

SEÇÃO V - GÊNESE, MORFOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

EVOLUÇÃO QUATERNÁRIA, DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS NOS SOLOS E AMBIENTES DE SEDIMENTAÇÃO EM MANGUEZAIS DO ESTADO DE SÃO PAULO⁽¹⁾

Valdomiro Severino de Souza-Júnior⁽²⁾, Pablo Vidal-Torrado⁽³⁾, Moysés
Gonzalez Tessler⁽⁴⁾, Luiz Carlos Ruiz Pessenda⁽⁵⁾, Tiago Osório
Ferreira⁽⁶⁾, Xose Luiz Otero⁽⁷⁾ & Felipe Macías⁽⁷⁾

RESUMO

A distribuição de partículas em solos ou sedimentos das planícies litorâneas auxilia no entendimento dos processos de sedimentação em estuários, servindo com importante atributo para aplicações em estudos de reconstrução paleoambiental, ciclos geoquímicos e poluição ambiental, como contaminação por metais pesados e derrames de petróleo, que, devido à ação antrópica, são relativamente comuns nesses ambientes. Com o objetivo de caracterizar os ambientes de sedimentação de acordo com a granulometria e com o processo de evolução quaternária ao longo do litoral do Estado de São Paulo, foram estudados solos de 14 manguezais. As análises granulométricas foram realizadas nas camadas de 0–20 e 60–80 cm de profundidade, determinando as frações argila, silte, areia total e cinco frações da areia. Realizaram-se datações ¹⁴C por cintilação líquida, espectrometria de massa acoplada a acelerador de partículas na fração húmica da matéria orgânica e por termoluminescência em grãos de quartzo, para amostras de diferentes camadas dos manguezais amostrados. Os resultados de

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao Programa de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Piracicaba-SP. Recebido para publicação em dezembro de 2005 e aprovada em abril de 2007.

⁽²⁾ Professor adjunto da Unidade Acadêmica de Serra Talhada/UFRPE. Fazenda Saco, S/N. Caixa Postal 063, CEP 56900-000 Serra Talhada (PE). E-mail: vsouzajr@yahoo.com

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11. Bairro Agronomia, CEP 13418-900. Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: pablo@esalq.usp.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Oceanografia Física, Universidade de São Paulo – IO/USP. Av. do Oceanográfico 191, Cidade Universitária, Butantã, CEP 05508-900 São Paulo (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: mgteslle@usp.br

⁽⁵⁾ Professor do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP. Av. Centenário 303, CEP 13416-000 Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: pessenda@cena.usp.br

⁽⁶⁾ Professor adjunto do Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal do Ceará – UFCE. Av. Mister Hull 2977, Campus do Pici, Caixa Postal 12.168, CEP 60021-970 Fortaleza (CE). Email: tiago@ufc.br

⁽⁷⁾ Professor do Departamento de Edafologia e Química Agrícola da Universidade de Santiago de Compostela. Campus Universitario Sur. Faculdade de Biología. Universidade de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela. 15.782. A Coruña – España. E-mails: edjax@usc.es; edfmac@usc.es

granulometria foram tratados de acordo com os parâmetros estatísticos de Folk & Ward. Os solos dos manguezais do Estado de São Paulo têm idade holocênica oscilando entre 410 e 3.700 anos AP, até a profundidade de 80 cm. Em alguns casos este substrato holocênico encontra-se sobreposto à camada arenosa pleistocênica, como foi identificado em SG1 (65–77 cm = 11.000 anos e 90–95 cm = 24.700 anos), PM (72–79 cm = 60.000 anos) e em RF, cuja camada a 40–50 cm apresentou idade de 12.200 anos. Os manguezais apresentam solos de diferentes texturas, variando de arenosa a argilosa. Os solos de constituição arenosa foram identificados na Ilha do Cardoso, na planície do Rio Guaratuba e ao longo do litoral norte, cujos manguezais foram estabelecidos sobre os sedimentos retrabalhados de antigos cordões arenosos e localizados às margens dos rios que drenam essas planícies litorâneas (SG1, SG2, GUA e RE). Esses solos ocorrem também nas proximidades da desembocadura dos rios, onde há maior influência da ação de ondas (RF). Os manguezais cujo substrato são constituídos, predominantemente, de partículas finas (silte e argila) estão localizados nos compartimentos mais protegidos do litoral, como o Canal do Cananéia (PM e BAG), Mar Pequeno (IGUA) e dentro do estuário de Santos, na Baixada Santista (ITA, IRI, COS e CRU). O período de maré estacionada, que decorre da alternância dos ciclos de enchente e vazante desta, favoreceria a sedimentação de partículas da fração silte, explicando a ocorrência de alto teor de silte na superfície dos solos de manguezais de PM e BAG e ao longo das camadas estudadas de IGUA e ITA.

Termos de indexação: solos de manguezal, granulometria, termoluminescência, datação ¹⁴C, evolução costeira.

SUMMARY: *QUATERNARY EVOLUTION, PARTICLE DISTRIBUTION IN SOILS AND SEDIMENTARY ENVIRONMENT IN MANGROVES IN SÃO PAULO STATE, BRAZIL*

Particle distribution in soil or sediments of coastal plains contributes to the understanding of the sedimentation processes in estuaries. It is an important attribute for applications in studies of palaeoenvironmental reconstruction, geochemical cycles and environmental pollution such as heavy metal and oil spill contamination, which are relatively common in these sites due to human impact. With the objective of characterizing the sedimentary environments according to the particle size and the process of quaternary evolution, 14 mangroves along the São Paulo State coast were studied. Particle size analyses were carried out with samples of the layers 0–20 and 60–80 cm. The clay, silt, total sand size and five sand fractions were determined. Radiocarbon dating was carried out by liquid scintillation counting and accelerator mass spectrometry in humin fraction of soil organic matter and by thermoluminescence of quartz grains, of samples of different layers. The results of particle size were treated according to the Folk and Ward statistical parameters. The mangrove soils of São Paulo State are holocenic with ages from 410 to 3,700 yr B.P. down to 80 cm depth. In some cases, this holocenic substratum overlies a pleistocenic sandy layer, as identified in SG1 (65–77 cm = 11,000 years and 90–95 cm = 24,700 yr), PM. (72–79 cm = 60,000 yr), and in RF where the 40–50 cm layer was estimated at 12,200 years. The mangrove soil textures varied from sandy to clayey. Sandy soils were identified on Cardoso Island, on the Guaratuba river plain and along the northern coast. These mangroves had developed on restructured sediments of old sand ridges and along the banks of the rivers that drain the coastal plains (SG1, SG2, GUA, RE). These soils also occur close to the river mouths where waves have a strong influence (RF). The mangrove soils that consist mainly of fine particles (silt and clay) are located in the protected parts of the coastal line such as the Cananéia Channel (PM, BAG), Mar Pequeno (IGUA) and in the Santos estuary of the Baixada Santista (ITA, IRI, COS, CRU). Periods of steady tidal that are caused by the alternating high and low tide cycles would allow silt settling, explaining the higher silt content in PM and BAG and across the studied layers in IGUA and ITA.

Index terms: mangrove soils, particle size, thermoluminescence, radiocarbon dating, coastal evolution.

INTRODUÇÃO

As oscilações no nível relativo médio do mar (nrmm) têm desempenhado importante papel na evolução das áreas costeiras (Woodroffe, 1992; Villwock, 2005). Em nível global, o período Quaternário têm sido caracterizado pela existência de várias oscilações no nrmm, as quais têm deixado testemunhos em várias regiões. Assim, em parte do litoral brasileiro, com destaque para o litoral do Estado de São Paulo, foi possível evidenciar pelo menos dois eventos de variações relativas do nível do mar ao longo do período Quaternário, denominadas de: Transgressão Cananéia e Transgressão Santos, ocorridas em seus picos de oscilação positiva máxima, respectivamente, há cerca de 120.000 e 5.100 anos antes do presente (AP) (Suguio & Martin, 1978).

No litoral paulista, a transgressão de idade pleistocênica (Transgressão Cananéia), ao atingir seu máximo transgressivo (aproximadamente +8,0 m), deslocou o nível do mar para o sopé da Serra do Mar, preenchendo as atuais planícies litorâneas com sedimentos marinhos. Esse evento corresponde à Penúltima Transgressão entre Bahia e Pernambuco (Bittencourt et al., 1979) e a sistemas de Ilhas-barreira/laguna III no Rio Grande do Sul (Villwock et al., 1986) e é correlacionado na Europa com o interglacial Eemiano (Shackleton et al., 2003) e Sangamoniano na América do Norte (Chappell, 1983).

Na evolução do processo transgressivo-regressivo pleistocênico ocorreu o rebaixamento do nrmm, que ao longo do último máximo glacial (~17.000 anos AP) deslocou o nível de base até profundidades próximas das atuais batimétricas de -110 m (Suguio & Martin, 1978).

Na seqüência é apresentado o processo evolutivo do litoral do Estado de São Paulo durante o Quaternário, de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Suguio & Martin (1978) e Suguio & Tessler (1992).

No decorrer do período regressivo, após o último máximo glacial, foram formadas as planícies de cordões litorâneos de constituição arenosa, assentadas sobre os depósitos arenosos e argilo-arenosos transgressivos. Ainda no decorrer do evento regressivo, além da construção das planícies de cordões regressivos, a drenagem continental, no seu processo de evolução sobre o espaço gerado pelo recuo marinho, ocasionou aprofundamento dos canais fluviais a partir da erosão dos sedimentos da planície arenosa transgressiva, formando, dessa maneira, extensos canais de drenagem, baías e lagunas.

Após o último máximo glacial, por ocasião da transgressão holocênica (Transgressão Santos), o mar transgrediu novamente em direção ao continente, penetrando prioritariamente pelas partes mais deprimidas, ou seja, por meio dos canais de drenagem formados durante a regressão mencionada anteriormente.

Esse avanço marinho promoveu a deposição de sedimentos arenosos e areno-argilosos nos canais,

baías e lagunas, por meio do retrabalhamento dos sedimentos preexistentes e dos sedimentos carregados pela drenagem afogada pelo avanço do nível marinho. Além disso, proporcionou a erosão de cordões arenosos pleistocênicos, disponibilizando os sedimentos erodidos para a construção das planícies costeiras holocênicas regressivas.

Após a Transgressão Santos, o nrmm passou por um processo de descensão contínua até o nível atual. Contudo, durante esse período ocorreram ao menos duas rápidas oscilações do nível marinho, ocasionando, há cerca de 3.800 anos AP, uma oscilação positiva entre 3,0 e 4,0 m acima do nível atual e entre 0,5 e 2,0 m há cerca de 2.000 anos AP (Suguio & Martin, 1978).

