

6 FORAMINÍFEROS: INDICADORES PALEOECOLÓGICOS E PALEOAMBIENTAIS DO COMPLEXO COSTEIRO GUARATIBA-SEPETIBA

Os estudos que utilizam foraminíferos como indicadores ambientais e, posteriormente, paleoecológicos na Baía de Sepetiba começaram a ser desenvolvidos na década de 1960. O primeiro esforço foi concentrado no levantamento taxonômico, uma vez que no conhecimento das espécies reside a primeira etapa no caminho de empregá-los como indicadores biológicos.

Associações faunísticas identificadas em amostras superficiais e de testemunhos, coletados na baía e no Manguezal de Guaratiba, têm fornecido importantes informações acerca da configuração do ambiente e da sua evolução no Holoceno. Informações provenientes das associações de foraminíferos podem adicionar um olhar mais detalhado sobre o assunto, pois estes organismos são reconhecidamente sensíveis a mudanças ambientais. Assim, através da associação entre dados sedimentológicos, físico-químicos, geoquímicos, geocronológicos, geomorfológicos, e dados biológicos da fauna de foraminíferos, é possível sugerir uma sequência de eventos no contexto de evolução holocênica da Baía de Sepetiba. As regiões costeiras têm sua formação relacionada às variações do nível do mar, logo conhecer mais detalhadamente a história da Baía de Sepetiba pode ajudar na compreensão dos eventos de alterações do nível do mar que atuaram na conformação da costa sudeste brasileira durante o Quaternário.

No complexo costeiro Guaratiba/Sepetiba já foram identificadas 264 espécies de foraminíferos distribuídas pelo sedimento de fundo da Baía de Sepetiba e nos canais de maré do Manguezal de Guaratiba (LAUT et al., 2012). Tais trabalhos são de grande importância, uma vez que vêm fornecendo não somente inventários de espécies como também dados de distribuição biogeográfica e a possibilidade de reconstituição de eventos relacionados às variações do nível do mar no Holoceno da Baía de Sepetiba.

6.1 Baía de Sepetiba

Tinoco (1965) realizou o primeiro levantamento da fauna de foraminíferos da Baía de Sepetiba, identificando 15 espécies de foraminíferos calcários pertencentes à Ordem Rotallida em amostras de sedimentos provenientes de sete testemunhos. Entre estas espécies

houve dominância de algumas típicas de regiões confinadas, como *Ammonia tepida*, *Bulliminella elegantissima* e *Elphidium* spp. Ainda segundo o autor, a ausência de espécies planctônicas seria uma evidência de que a baía teve baixo contato com as correntes de plâncton marinho (LAUT et al., 2012).

