometric indicators. *J. Coastal Res.*, 19:101-124, 2003.
- MARTIN, L. & SUGUIO, K. Ilha Comprida: Um exemplo de ilha-barreira ligado às flutuações do nível marinho durante o Quaternário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife, 1978. Anais...Recife, 1978. v.2. p.905-912.
- MARTINS, V.M. Relação solo-relevo-substrato geológico na planície costeira sedimentar de Bertioga - SP. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2009. 273p. (Tese de Doutorado)

- MATTHEWS, J.A. Some problems and implications of ^{14}C dates from a podzol buried beneath an end moraine at Haugabreen, southern Norway. *Geografiska Ann.*, 62:185-208, 1980.
- MURRAY A.S. & WINTLE A.G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative dose protocol. *Rad. Meas.*, 32:57-73, 2000.
- NOTT, J.; YOUNG, R.; BRYANT, E. & PRICE, D. Stratigraphy vs. pedogenesis; problems of their correlation within coastal sedimentary facies. *Catena*, 23:199-212, 1994.
- 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.
- PESSENDIA, L.C.R. & CAMARGO, P.B. Datação radioarbônica de amostras de interesse arqueológico e geológico por espectrometria de cintilação líquida de baixa radiação de fundo. *Química Nova*, 14:98-103, 1991.
- PETRI, S. & FÚLFARO, V.J. Nota sobre a geologia e terraços marinhos da Ilha do Cardoso. *Notícias Geomorfol.*, 10:21-31, 1970.
- ROSSI, M. & QUEIROZ NETO, J.P. Os solos como indicadores das relações entre sedimentos continentais e marinhos na planície costeira: Rio Guaratuba (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 25:113-120, 2001.
- SALLUN, A.E.M.; SUGUIO, K.; TATUMI, S.H.; YEE, M.; SANTOS, J. & BARRETO, A.M.F. Datação absoluta de depósitos quaternários brasileiros por luminescência. *R. Bras. Geoc.*, 37:402-413, 2007.
- SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. & ANJOS, L.H.C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.
- 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.
- SCHEEL-YBERT, R.; GOUVEIA, S.E.M.; PESSENDIA, L.C.R.; ARAVENA, R.; COUTINHO, L.M. & BOULET, R. Holocene palaeoenvironmental evolution in the São Paulo State (Brazil), based on anthracology and soil $d^{13}\text{C}$ analysis. *Holocene*, 13:73-81, 2003.
- SCHWARTZ, D. Some podzols on bateke sands and their origins, people's republic of Congo. *Geoderma*, 43:229-247, 1988.
- SOUZA, C.R.G. Considerações sobre a origem de um depósito marinho pleistocênico no Litoral Norte do Estado de São Paulo. B. IG-USP, Série Científica, 23:43-54, 1992.
- SOUZA, C.R.G. Mapeamento de compartimentos fisiográficos de planícies costeiras e baixa encosta e da vegetação associada no Litoral Norte de São Paulo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 2006, Goiânia. Anais...Goiânia, 2006. CD-ROM.
- SOUZA, C.R.G. & LUNA, G.C. Unidades quaternárias e vegetação nativa de planície costeira e baixa encosta da Serra do Mar no Litoral Norte de São Paulo. *R. Inst. Geológico*, 29:1-18, 2008.
- SOUZA, C.R.G.; MOREIRA, M.G. & LOPES, E.A. Coastal plain and low-medium slope sub-biomes: a new approach based on studies developed in Bertioga (SP). *Braz. J. Ecol.*, 13:1-13, 2009.
- SOUZA, C.R.G.; HIRUMA, S.T.; SALLUN, A.E.M.; RIBEIRO, R.R.; AZEVEDO SOBRINHO, J.M. "Restinga": Conceitos e empregos do termo no Brasil e implicações na legislação ambiental. São Paulo, Instituto Geológico, 2008. 104p.
- SUGUIO, K. Dicionário de geologia marinha: Com termos correspondentes em inglês, francês e espanhol. São Paulo, T.A. Queiroz, 1992. 171p. (Biblioteca de ciências naturais, v. 15)
- SUGUIO, K. & MARTIN, L. Mecanismos de gênese das planícies sedimentares quaternárias do litoral do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto, Sociedade Brasileira de Geologia, 1976.v.1. p.295-305.
- 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, 1978a. 55p. (Special Publication, 1)
- SUGUIO, K. & MARTIN, L. Mapa geológico do litoral de São Paulo, Escala 1:100.000. Folha de Bertioga. São Paulo, Secretaria de Obras e Meio Ambiente/Departamento de Águas e Energia Elétrica. 1978b.
- SUGUIO, K. & MARTIN, L. Geologia do Quaternário. In: FALCONI, F.F. & NIGRO JR., A., eds. Solos do litoral de São Paulo. Santos, ABMS/ASSECOB, 1994. 87p.
- SUGUIO, K. & PETRI, S. Stratigraphy of the Iguape-Cananeia lagoonal region sedimentary deposits, São Paulo State, Brazil. Part I: Field observations and grain size analysis. B. Inst. Geoci., 4:1-20, 1973.
- 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. Niterói, CEUFF, 1984. p.15-26.
- SUGUIO, K. & TESSLER, M.G. Depósitos quaternários da planície costeira de Cananeia-Iguape (SP). São Paulo, Universidade de São Paulo, 1992. 33p. (Publicação Especial do Instituto Oceanográfico-USP, 9)
- SUGUIO, K.; TATUMI, S.H. & KOWATA, E.A. The Comprida Island inactive dune ridges and their possible significance for the island evolution during the Holocene, State of São Paulo, Brazil. *An. Acad. Bras. Ci.*, 71:623-630, 1999.
- van BREEMEN, N. & BUURMAN, P. Soil formation. 2.ed. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002. 404p.
- WATANABE, S.; ORTEGA, N.R.S.; FERIA-AYTA, W.E.; COAQUIRA, J.A.H.; CORTEZÃO, S.U. & ARENAS, J.S.A. TL dating of sands from Ilha de Cananeia. *Rad. Measur.*, 27:373-376, 1997.
- WINTLE, A.G. & HUNTLEY, D.J. Thermoluminescence dating of sediments. *Canadian J. Earth Sci.*, 17:348-360, 1980.
- WINTLE A.G. & MURRAY A.S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Rad. Measur.*, 41:369-391, 2006.