No evento regressivo holocênico, iniciado após o pico de oscilação positiva da Transgressão Santos, além da formação dos atuais cordões arenosos litorâneos holocênicos, foram também redefinidas as configurações espaciais das atuais baías e lagunas localizadas ao longo do litoral do Estado de São Paulo.

Nesse contexto, o ecossistema de manguezal, ao se estabelecer na interface do ambiente marinho e continental (Cooper, 2001), apresenta sua formação relacionada com as flutuações relativas do nível do mar quaternário, pelo preenchimento dos vales dos rios, margens de lagunas e baías com sedimentos tanto de origem continental como marinha (Wolanski & Chappell, 1996).

A ocorrência desse ecossistema está relacionada à presença de terrenos baixos e planos das regiões estuarinas às margens de lagunas ou ao longo de canais naturais e dos cursos inferiores de rios, até onde ocorre o fluxo das marés (IPT, 1988). Segundo Cintrón & Schaeffer-Novelli (1983) e Hillier (1995), esses locais são propícios a uma intensa deposição de sedimentos de textura fina, cujo substrato formado apresenta consistência pastosa, denominado genericamente de lama ou sedimento lodoso.

No entanto, de acordo com Clough (1992), podem ocorrer solos arenosos, como os encontrados ao longo do litoral do Estado de São Paulo por Rossi & Mattos (2002), que, ao caracterizarem os solos de 18 manguezais, constataram o predomínio da textura areia e areia franca na camada superficial de todos os locais estudados.

O entendimento da distribuição de partículas em solos de planícies estuarinas auxilia na compreensão dos processos que dominam a sedimentação dessas partículas dentro do estuário (Wang & Le, 1997; Xia et al., 2004) e em estudos de reconstrução paleoambiental de região costeira (Lario et al., 2002). Além disso, é um atributo utilizado em estudos de impactos antrópicos, como contaminação por metais pesados e derrames de petróleo, que são relativamente comuns nesses ambientes (Lee & Page, 1997; Birch & Taylor, 1999; Millward et al., 1999; Tam & Wong, 2000), bem como em estudos geoquímicos de metais (Clark et al., 2000; Turner & Millward, 2002; Vreca & Dolenc, 2005).

De acordo com os estudos relacionados com a evolução da linha de costa paulista durante o Quaternário, tem-se por hipótese que os atuais manguezais foram estabelecidos após o máximo da Transgressão Santos e que a compartimentação geomorfológica ao longo do litoral é condicionante para a sedimentação nas áreas de mangues. Dessa maneira, o presente estudo teve como objetivo caracterizar os ambientes de sedimentação dos solos dos manguezais do Estado de São Paulo, de acordo com sua granulometria e o processo de evolução do litoral ao longo do Quaternário.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização geográfica da área de estudo

Os manguezais estudados estão localizados nos três macrocompartimentos do litoral do Estado de São Paulo, genericamente denominados de Litoral Sul, Baixada Santista e Litoral Norte, apresentados na figura 1. As coordenadas geográficas dos pontos coletados encontram-se no quadro 1.

No litoral sul, os pontos amostrados estão localizados no Sistema Cananéia-Iguape, da seguinte forma:

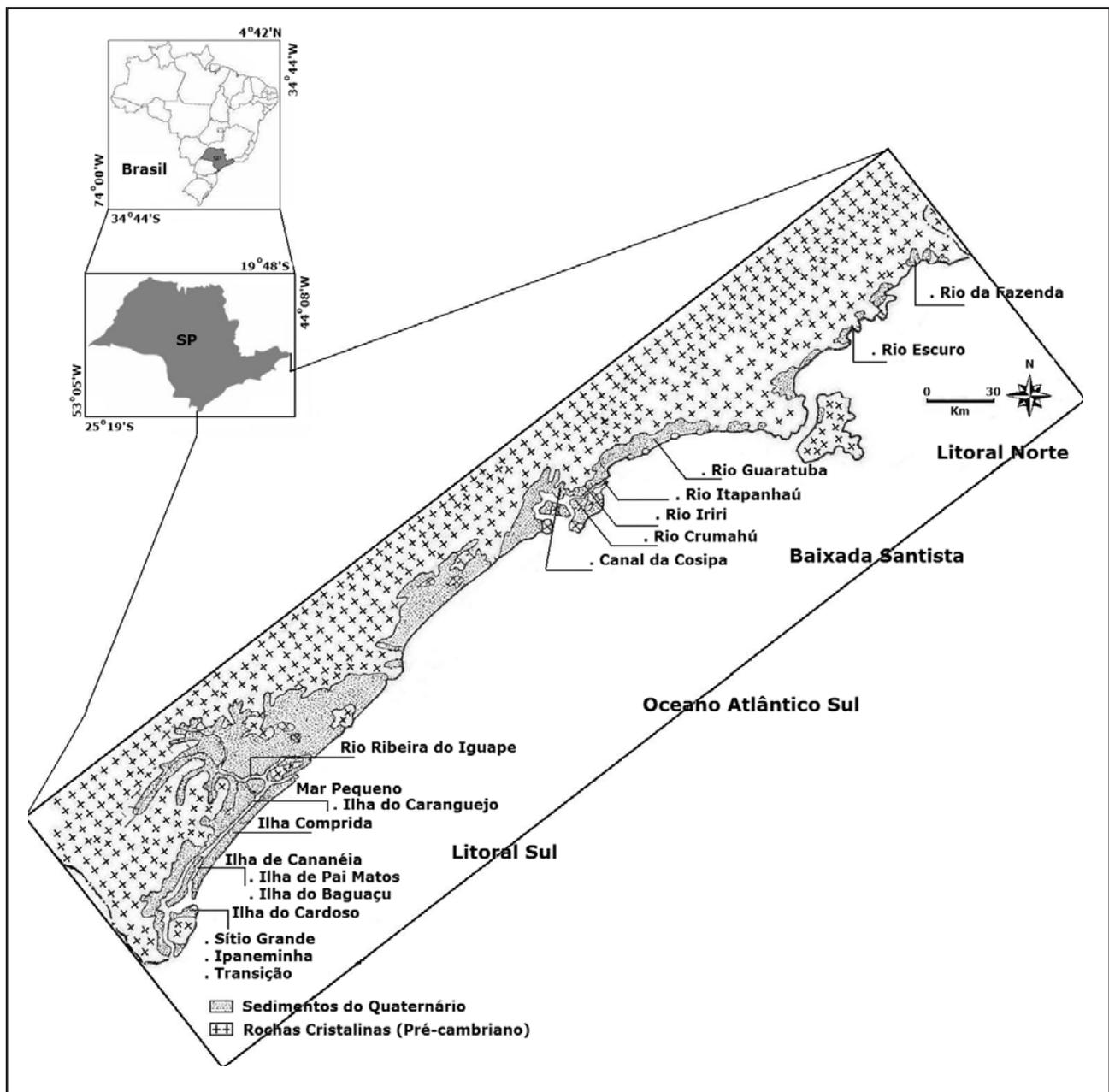


Figura 1. Geologia e compartimentação geomorfológica das planícies costeiras do Estado de São Paulo. Fonte: Modificado de Suguio & Tessler (1992), com a localização dos pontos amostrados.

Ilha do Cardoso: Manguezal do Rio Sítio Grande— neste foram coletados dois pontos, um no baixo curso e outro no médio curso do rio (SG1 e SG2); Manguezal do Rio Ipaneminha (IPA) e da Transição Restinga-Mangue do Rio Ipaneminha (TRA); e Canal de Cananéia: Manguezal da Ilha de Pai Matos (PM) e Manguezal da Ilha de Bagaçu (BAG). Nas proximidades do município de Iguape, no canal do Mar Pequeno, foi amostrado o manguezal da Ilha do Caranguejo (IGUA), localizado imediatamente após a desembocadura do Valo Grande, que se trata de um canal construído artificialmente para ligar o Rio Ribeira do Iguape ao Mar Pequeno, obra concluída em 1855 (Besnard, 1950).

Na Baixada Santista foram efetuadas as coletas no manguezal do Rio Crumahú, no município do Guarujá (CRU), nos manguezais dos Rios Itapanhaú (ITA), Iriri (IRI) e Guaratuba (GUA), no município de Bertioga, e no manguezal do Canal da Cosipa, em Cubatão (COS).

No setor norte do litoral, foram amostrados os manguezais do Rio Escuro (RE) e do Rio da Fazenda (RF), localizados respectivamente ao sul e ao norte do município de Ubatuba.

Geomorfologia e geologia da região

A região litorânea do Estado de São Paulo pode ser genericamente subdividida em três partes bastante distintas: Litoral Sul, onde se desenvolvem grandes planícies essencialmente formadas por depósitos marinhos e flúvio-lagunares; Baixada Santista, deslocando-se ao norte, com amplas planícies

preenchidas com sedimentos quaternários; e Litoral Norte do Estado, onde a planície é estreita e o mar está em contato com os granitos e gnaisses da Serra do Mar em quase toda a sua extensão (Suguió & Martin, 1978) (Figura 1).

Clima

O clima que caracteriza grande parte do litoral, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical, com a temperatura média do mês mais quente superior a 18 °C; o total de chuvas do mês mais seco é de 60 mm e a precipitação anual varia entre 1.600 e 2.000 mm. Não apresenta estação seca invernal, apenas diminuição de pluviosidade, enquanto os verões são excessivamente úmidos (Rossi, 1999). As características climáticas ao longo do litoral paulista são bem homogêneas, com exceção da região de Cananéia (litoral sul), onde a temperatura média de inverno é ligeiramente mais baixa do que no litoral norte e Baixada Santista (Lamparelli, 1998).

Procedimento de campo

As amostragens foram realizadas nos manguezais citados no quadro 1, retirando-se as amostras de acordo com os objetivos analíticos a seguir.

Determinação da granulometria: As coletas foram realizadas com o amostrador para solos inundados, retirando amostras nas profundidades de 0–20 (camada superficial) e 60–80 cm (camada subsuperficial), que, em seguida, foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e encaminhadas para o laboratório.