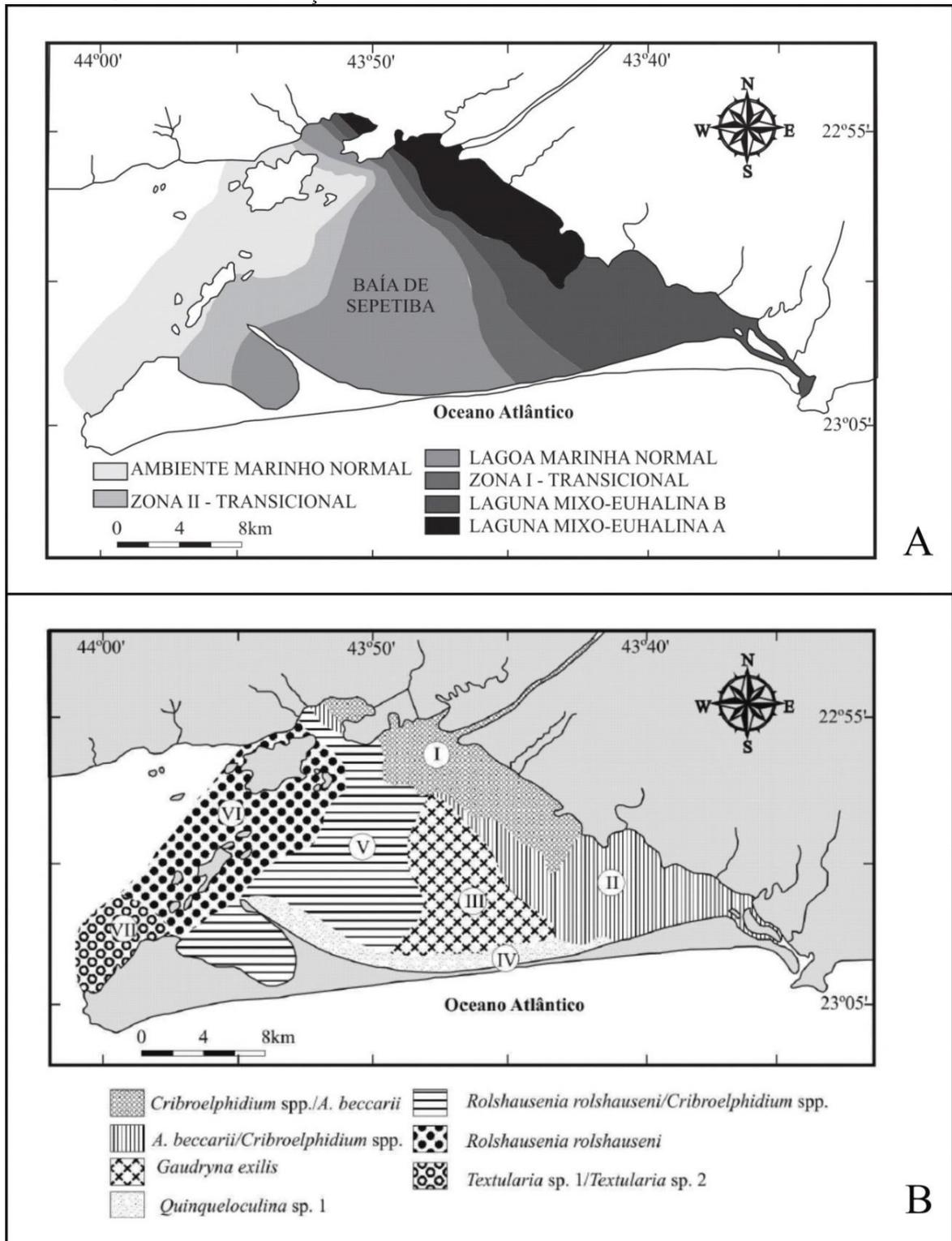
Na década de 1970, estudos de caráter ambiental e ecológico começaram a ser desenvolvidos na Baía de Sepetiba, destacando-se os de Zaninetti et al. (1976,1977) no Manguezal de Guaratiba e os de Brönnimann et al. (1981 a;b) na baía e no manguezal. Esses autores, além de parâmetros físico-químicos como salinidade, pH e temperatura e sedimentológicos, passaram a incluir em suas análises índices ecológicos como diversidade α de Fisher (1943) para definir associações faunísticas e utilizá-las na caracterização ambiental da baía.

Utilizando o índice de diversidade α de Fisher em 176 amostras de superfície, Brönnimann et al. (1981 a) dividiu a baía em quatro setores: Mar Normal, Laguna Marinha Normal, Laguna Mixo-Eualina A e Laguna Mixo-Eualina B (Figura 30). Os autores identificaram uma fauna essencialmente bentônica e calcária, com dominância da Ordem Rotallida, exceto nas estações onde a fração arenosa é dominante. Além disso, sugeriram que os principais fatores que controlam a distribuição das espécies são a salinidade, os teores de oxigênio e os nutrientes presentes no sedimento.

A partir das amostras coletadas e analisadas por Brönnimann et al. (1981 a, b), seguiram-se uma série trabalhos de revisão taxonômica, adição de índices ecológicos e dados estatísticos, além da comparação com fauna de ostracodes, realizados, respectivamente, por Laut e Rodrigues (2011) e Dias-Brito et al. (1988).

Oliveira-Silva (2003) aplicou índices ecológicos como o índice de diversidade de Shannon, riqueza, dominância e equitabilidade (J'), assim como frequência relativa de espécies e tratamentos estatísticos como análises de agrupamento. A autora caracterizou três assembleias, que permitiram dividir a baía em três setores, um a menos do que Brönnimann et al. (1981 a): Baía Interna, com as espécies exclusivamente calcárias hialinas e dominância de espécies de ambientes mixo-halinas como *Ammonia parkinsoniana* e *Elphidium gunteri*; Baía Média, com espécies calcárias hialinas e calcárias porcelanosas e dominância de espécies tipicamente marinhas como *Ammonia roshauseni*, *Ammonia parkinsoniana* e *Elphidium incertum*; Baía Externa, com espécies que indicaram a região de maior influência marinha da baía, e altos índices de diversidade.

Figura 30 – Divisão da Baía de Sepetiba segundo Brönnimann et al. (1981 a), baseada em índices diversidade α de Fisher em associações de foraminíferos bentônicos.