Quadro 1. Identificação e coordenadas geográficas dos manguezais amostrados ao longo do litoral paulista

Manguezal	Código	Latitude	Longitude
Ilha do Cardoso (Litoral Sul)			
Rio Sítio Grande (1)	SG1	25° 04' 48" S	47° 56' 53" W
Rio Sítio Grande (2)	SG2	25° 04' 57" S	47° 56' 54" W
Transição mangue-restinga	TRA	25° 04' 37" S	47° 56' 16" W
Rio Ipaneminha	IPA	25° 04' 44" S	47° 56' 13" W
Canal de Cananéia e Mar Pequeno (Litoral Sul)			
Ilha Pai Matos	PM	24° 59' 48" S	47° 54' 19" W
Ilha Bagaçu	BAG	24° 58' 39" S	47° 53' 50" W
Ilha Caranguejo	IGUA	24° 43' 28" S	47° 34' 00" W
Baixada Santista			
Rio Crumahú	CRU	23° 56' 07" S	46° 14' 36" W
Rio Iriri	IRI	23° 53' 36" S	46° 12' 16" W
Canal da Cosipa	COS	23° 52' 44" S	46° 22' 21" W
Rio Itapanhaú	ITA	23° 51' 17" S	46° 09' 16" W
Rio Guaratuba	GUA	23° 44' 44" S	45° 53' 43" W
Litoral Norte			
Rio Escuro	RE	23° 29' 20" S	45° 09' 55" W
Rio da Fazenda	RF	23° 21' 34" S	44° 50' 48" W

Datação por ^{14}C : As coletas para este fim foram realizadas com um amostrador para solos inundados “Eijkelkamp”, retirando as amostras nas áreas centrais dos manguezais, denominadas “núcleo de mangue”, as quais foram encaminhadas para o laboratório nos próprios tubos de coleta.

Datação por termoluminescência (TL): A finalidade dessa coleta foi amostrar níveis determinados da seqüência sedimentar para obtenção de idades dos diferentes níveis dos depósitos arenosos. A esse procedimento foi dispensada uma atenção especial, a fim de evitar que a luminosidade incidisse na amostra e, com isso, comprometesse a exatidão do dado de datação. Portanto, essas amostragens foram realizadas com o auxílio de tubos de PVC preto de 5 polegadas de diâmetro e 1,5 m de comprimento, adaptados ao amostrador “Eijkelkamp”. Em seguida, os tubos foram encaminhados ao laboratório, onde foi realizado o seccionamento das amostras, as quais foram posteriormente enviadas para análise.

Procedimentos de laboratório

A determinação granulométrica foi realizada por meio do método da pipeta, após a eliminação da matéria orgânica com H_2O_2 a 10 % e lavagem dos sais solúveis, como preconizado por Gee & Bauder (1986).

Os diferentes diâmetros de partículas foram definidos de acordo com a escala de Atterberg modificada e estabelecidos da seguinte forma: areia total (2–0,05 mm), silte (0,05–0,002 mm), argila (< 0,002 mm), areia muito grossa (2–1 mm), areia grossa (1–0,5 mm), areia média (0,5–0,25 mm), areia fina (0,25–0,1 mm) e areia muito fina (0,1–0,05 mm) (Soil Survey Division Staff, 1993). A partir dos dados de distribuição granulométrica, os solos foram enquadrados em classes texturais de forma simplificada (Arenosa, Franca e Argilosa), de acordo com Soil Survey Manual (Soil Survey Division Staff, 1993), da seguinte forma: Textura Arenosa: areia e areia franca; Textura Franca: franco-arenosa, franca, franco-siltosa, silte, franco-argilosa, franco-argilo-arenosa e franco-argilo-siltosa; e Textura Argilosa: argila arenosa, argila siltosa e argila.

Os resultados da distribuição granulométrica (silte, argila e frações da areia isoladas) foram tratados estatisticamente pelo programa PHI (Programa de microcomputador para análise estatística da granulometria), desenvolvido por Jong van Lier & Vidal-Torrado (1992), o qual utiliza os parâmetros estatísticos de Folk & Ward (1957). No programa PHI, os dados de entrada correspondem às porcentagens absolutas de cada fração granulométrica por amostra e seu respectivo diâmetro na escala phi [$\phi = -\log_2 D$ (mm)] descrita por Krumbein (1934). Os diâmetros em mm foram transformados para escala phi, estabelecidos da seguinte forma: $\phi -1$ a $0 = 2$ a 1 mm; $\phi 0$ a $1 = 1$ a $0,5$ mm; $\phi 1$ a $2 = 0,5$ a $0,25$ mm; $\phi 2$ a $3,32 = 0,25$ a $0,1$ mm; $\phi 3,32$ a $4,32 = 0,1$ a

$0,05$ mm; $\phi 4,32$ a $8,97 = 0,05$ a $0,002$; e $\phi > 8,97 = < 0,002$ mm.

Foram elaboradas as curvas de frequência acumulada da distribuição de partículas das frações totais do solo e também da fração areia.

Durante a separação das amostras em camadas, os tubos destinados à datação por TL foram seccionados longitudinalmente, retirando-se seções arenosas de acordo com a profundidade escolhida para estudo. Esta atividade foi desenvolvida em sala iluminada com luz vermelha, colocando as amostras em sacos plásticos pretos enrolados em papel-alumínio, identificados e posteriormente encaminhados para procedimento analítico no Laboratório de Datação e Vidros da Faculdade Tecnológica de São Paulo (Fatec). As amostras para datação por ^{14}C foram retiradas dos tubos por meio de pressão com êmbolo, realizando em seguida a separação das camadas e acondicionando-as em sacos plásticos.

Os procedimentos analíticos para datação por ^{14}C foram realizados no Laboratório de ^{14}C do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP). As datações foram determinadas a partir da fração húmica da matéria orgânica do solo, utilizando-se o método da síntese do benzeno e detecção de ^{14}C por espectrometria de cintilação líquida, de acordo com o método preconizado por Pessenda & Camargo (1991). Houve amostras que não produziram quantidade suficiente de gás CO_2 para permitir a datação por cintilação líquida. Para esses casos, o referido gás de cada amostra foi encaminhado para o *Isotracer Laboratory*, na Universidade de Toronto (Canadá), sendo analisadas por meio da técnica de espectrometria de massa acoplada a acelerador de partículas (AMS) (Stuiver et al., 1998).

Todas as idades radiocarbônicas foram normalizadas para $\delta^{13}\text{C}$ de -25‰ e expressas em anos AP (antes do presente), sendo o presente o ano de 1950 (Stuiver et al., 1998).

A datação por termoluminescência foi realizada de acordo com o procedimento analítico citado por Tatumi et al. (2003); a idade absoluta foi obtida por termoluminescência dos grãos de quartzo.

RESULTADOS

A figura 2(a, b) apresenta os diagramas de classe textural dos solos dos manguezais localizados no litoral sul. Os pontos localizados na Ilha do Cardoso apresentaram, na camada superficial (0–20 cm), significativa presença de areia em sua composição granulométrica, conferindo-lhes textura arenosa, com exceção do manguezal do Rio Ipaneminha (IPA), que possui textura franca. Na camada subsuperficial (60–80 cm) verificou-se significativo incremento na quantidade de silte e argila. Nesta profundidade, os solos em SG1 e IPA foram classificados como textura franca, enquanto aqueles em TRA foram classificados

como de textura argilosa. A manutenção da textura arenosa em profundidade ocorreu apenas em SG2 (Quadro 2).

A figura 3(a, b) apresenta as curvas de frequência acumulada entre as frações totais dos solos analisados. O manguezal SG2 foi utilizado para representar o caráter arenoso dos manguezais da Ilha do Cardoso, uma vez que a figura 3 e o quadro 2 demonstram a predominância da fração grossa nesse ambiente.

Ainda no trecho sul do litoral, os manguezais estabelecidos no Canal de Cananéia e no Mar Pequeno apresentaram em superfície maiores quantidades de silte e argila, em relação aos encontrados na Ilha do Cardoso. Assim, como mostra a figura 2a, a textura franca foi obtida em PM e IGUA, com destaque para os teores relativamente altos de silte nesses solos (Quadro 2), atingindo 51 % em IGUA e 30 % em PM.

O manguezal BAG tem mais partículas finas e foi classificado como de textura argilosa. Na figura 3a estão representados os manguezais PM e IGUA. Apesar de estarem localizados no mesmo setor do litoral, as suas curvas de frequência acumulada são bem distintas da obtida em SG2, evidenciando nos primeiros o maior acúmulo de partículas finas.

Os dados obtidos para a camada subsuperficial mostram uma distinção entre os manguezais localizados no Canal de Cananéia (BAG e PM) e o encontrado no Mar Pequeno (IGUA). No primeiro grupo foram encontrados teores de areia superiores a 80 % (Quadro 2), ou seja, textura arenosa (Figura 2b). Por outro lado, no manguezal do Mar Pequeno praticamente não houve variação na distribuição granulométrica entres as camadas, conferindo-lhe, também, textura franca em subsuperfície.

Quadro 2. Distribuição de partículas dos solos dos manguezais estudados ao longo do litoral paulista

Manguezal	Argila	Silte	Areia total	AMG	AG	AM	AF	AMF
	%			% ⁽¹⁾				
Ilha do Cardoso (Litoral Sul)								
SG1 0-20	8	6	86	0	7	9	77	7
SG1 60-80	23	21	56	0	7	10	64	19
SG2 0-20	4	6	90	0	0	1	63	36
SG2 60-80	5	8	87	0	0	1	82	17
TRA 0-20	9	6	85	0	0	3	94	3
TRA 60-80	41	24	35	0	0	2	91	7
IPA 0-20	25	16	59	0	0	1	91	8
IPA 60-80	22	13	65	0	0	0	91	9
Canal de Cananéia e Mar Pequeno (Litoral Sul)								
PM 0-20	38	30	32	0	1	1	81	17
PM 60-80	10	6	84	0	0	0	89	11
BAG 0-20	42	45	13	0	0	0	61	39
BAG 60-80	9	5	86	0	0	0	95	5
IGUA 0-20	31	51	18	0	0	0	28	72
IGUA 60-80	33	54	13	0	0	0	30	69
Baixada Santista								
CRU 0-20	37	21	42	0	19	36	33	12
CRU 60-80	72	23	5	0	0	0	60	40
COS 0-20	57	34	9	X	X	X	X	X
IRI 0-20	30	31	39	X	X	X	X	X
ITA 0-20	32	56	12	0	0	6	37	56
ITA 60-80	31	45	24	0	1	1	41	57
GUA 0-20	4	8	88	0	0	0	85	15
GUA 60-80	12	14	74	0	0	0	83	17
Litoral Norte								
RE 0-20	3	4	93	0	0	0	88	11
RE 60-80	7	8	85	0	0	0	77	23
RF 0-20	3	3	94	8	8	5	58	21
RF 60-80	1	2	97	25	55	10	8	2

⁽¹⁾ Percentagem em relação ao total de areia. AMG: areia muito grossa; AG: areia grossa; AM: areia média; AF: areia fina; AMF: areia muito fina.

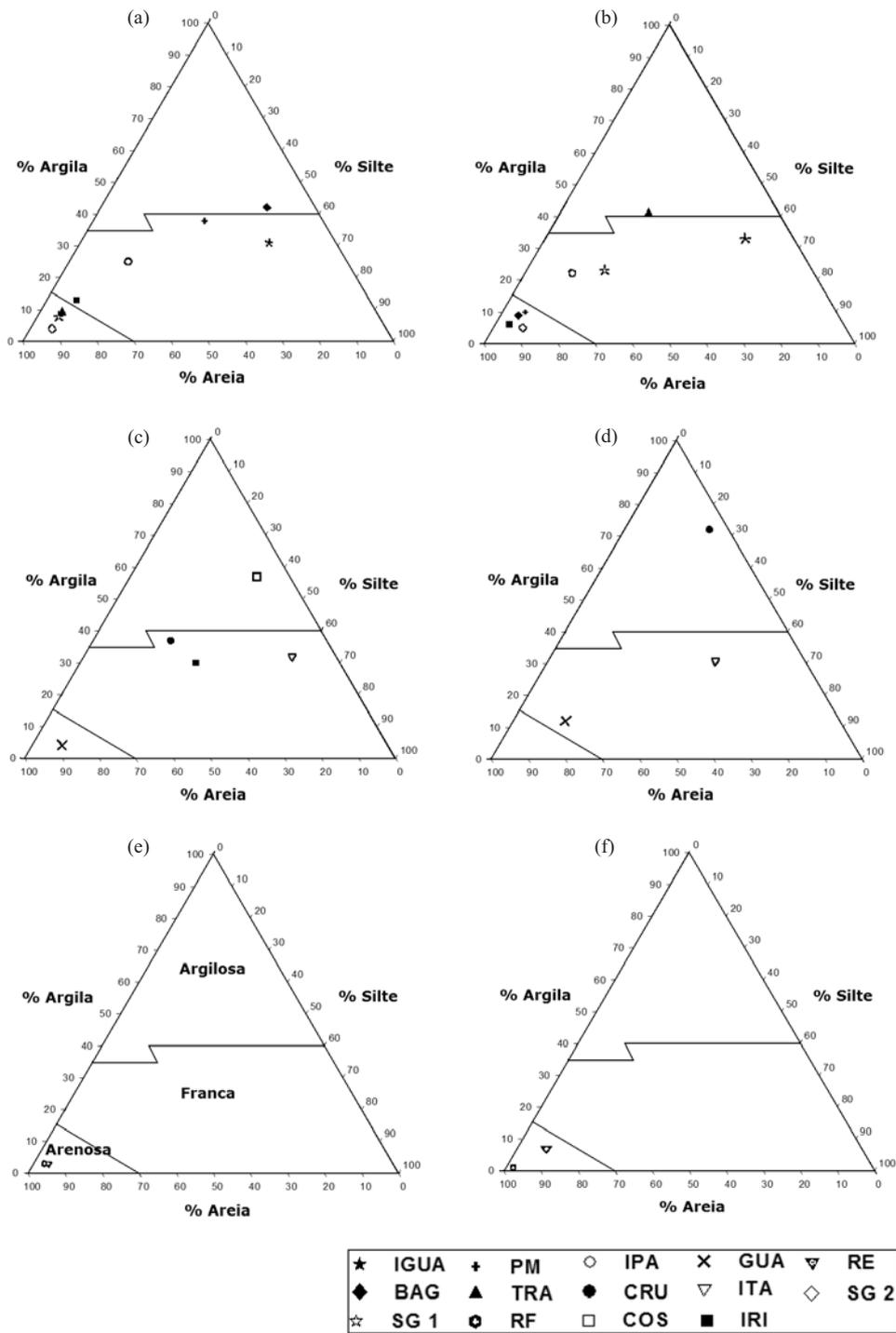


Figura 2. Classes texturais dos solos de manguezais estudados do litoral paulista: (a) Litoral Sul (0–20 cm); (b) Litoral Sul (60–80 cm); (c) Baixada Santista (0–20 cm); (d) Baixada Santista (60–80 cm); (e) Litoral Norte (0–20 cm); e (f) Litoral Norte (60–80 cm).

Na camada superficial dos manguezais amostrados na Baixada Santista, como apresentados na figura 2c, foram encontradas as três classes texturais. Contudo, os dados apresentados no quadro 2 mostram o predomínio das frações finas (silte e argila) nos manguezais IRI, ITA, CRU e COS. Os dois primeiros

foram classificados na classe textural franca, e os dois últimos, na classe argilosa. A distribuição granulométrica encontrada em GUA difere completamente das demais, com predomínio absoluto da fração areia (88 %) na superfície, sendo este um típico manguezal de substrato arenoso.

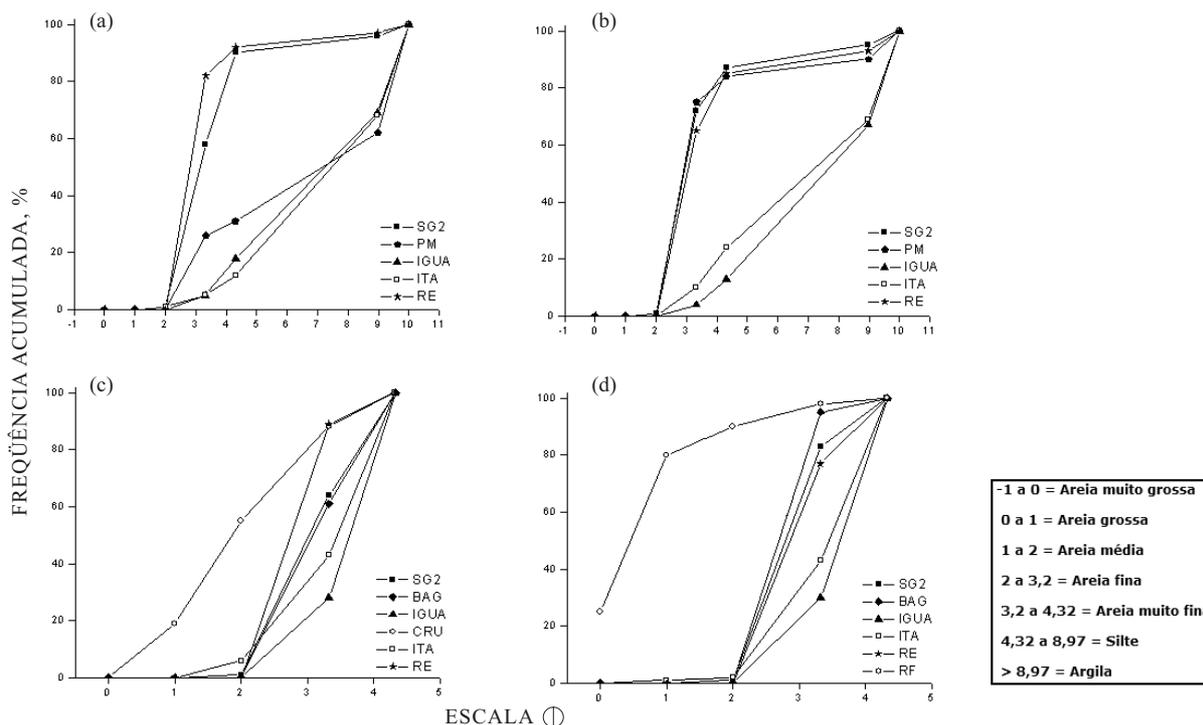


Figura 3. Curvas de freqüência acumulada das frações totais e frações da areia dos solos de manguezais ao longo do litoral paulista. (a) frações totais (0–20 cm); (b) frações totais (60–80 cm); (c) frações da areia (0–20 cm); e (d) frações da areia (60–80 cm).

As amostras de subsuperfície coletadas em ITA e CRU permanecem na mesma classe textural daquela obtida na camada superior, porém evidencia-se significativo incremento no teor de argila em CRU, atingindo 72 %. Em GUA ocorre pequeno incremento na quantidade de partículas finas (Quadro 2), o suficiente para modificar a classe textural para franca.

De forma semelhante ao que ocorre nos manguezais do Canal de Cananéia e Mar Pequeno, há muito silte nos pontos amostrados na Baixada Santista. Os resultados do quadro 2 mostram valores de 34, 31 e 56 % em COS, IRI e ITA, respectivamente, para a camada superficial, e 45 % em ITA na subsuperfície.

O comportamento dos manguezais localizados na Baixada Santista, mais precisamente no estuário de Santos, é semelhante ao encontrado em IGUA, como pode ser observado na figura 3(a, b). Nela fica evidenciado o maior acúmulo de partículas finas nesses locais estudados, em ambas as profundidades analisadas.

Nos manguezais do litoral norte, os solos de RE e RF são arenosos nas duas camadas analisadas [Figura 2(e, f)]. A curva de freqüência acumulada é representada por RE e comporta-se semelhantemente à encontrada em SG2 [Figura 3(a, b)].

O predomínio das frações mais finas da areia em praticamente todos os solos dos manguezais estudados está graficamente demonstrado por meio de curvas de freqüência acumulada na figura 3(c, d) e representados pelos manguezais SG2, BAG, IGUA,

ITA, RE e RF. O comportamento desse atributo analisado por meio dessas curvas diferiu apenas na camada subsuperficial de RF, em que a areia total é predominantemente constituída das frações areia grossa e muito grossa (Figura 3d).

A análise estatística da distribuição das cinco frações de areia, realizada nos resultados de análises de solos de sete manguezais, representando os distintos setores do litoral paulista, é apresentada no quadro 3. Foram determinados os valores de diâmetro médio das partículas em escala ϕ e o desvio-padrão, este último utilizado para classificar as partículas quanto ao grau de seleção. Os resultados obtidos mostram que o diâmetro médio (M_z) variou entre 0,533 e 3,464 ϕ , estando a grande maioria dos valores entre 2,368 e 3,464 ϕ . Os valores de desvio-padrão (σ) variaram entre 0,404 e 1,237, ocorrendo, dessa maneira, predomínio de areias bem selecionadas, com algumas ocorrências de grãos moderadamente selecionados e pobremente selecionados. No Litoral Sul, o grau de seleção é elevado e, nos demais, ele varia (Quadro 3).