Legenda: A- Setores baseados no índice de diversidade α ; B-Distribuição das biofácies de foraminíferos na Baía de Sepetiba.

Fonte: modificado de Brönnimann et al. (1981 a) e Dias-Brito et al.(1988).

6.2 Planície de maré/manguezal de Guaratiba

No Manguezal de Guaratiba, parâmetros sedimentológicos, cronológicos e indicadores biológicos têm sido utilizados na investigação da resposta do manguezal de Guaratiba às oscilações do nível do mar no Quaternário, como pólen e foraminíferos bentônicos.

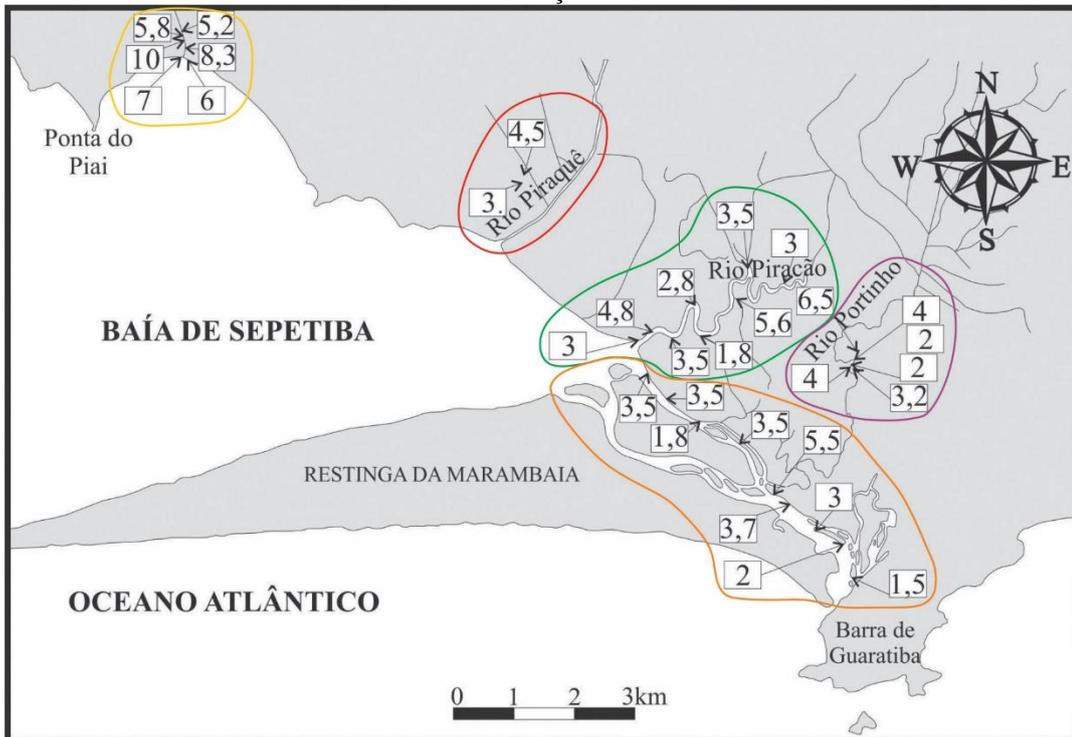
A partir da década de 1970, estudos ecológicos começaram a se somar aos levantamentos taxonômicos iniciados por Tinoco em 1965 (TINOCO, 1965). Parâmetros sedimentológicos e físico-químicos como, pH, salinidade, temperatura e material em suspensão têm sido empregados em conjunto ao conhecimento das assembleias de foraminíferos. Índices ecológicos, como o de diversidade criado por Fisher et al. (1943) também têm auxiliado as investigações ambientais na Baía de Sepetiba, e no manguezal de Guaratiba, bem como os estudos paleoecológicos da área.

Zaninetti et al. (1976, 1977), em estudo taxonômico e ecológico no manguezal de Guaratiba, identificaram e caracterizaram assembleias de foraminíferos provenientes de amostras coletadas em canais de maré da região. Em 34 estações distribuídas pelos canais de maré de Guaratiba e seis na foz do Rio da Ponta, foram identificadas 58 espécies de foraminíferos bentônicos, com a dominância da Ordem Textulariida. Baseando-se no índice de diversidade α de Fisher et al. (1943), os autores sugeriram a compartimentação do manguezal em cinco regiões (Figura 31). O índice, que varia de 0 a 20, tem uma forte relação com a salinidade do ambiente: os menores valores estão associados a ambientes salinos e os maiores, a ambientes confinados a mixo-halinos.