Os resultados obtidos a partir das datações realizadas nos substratos dos manguezais distribuídos ao longo da costa do Estado de São Paulo encontram-se no quadro 4. Na Ilha do Cardoso foi datado o manguezal do Sítio Grande 1, o qual apresentou na camada superficial (5–15 cm) a idade de 1.900 anos $AP \pm 130$, e nas profundidades de 65–77 e 90–95 cm foram obtidas, respectivamente, as idades de 11.000 anos ± 1.300 e de 24.700 anos ± 2.800 .

Quadro 3. Valores de medidas estatísticas de acordo com os parâmetros de Folk & Wald (1957), realizadas nas partículas da fração areia em manguezais estudados ao longo do litoral do Estado de São Paulo

Manguezal	Mz	σI	Grau de seleção	M	Classe da areia
				mm	
Litoral Sul					
SG2 0–20	2,532	0,677	bem selecionado	0,17	AF
SG2 60–80	2,670	0,832	bem selecionado	0,16	AF
PM 0–20	2,905	0,470	bem selecionado	0,13	AF
PM 60–80	2,865	0,404	bem selecionado	0,14	AF
IGUA 0–20	3,464	0,451	bem selecionado	0,09	AMF
IGUA 60–80	3,444	0,459	bem selecionado	0,09	AMF
Baixada Santista					
CRU 0–20	1,962	1,037	pobrememente selecionado	0,26	AM
CRU 60–80	3,183	0,498	bem selecionado	0,11	AF
ITA 0–20	3,238	0,641	moderadamente selecionado	0,11	AF
ITA 60–80	3,307	0,528	moderadamente selecionado	0,10	AF
Litoral Norte					
RE 0–20	2,865	0,404	bem selecionado	0,14	AF
RE 60–80	3,019	0,469	bem selecionado	0,12	AF
RF 0–20	2,368	1,237	pobrememente selecionado	0,19	AF
RF 60–80	0,533	0,872	moderadamente selecionado	0,69	AG

Mz = diâmetro médio na escala ϕ (Mz); σI = desvio-padrão gráfico inclusivo; M = diâmetro médio; AG = areia grossa; AM = areia média; AF = areia fina; AMF = areia muito fina.

Quadro 4. Idades (\pm desvio-padrão) dos substratos dos manguezais estudados, determinadas por ^{14}C na fração humina da matéria orgânica e por TL de grão de quartzo

Mangue	Profundidade	Idade	Método	Época
cm				
Ilha do Cardoso (Litoral Sul)				
Sítio Grande 1 (SG1)	5–15	1.900 anos AP \pm 130	^{14}C AMS ⁽¹⁾	Holocênica
Sítio Grande 1 (SG1)	65–77	11.000 anos \pm 1.300	TL ⁽³⁾	Pleistocênica
Sítio Grande 1 (SG1)	90–95	24.700 anos \pm 2.800	TL	Pleistocênica
Canal de Cananéia e Mar Pequeno (Litoral Sul)				
Pai Matos (PM)	5–15	450 anos AP \pm 95	^{14}C (CL) ⁽²⁾	Holocênica
Pai Matos (PM)	40–50	Moderna	^{14}C AMS	Holocênica
Pai Matos (PM)	72–79	60.000 anos \pm 6.800	TL	Pleistocênica
Caranguejo (IGUA)	5–15	410 anos AP \pm 95	^{14}C (CL)	Holocênica
Caranguejo (IGUA)	40–50	Moderna	^{14}C AMS	Holocênica
Caranguejo (IGUA)	60–70	500 anos AP \pm 70	^{14}C AMS	Holocênica
Baixada Santista				
Itapanhaú (ITA)	5–15	90 anos AP \pm 50	^{14}C (CL)	Holocênica
Itapanhaú (ITA)	40–50	1.060 anos AP \pm 60	^{14}C (CL)	Holocênica
Itapanhaú (ITA)	70–80	1.740 anos AP \pm 90	^{14}C AMS	Holocênica
Litoral Norte				
Rio Escuro (RE)	15–25	2.350 anos \pm 270	TL	Holocênica
Rio Escuro (RE)	40–50	3.700 anos \pm 430	TL	Holocênica
Rio Escuro (RE)	70–80	3.650 anos \pm 430	TL	Holocênica
Praia da Fazenda (RF)	10–20	3.550 anos \pm 440	TL	Holocênica
Praia da Fazenda (RF)	40–50	12.200 anos \pm 1.500	TL	Pleistocênica
Praia da Fazenda (RF)	70–80	9.200 anos \pm 1.100	TL	Pleistocênica

⁽¹⁾ Datação radiocarbônica por espectrometria de aceleração de massa. ⁽²⁾ Datação radiocarbônica por cintilação líquida. ⁽³⁾ Datação por termoluminescência.

No Canal de Cananéia e Mar Pequeno foram datados os manguezais da Ilha de Pai Matos (PM) e do Caranguejo (IGUA). No primeiro, foi obtida a idade de 450 anos AP \pm 95 (5–15 cm), idade moderna (40–50 cm) e 60.000 anos \pm 6.800 (72–79 cm). No segundo, a camada de 5–15 cm apresentou a idade de 410 anos AP \pm 95, de 40–50 cm idade moderna e 60–70 cm a idade foi de 500 anos AP \pm 70. O ponto de estudo datado dentro da Baixada Santista corresponde às camadas de 5–15, 40–50 e 60–70 cm em ITA, que apresentaram idades de 90 anos AP \pm 50, 1.060 anos AP \pm 60 e 1.740 anos AP \pm 90, respectivamente.

Os dois manguezais estudados no Litoral Norte foram datados em três profundidades. Os resultados encontrados no quadro 4 mostram idades no manguezal Rio Escuro (RE) de 2.350 anos \pm 270, 3.700 anos \pm 430 e 3.650 anos \pm 430, nas camadas de 15–25, 40–50 e 70–80 cm, respectivamente. No Manguezal Praia da Fazenda (RF) as idades foram de 3.550 anos \pm 440 (10–20 cm), 12.200 anos \pm 1.500 (40–50 cm) e 9.200 anos \pm 1.100 (70–80 cm).

DISCUSSÃO

Constituição granulométrica dos solos e a evolução costeira quaternária

As áreas de planície da Ilha do Cardoso são constituídas de depósitos arenosos deixados pelos eventos transgressivos/regressivos pleistocênico e holocênico. Durante o processo evolutivo Quaternário, as áreas baixas da Ilha foram recobertas por depósitos arenosos pleistocênicos, que posteriormente foram retrabalhados durante a Transgressão Santos, contribuindo, dessa maneira, para a formação dos atuais depósitos arenosos. Acrescenta-se, também, que a Ilha do Cardoso é constituída por uma serra formada de rochas do pré-cambriano, a qual forneceria sedimentos arenosos diretamente às planícies, que também foram retrabalhadas após esse último evento transgressivo (Suguio & Martin, 1978; Suguio & Tessler, 1992).

Dessa maneira, pode-se inferir que, na Ilha do Cardoso, os atuais manguezais estão se desenvolvendo sobre os depósitos arenosos holocênicos, o que é corroborado pela idade obtida na camada de 5–15 cm em SG1 (1.900 anos AP). No entanto, pode-se afirmar que tal substrato está assentado sobre depósitos referentes à penúltima transgressão, ou seja, de origem pleistocênica, visto que foram encontradas idades de 11.000 e 24.700 anos para as duas camadas amostradas a partir de 65 cm do mesmo manguezal (Quadro 4).

Os resultados obtidos corroboram estudos anteriores que descrevem a planície costeira Cananéia-Iguape, que é, em grande parte, coberta por depósitos arenosos marinhos extremamente homogêneos, compostos de areias finas muito bem selecionadas (Souza et al., 1996). As datações determinadas neste estudo correspondem à seqüência estratigráfica

descrita no modelo evolutivo da costa paulista proposto por Suguio & Martin (1978).

As camadas arenosas encontradas nos manguezais da Ilha do Cardoso podem também estar relacionadas com a ação erosiva, hídrica ou eólica, nos cordões arenosos das terras altas adjacentes aos manguezais (restingas).

De acordo Lugo & Snedaker (1974), os manguezais apresentam a seguinte classificação fisiográfica: ilha, ribeirinho, franja, bacia, arbustivo e anão. Na figura 4 (a-f) são apresentados os modelos esquemáticos dos manguezais estudados.

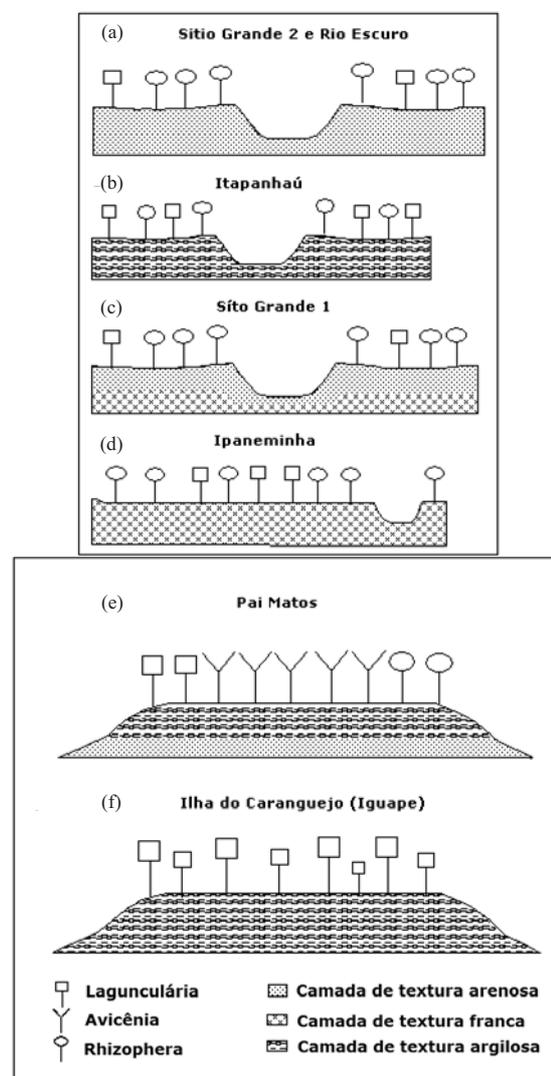


Figura 4. Modelos dos manguezais localizados às margens de rios. (a) substrato arenoso ao longo do perfil; (b) substrato argiloso ao longo do perfil; (c) substrato arenoso na superfície e textura franca na base; (d) tipo bacia, com substrato de textura franca ao longo do perfil – modelos dos manguezais do tipo ilha; (e) substrato argiloso sobre uma camada arenosa; (f) substrato de textura argilosa ao longo do perfil.

Os manguezais da Ilha do Cardoso podem ser enquadrados nos modelos da figura 4 (a, c, d), pelos quais foram estabelecidos às margens de rios (tipo ribeirão), e podem apresentar em toda a seqüência das camadas uma textura arenosa (Figura 4a) ou uma camada arenosa sobre uma camada de textura franca (Figura 4c). O manguezal IPA apresenta uma seqüência de camadas de textura franca, provavelmente pelo fato de estar localizado em uma pequena bacia a margem do rio Ipaneminha (tipo bacia), cujo microrrelevo favoreceu a sedimentação de partículas finas dentro de um ambiente que é formado por substrato arenoso (Figura 4d).

No leito do Canal de Cananéia são encontrados os manguezais PM e BAG (Figura 5a), os quais apresentaram o predomínio das frações finas na camada superficial, que, de acordo com a datação realizada na

camada de 5–15 cm em PM, corresponde a depósitos holocênicos. Este canal faz parte de um sistema costeiro protegido da ação de ondas por uma feição barreira arenosa, denominada Ilha Comprida, como descrito por Suguio & Tessler (1992). Esta ilha barreira condiciona um sistema hídrico de baixa energia cinética, formado pelas correntes de maré e descargas fluviais, as quais condicionam a dinâmica de sedimentação no sistema Cananéia-Iguape (Tessler, 1982).

A sedimentação dessas partículas ocorre sobre os bancos de areia localizados ao longo do canal (Tessler & Furtado, 1983), os quais podem corresponder a antigos depósitos pleistocênicos, como os encontrados no manguezal PM, cuja camada de constituição arenosa localizada a 72–79 cm corresponde à época pleistocênica (60.000 anos).

O manguezal IGUA, situado a 70 km ao norte de PM, também se encontra protegido da ação direta dos agentes marinhos, particularmente da ação dos sistemas de ondas incidentes sobre a linha de costa pela mesma Ilha Comprida, à semelhança do que ocorre no Canal de Cananéia (Figura 5a). De forma análoga à daqueles, IGUA apresenta a camada superficial constituída, predominantemente, das frações finas, característica que segue em profundidade, distinguindo-o, nesse aspecto, dos manguezais do Canal de Cananéia.

O aporte significativo de sedimentos finos, carreados em suspensão pela drenagem continental através do Valo Grande, o qual se encontra nas proximidades do local amostrado, pode ser a explicação para ocorrência de maior espessura do substrato de textura mais fina em IGUA. Isso provavelmente deve ter proporcionado maior aporte de sedimentos para o sistema estuarino-lagunar, evidenciando que a idade da superfície desses manguezais seria mais recente do que a determinada em IGUA na profundidade de 5–15 cm (Quadro 4). Uma explicação plausível para essa inversão de idade poderia estar associada à ação da macrofauna do solo por meio do retrabalhamento do substrato pelos caranguejos, transportando parte do substrato das camadas mais profundas para as camadas mais superficiais (Middleton & Mckee; 2001; Nielsen et al., 2003; O'Connor & van Ben, 2006). Essa bioturbação do solo poderia explicar, inclusive, a contemporaneidade encontrada entre as camadas de 5–15 e 60–70 cm no manguezal IGUA (Quadro 4).

De acordo com Suguio & Martin (1978), a Ilha Comprida teve seu crescimento iniciado após a Transgressão Santos no sentido sudoeste-nordeste, cujo esquema evolutivo é apresentado na figura 5b. Assim, a região estuarina do Sistema Cananéia-Iguape, em sua parte sudoeste, esteve protegida da ação de ondas durante esta última transgressão, evitando a erosão mais pronunciada de antigos cordões arenosos pleistocênicos. E é sobre os sedimentos arenosos de antigos cordões litorâneos pleistocênicos desta área

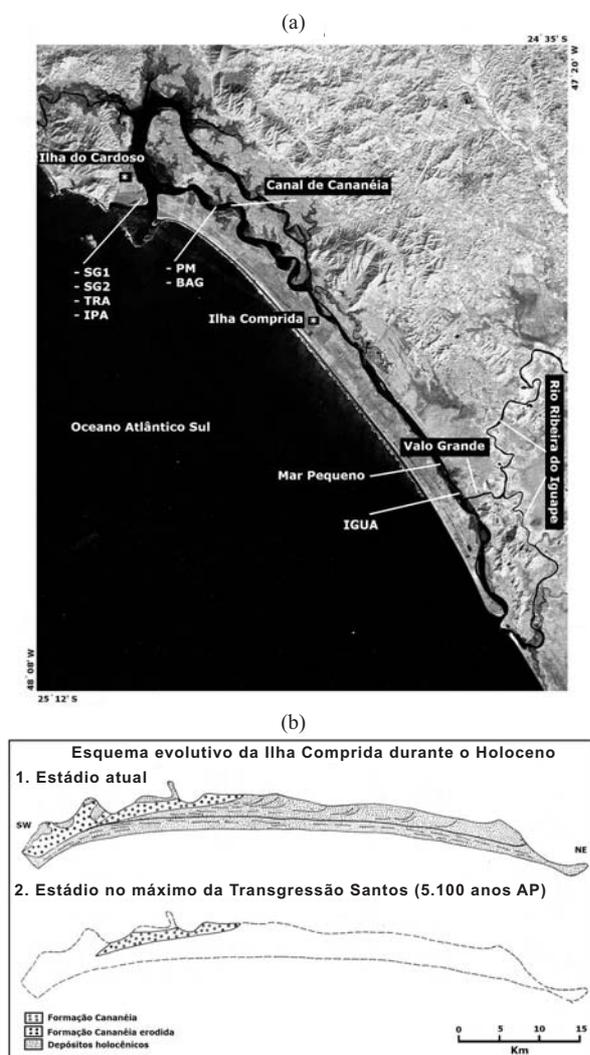


Figura 5. Localização dos manguezais no Litoral Sul do Estado de São Paulo (a); e esquema evolutivo da Ilha Comprida (b). Fonte: Modificado de Suguio & Tessler (1992).

abrigada que, provavelmente, deve estar estabelecido o manguezal da Ilha de Pai Matos, o que explicaria uma camada arenosa pleistocênica (60.000 anos) a partir de 72 cm nesse ponto.

No extremo sul da Ilha Comprida, Suguio et al. (2003) também identificaram camadas de idade pleistocênica a partir de 0,5 m de profundidade, estando de acordo com os dados obtidos na Ilha de Pai Matos.

Enquanto isso, os possíveis depósitos arenosos pleistocênicos localizados mais ao norte poderiam ter sofrido processo erosivo mais intenso durante a última transgressão, e também a maior energia cinética gerada pela ação de ondas evitaria a sedimentação de partículas finas, tudo isso proporcionado pela ausência da feição barreira arenosa, protegendo o sistema.

Assim, apenas após o completo desenvolvimento do sistema costeiro e de seus canais localizados à retaguarda da feição barreira arenosa e, conseqüentemente, com a diminuição como um todo da energia cinética do sistema, pôde ter início a sedimentação mais pronunciada de sedimentos finos de origem continental, iniciando uma fase de ampliação pronunciada das áreas de manguezal, em especial daqueles vinculados às ilhas com base arenosa dispostas ao longo dos canais internos do sistema.

Os manguezais PM, BAG e IGUA são do tipo ilha, cujos modelos encontram-se na figura 4(e, f), diferenciando-se entre si pela espessura da camada de textura fina, que em PM e BAG encontra-se sobre uma camada arenosa, enquanto em IGUA se observa uma continuidade da camada argilosa até 80 cm de profundidade.

A origem da textura franca e argilosa nos manguezais localizados na Baixada Santista pode estar relacionada com os sedimentos finos depositados nos leitos de baías, canais e cursos inferiores dos rios dessa região após a Transgressão Santos. Também pode estar relacionada ao aporte de material fino de origem continental carregado ao sistema através dos vários rios que drenam a planície litorânea dessa região, a partir da erosão dos solos das encostas adjacentes da Serra do Mar, como descrito por Suguio & Martin (1978).

As características geomorfológicas locais constituem um sistema estuarino bem abrigado da ação de ondas, protegido pelas ilhas de São Vicente a sudoeste e Santo Amaro a nordeste, formando um verdadeiro golfo (Lamparelli, 1998) [Figura 6a]. Esse cenário, bem característico nos manguezais COS, CRU, IRI e ITA, favorece a sedimentação de partículas finas, de forma semelhante ao que ocorre no Canal de Cananéia e Mar Pequeno, onde a baixa energia cinética do sistema hídrico não consegue transportar partículas grosseiras.

De toda forma, também na Baixada Santista assegura-se que os sedimentos que atualmente constituem o substrato de manguezais têm origem

holocênica, como mostra a idade de 1.740 anos AP obtida na camada de 60–70 cm do manguezal do Rio Itapanhaú.

A porção da Baixada Santista onde se localiza o manguezal do Rio Guaratuba encontra-se fora do cenário geomorfológico citado anteriormente e corresponde a uma planície litorânea retilínea e paralela à atual linha de costa que está ao norte da cidade de Bertioga, cujos sedimentos remanescentes após estabilização do nrmr provavelmente sejam os cordões arenosos regressivos holocênicos. Nas margens do Rio Guaratuba e provavelmente sobre esses cordões está localizado o manguezal GUA, que apresentou nas duas camadas estudadas do solo composição granulométrica com predomínio da fração areia (Figura 6b).

O modelo representativo para os manguezais localizados dentro do estuário de Santos foi resumido no esquema da figura 4b. Eles estão localizados nas margens de rios (tipo ribeirinho) e apresentam substrato constituído de partículas finas ao longo das profundidades estudadas.

Geomorfologicamente distinto das demais porções do litoral estudado, o setor norte do litoral paulista é caracterizado pela proximidade do embasamento cristalino (Serra do Mar) com a atual linha de costa e pela projeção desse embasamento atingir o mar em quase toda a sua extensão (Lamparelli, 1988). Esse fato proporcionou, ao longo dos eventos oscilatórios do nível marinho quaternário, a formação e preservação de estreitas planícies sedimentares que, atualmente, são formadas por depósitos arenosos holocênicos (Suguio & Martin, 1978) [Figura 6(c,d)].

Nesse cenário, foi amostrado o manguezal do Rio Escuro (Figura 6c), estabelecido às margens deste rio, cuja composição granulométrica das camadas em superfície e subsuperfície faz correlacionar o atual substrato deste manguezal com a presença de cordões litorâneos holocênicos, visto que as idades obtidas a partir da superfície até 80 cm de profundidade (~2.350 a 3.700 anos) correspondem aos períodos de descida do nível relativo do mar após o máximo da Transgressão Santos.

Com base no mesmo processo evolutivo, pode-se explicar a existência do manguezal RF, localizado ao norte de Ubatuba (SP), nas margens do Rio da Fazenda, cujos atributos granulométricos são semelhantes aos dos manguezais anteriores, porém diferindo destes por apresentar idade pleistocênica em subsuperfície (Quadro 4 e Figura 6d).

Essa distinção entre as épocas da seqüência de camadas de solos entre RE e RF se deve ao fato de que a planície do primeiro está mais protegida da ação direta de agentes marinhos (Figura 6c), preservando, dessa maneira, os depósitos arenosos acumulados após a estabilização do nrmr, enquanto em RF (Figura 6d) processos hidrodinâmicos com maior energia cinética podem estar causando a erosão da superfície,

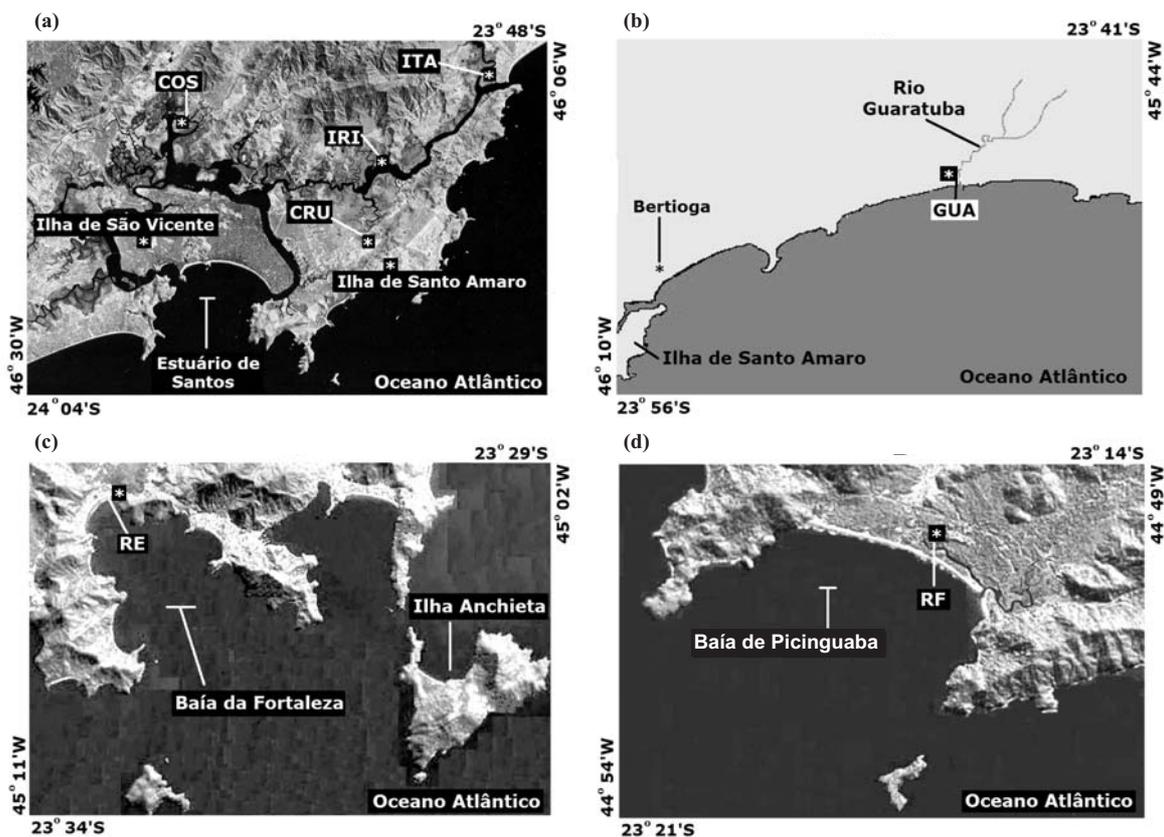


Figura 6. Localização dos manguezais da Baixada Santista e Litoral Norte. (a) manguezais dentro do estuário de Santos; (b) manguezal de Guaratuba; (c) manguezal do Rio Escuro; e (d) manguezal do Rio da Fazenda.

promovendo assim menor espessura do substrato de origem mais recente. Esses últimos manguezais podem ser caracterizados como do tipo ribeirinho, à semelhança do SG2, cujas camadas são de textura arenosa (Figura 4a).

Datações realizadas em solos de manguezais indicam que os substratos destes são de época holocênica, à semelhança dos encontrados neste estudo. Na região norte do Brasil (Estado do Pará), a datação radiocarbônica realizada no material orgânico do solo apresentou idade moderna a 40 cm de profundidade (Behling et al., 2001); em outros pontos as idades foram de 420 ± 70 anos AP a 27,5 cm, 440 ± 30 anos AP a 32 cm e 820 ± 70 anos AP a 57,5 cm (Cohen et al., 2005). Amostra coletada a 15–30 cm em solos de um manguezal das Bermudas apresentou idade de 750 ± 50 anos AP datada por ^{14}C (Ellison, 1993). A mesma contemporaneidade foi identificada na região do Pacífico, onde Fujimoto et al. (1996) dataram por ^{14}C solo de manguezais na Micronésia, o qual apresentou idade de 500 ± 75 anos AP a 50–70 cm.

Distribuição de partículas e seleção na fração areia

Os sedimentos arenosos dos últimos eventos transgressivos e regressivos são constituídos de areia

fina e muito fina selecionadas, como apresentado por Suguio (1993) e Villwock et al. (2005). De forma análoga foi caracterizada a areia dos solos dos manguezais deste estudo, mostrando que, independentemente do setor da linha de costa estudado, ocorre o predomínio da fração areia fina e muito fina, com exceção da camada subsuperficial amostrada em RF. Em relação à distribuição de partícula da fração areia, Rossi & Mattos (2002) identificaram o predomínio de areia fina e muito fina em manguezais em várias camadas de solos distribuídos ao longo da costa paulista, com exceção, semelhantemente a este estudo, da camada subsuperficial de um manguezal na Baía de Picinguaba.

Essa seleção de partículas provavelmente foi realizada por retrabalhamento desses sedimentos arenosos durante o evento regressivo após a Transgressão Santos (Suguio, 1993; Villwock et al., 2005), culminando com a formação das atuais planícies costeiras, que apresentam solos cuja fração areia é constituída basicamente de areia fina e muito fina, como observado neste estudo.

A conservação de depósitos arenosos pleistocênicos constituídos de areia mais grossa pode estar associada à geomorfologia desse setor do litoral norte, que esteve sujeito à maior ação de ondas durante a estabilização

para o atual nrm, o que explicaria a existência de camada subsuperficial dominada por areia grossa e muito grossa no manguezal do Rio da Fazenda.

A fração silte em solos de manguezais

Entre os ciclos de enchente e vazante das marés ocorre um período de parada na corrente da maré, o qual favorece a sedimentação das partículas em suspensão em ambientes estuarinos (Ganju et al., 2004). O fato de que as correntes de maré mantêm em suspensão predominantemente as partículas de tamanho silte e argila, como observado por Wang & Le (1997), Christiansen et al. (2000) e Anthony (2004), e que a velocidade de sedimentação segue a Lei de Stokes explica o favorecimento da sedimentação de altos teores de silte em solos de manguezais, a exemplo dos pontos amostrados em BAG, PM, IGUA e ITA. Quando da ocorrência de camadas de silte em subsuperfície superiores às encontradas em superfície, como observado em SG1 e GUA e TRA, pode se tratar da presença de camadas de sedimentos finos, também de origem pleistocênica, os quais foram recobertos com os sedimentos arenosos após a Transgressão Santos. A idade pleistocênica é confirmada no presente estudo com base na idade em SG1 (65–77 cm = 11.000 anos \pm 1.300 e 90–95 cm = 24.700 anos \pm 2.800). Estudo estratigráfico desenvolvido na Ilha Comprida por Gandolfo et al. (2001) mostra a presença de camadas de sedimentos finos sob a camada superficial arenosa, e os autores correlacionam positivamente suas observações com o modelo de evolução costeira paulista proposto por Suguio & Martin (1978).

CONCLUSÕES

1. Os solos dos manguezais do Estado de São Paulo apresentam diferentes texturas, desde arenosa até muito argilosa, e têm idade holocênica, oscilando entre 410 anos AP e 3.700 anos. Contudo, em alguns casos esse substrato holocênico é pouco espesso e está assentado sobre camadas arenosas pleistocênicas.

2. A distribuição de partículas está relacionada à morfologia atual do estuário e à natureza dos sedimentos costeiros adjacentes.

3. Solos de manguezais podem apresentar altos teores de silte, o que está relacionado à posição no estuário e à dinâmica das marés.

4. Os solos de constituição arenosa foram identificados na Ilha do Cardoso, na planície do Rio Guaratuba e ao longo do litoral norte, cujos manguezais foram estabelecidos sobre os sedimentos retrabalhados de antigos cordões arenosos e localizados às margens dos rios que drenam essas planícies litorâneas (SG1, SG2, GUA e RE). Ocorrem também nas proximidades da desembocadura dos rios, onde há maior influência da ação de ondas (RF).

5. Os manguezais cujo substrato são constituídos, predominantemente, de partículas finas (silte e argila) estão localizados nos compartimentos mais protegidos do litoral, como o Canal do Cananéia (PM e BAG) e Mar Pequeno (IGUA), e dentro do estuário de Santos, na Baixada Santista (ITA, IRI, COS e CRU).

AGRADECIMENTOS

O presente estudo teve apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio do convênio CAPES-MECD 054/03, entre a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz e a Universidade de Santiago de Compostela (Espanha). Os autores também agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento do projeto: Pedologia e impacto antrópico sobre a qualidade dos solos em áreas de mangue no Estado de São Paulo, Processo nº. 2001/02976-8.

LITERATURA CITADA

- ANTHONY, E.J. Sediment dynamics and morphological stability of estuarine mangrove swamps in Sherbro Bay, West Africa. *Marine Geol.*, 208:207-224, 2004.
- BEHLING, H.; COHEN, M.C.L. & LARA, R.J. Studies on Holocene mangrove ecosystem dynamics of the Bragança Peninsula in north-eastern Pará, Brazil. *Palaeog. Palaeoclim. Palaeoecol.*, 167:225-242., 2001.
- BESNARD, W. Considerações gerais em torno da região lagunar de Cananéia-Iguape II. *B. Inst. Paulista Ocean.*, 1:3-28, 1950.
- BIRCH, G. & TAYLOR, S. Source of heavy metals in sediments of the Port Jackson estuary, Australia. *Sci. Total Environ.*, 227:123-138, 1999.
- BITTENCOURT, A.C.S.P.; MARTIN, L.; VILAS-BOAS, G.S. & FLEXOR, J.M. The marine formations of the coast of the State of Bahia, Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COASTAL EVOLUTION IN THE QUATERNARY, São Paulo, 1979. Anais. São Paulo, 1979. p.232-253.
- CHAPPELL, J.M.A. A revised sea-level records of the last 300.000 years from Papua-New Guinea. *Search*, 14:99-104, 1983.
- CHRISTIANSEN, T.; WIBERG, P.L. & MILLIGAN, T.G. Flow and sediment transport on a Tidal Salt Marsh Surface. *Estuarine. Coastal Shelf Sci.*, 50:315-331, 2000.
- CINTRÓN, G. & SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Introducción a la ecología del manglar. Montevideo, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe, 1983. 109p.
- CLARK, M.W.; DAVIES-McCONCHIE, F.; McCONCHIE, D. & BIRCH, G.F. Selective chemical extraction and grain size normalisation for environmental assessment of anoxic sediments: Validation of an integrated procedure. *Sci. Total Environ.*, 258:149-170, 2000.

- CLOUGH, B.F. Primary productivity and growth of mangrove forests. In: ROBERTSON, A.I. & ALONGI, D.M. Coastal and estuarine studies. Washington, American Geophysical Union, 1992. p.225-250.
- COHEN, M.C.L.; BEHLING, H. & LARA, R.J. Amazonian mangrove dynamics during the last millennium: The relative sea-level and the Little Ice Age. *Rev. Palaeobotany Palynol.*, 136:93-108, 2005.
- COOPER, J.A.G. Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South African coast. *Geomorphology*, 40:99-122, 2001.
- ELLISON, J.C. Mangrove retreat with Rising Sea-Level, Bermuda. *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 37:75-87, 1993.
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. Brazos river bar: A study on the significance of grain-size parameters. *J. Sedim. Petrol.*, 27:3-26, 1957.
- FUJIMOTO, K.; MIYAGI, T.; KIKUCHI, T. & KAWANA, T. Mangrove habit formation and response to Holocene Sea-Level Changes on Kosrae Island, Micronesia. *Mangroves Salt Marshes*, 1:47-57, 1996.
- GANDOLFO, O.C.B.; SOUZA, L.A.P.; TESSLER, M.G. & RODRIGUES, M. Estratigrafia rasa da Ilha Comprida (SP): Um exemplo de aplicação do GPR. *Braz. J. Geophys.*, 19:251-262, 2001.
- GANJU, N.K.; SCHOELLHAMER, D.H.; WARNER, J.C.; BARAD, M.F. & SCHLADOW, S.G. Tidal oscillation of sediment between a river and a bay: a conceptual model. *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 60:81-90, 2004.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1986. Part 1. p.383-412.
- HILLIER, S. Erosion, sedimentation and sedimentary origin of clays. In: VELDE, B. *Origin and minerals of clays-clays and the environment*. Berlin, Springer, 1995. p.162-219.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Carta Geotécnica do Município do Guarujá. São Paulo, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico, 1988. 115p.
- jong van LIER, Q. & VIDAL-TORRADO, P. PHI: Programa de microcomputador para análise estatística da granulometria de sedimentos. *R. Bras.Ci. Solo*, 16:277-281, 1992.
- KRUMBEIN, W.C. Size frequency distribution of sediments. *J. Sedim. Petrol.*, 4:65-77, 1934.
- LAMPARELLI, C.C. Mapeamento dos ecossistemas costeiros do Estado de São Paulo. São Paulo, CETESB, 1998. 108p.
- LARIO, J.; SPENCER, C.; PLATER, A.J.; ZAZO, C.; GOY, J.L. & DABRIO, C.J. Particle size characterisation of Holocene back-barrier sequences from North Atlantic coasts (SW Spain and SE England). *Geomorphology*, 42:25-42, 2002.
- LEE, R.E. & PAGE, D.S. Petroleum hydrocarbons and their effects subtidal regions after major oil spills. *Marine Poll. B.*, 34:928-940, 1997.
- LUGO, A.E. & SNEDAKER, S.C. The ecology of mangroves. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 5:39-64, 1974.
- MIDDLETON, B.A. & MCKEE, K.L. Degradation of mangrove tissues and implications for peat formation in Belizean island forests. *J. Ecol.*, 89:818-828, 2001.
- MILLWARD, G.E.; SANDS, T.K. & JAGO, C.F. Particulate metals and their settling velocities in the Humber Estuary, UK. *Marine Chem.*, 68:145-168, 1999.
- NIELSEN, O.I.; KRISTENSEN, E. & MACINTOSH, D.J. Impact of fiddler crabs (*Uca* spp.) on rates and pathways of benthic mineralization in deposited mangrove shrimp pond waste. *J. Exper. Marine Biol. Ecol.*, 289:59-81, 2003.
- O'CONNOR, N.J. & van Ben, T. Adult fiddler crabs *Uca pugnax* (Smith) enhance sediment-associated cues for molting of conspecific megalopae. *J. Exper. Marine Biol. Ecol.*, 335:123-130, 2006.
- PESSENDA, L.C.R. & CAMARGO, P.B. Datação radiocarbônica de amostras de interesse arqueológico e geológico por espectroscopia de cintilação líquida de baixa radiação de fundo. *Química Nova*, 4:98-103, 1991.
- ROSSI, M. Fatores formadores da paisagem litorânea: A baía do Guaratuba, São Paulo - Brasil. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1999. 159p. (Tese de Doutorado)
- ROSSI, M. & MATTOS, I.F.A. Solos de mangue do Estado de São Paulo: Caracterização química e física. *R. Depart. Geog.*, 15:101-113, 2002.
- SHACKLETON, N.J.; SÁNCHEZ-GOÑI, M.F.; PAILLERC, D. & LANCELOT, Y. Marine isotope substage 5e and the Eemian Interglacial. *Global Planetary Change*, 36:151-155, 2003.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF. *Soil survey manual*. Washington, Soil Conservation Service, U.S., Department of Agriculture, 1993. 325p. (Handbook, 180)
- SOUZA, L.A.P.; TESSLER, M.G. & GALLI, V.L. O Gráben de Cananéia. *R. Bras. Geoci.*, 26:139-150, 1996.
- STUIVER, M.; REIMER, P. & BRAZIUNAS, T.F. High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, 40:1127-1151, 1998.
- SUGUIO, K. A Ilha do Cardoso no contexto geomorfológico do litoral sul-paulista da província costeira. In: SIMPÓSIO DE ECOSSISTEMAS DA COSTA BRASILEIRA, 3., 1993, São Paulo. *Anais. São Paulo, ACIES*, 1993. p.154-171.
- SUGUIO, K. & MARTIN, L. Formações quaternárias marinhas do litoral paulista e sul fluminense. São Paulo, Instituto Oceanográfico, 1978. 55p.
- SUGUIO, K. & TESSLER, M.G. Depósitos quaternários da planície costeira de Cananéia-Iguape (SP). São Paulo, Universidade de São Paulo, 1992. 33p. (Publicação Especial Instituto Oceanográfico, 9)
- SUGUIO, K.; TATUMI, S.H.; KOWATA, E.A.; MUNITA, C.S. & PAIVA, R.P. Upper Pleistocene deposits of the Comprida Island (São Paulo State) dated by thermoluminescence method. *An. Acad. Bras. Ci.*, 75:91-96, 2003.

- TAM, N.F.Y. & WONG, Y.S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. *Environ. Poll.*, 110:195-205, 2000.
- TATUMI, S.H.; KOWATA, E.A.; GOZZI, G.; KASSAB, L.R.P.; SUGUIO, K.; BARRETO, A.M.F. & BEZERRA, F.H.R. Optical dating results of beachrock, eolic dunes and sediments applied to sea-level changes study. *J. Luminescence*, 102/103:562-565, 2003.
- TESSLER, M.G. Sedimentação atual na região lagunar de Cananéia-Iguape, Estado de São Paulo. São Paulo, Universidade de São Paulo 1982. 2v. (Tese de Mestrado)
- TESSLER, M.G. & FURTADO, V.V. Dinâmica de sedimentação das feições de assoreamento da região lagunar Cananéia-Iguape, Estado de São Paulo. *B. Inst. Oceanog.*, 32:117-124, 1983.
- TURNER, A. & MILLWARD, G.E. Suspended particles: Their role in estuarine biogeochemical cycles. *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 55:857-883, 2002.
- VILLWOCK, J.A.; LESSA, G.C.; SUGUIO, K.; ANGULO, R.J. & DILLENBURG, S.R. Geologia e geomorfologia de regiões costeiras. In: SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A.M.S. & OLIVEIRA, P.E. *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto, Hollos, 2005. p.94-113.
- VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J.; LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A.; HORN P., N.O.; BACHI, F.A. & DEHNHARDT, B.A. Geology of Rio Grande coastal province. *Quatern. South Am. Antarctic Peninsula*, 4:79-97, 1986.
- VRECAA, P. & DOLENEC, T. Geochemical estimation of copper contamination in the healing mud from Makirina Bay, central Adriatic. *Environ. Intern.*, 31:53-61, 2005.
- WANG, X. & LE, X. Grain-size characteristics of the extant tidal flat sediments along the Jiangsu coast, China. *Sedim. Geol.*, 112:105-122, 1997.
- WOLANSKI, E. & CHAPPELL, J. The response of tropical Australian estuaries to a sea level rise. *J. Marine Syst.*, 7:267-279, 1996.
- WOODROFFE, C. Mangrove sediments and geomorphology. In: ROBERTSON, A.I. & ALONGI, D.M. *Coastal and Estuarine Studies*. Washington, American Geophysical Union, 1992. p.7-42.
- XIA, X.M.; LIA, Y.; YANGA, H.; WUC, C.Y.; SING, T.H. & PONG, H.K. Observations on the size and settling velocity distributions of suspended sediment in the Pearl River Estuary, China. *Continental Shelf Res.*, 24:1809-1826, 2004.