Brönnimann et al. (1981 b), também realizaram estudos no Manguezal de Guaratiba, com o objetivo de caracterizá-lo do ponto de vista sedimentológico, geoquímico e biológico. Para isso, analisaram parâmetros ambientais como pH, salinidade, temperatura e material em suspensão em 76 estações distribuídas pelos principais canais de maré nas fácies Mangue, Caranguejo e Alga (Figura 32).

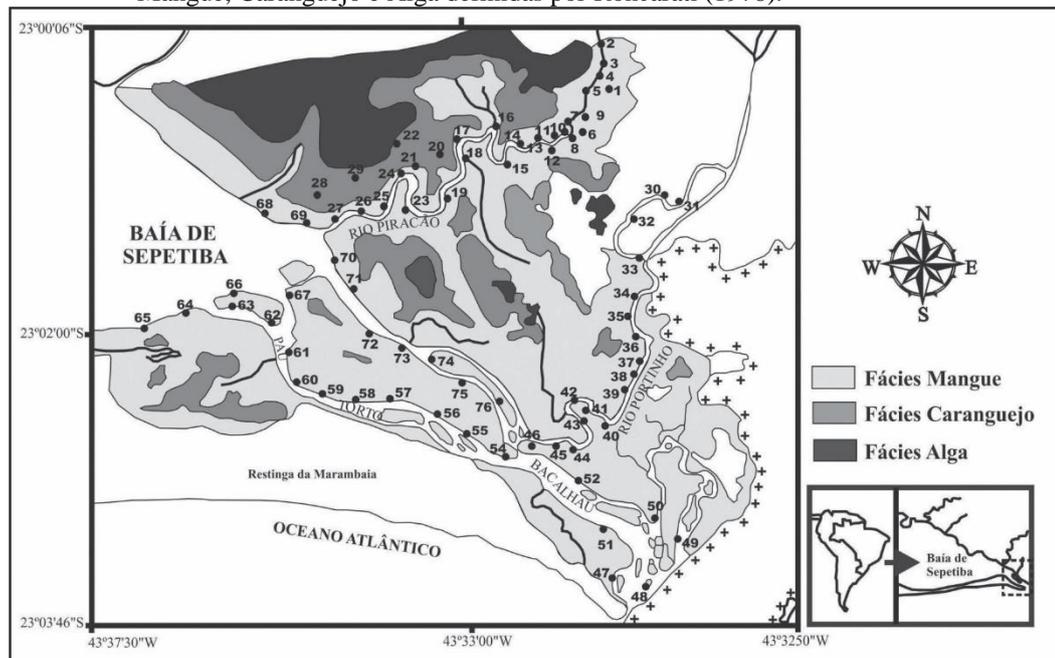
As águas do médio e baixo Rio Piracão apresentaram valores alcalinos (pH entre 7,1 e 8,1), enquanto que as do alto curso tenderam a ser ligeiramente ácidas (pH entre 6,6 e 7,0). Nas marés altas, águas dos cursos médio e baixo tornaram-se alcalinas enquanto as do alto curso ficaram mais ácidas. Este fato pode estar relacionado ao carreamento, pela água da chuva, de ácidos húmicos. Na maré alta, notou-se também que o canal apresenta salinidade maior – possuindo inclusive as maiores densidades de foraminíferos – e maior quantidade de material em suspensão.

Figura 31 – Divisão do Manguezal de Guaratiba segundo Zaninetti et al. (1976, 1977), baseada no índice de diversidade α de Fisher em associações de foraminíferos bentônicos.



Fonte: modificado de Zaninetti et al. (1976, 1977) por Laut et al. (2012).

Figura 32 – Malha amostral no Manguezal de Guaratiba (Brönniman et al. 1981b), no domínio das fácies Mangue, Caranguejo e Alga definidas por Roncarati (1978).



Fonte: Laut et al., 2012.

As águas do Rio Portinho são alcalinas tanto no seu baixo curso quanto no seu alto curso; porém na maré baixa as águas deste rio apresentaram um pH menor. Já a água dos canais do Bacalhau e do Pau Torto, em razão de serem largos e com ampla comunicação com o mar, apresentaram valores alcalinos (pH = 8,0-8,5) tanto na maré alta quanto na baixa.

Laut e Rodrigues (2011) retomaram 17 amostras coletadas e estudadas por Brönnimann (1981 a, b), a fim de realizarem uma revisão taxonômica e utilizarem índices ecológicos (diversidade α e dominância) e estatísticos (análises de agrupamento).

Os autores identificaram 34 espécies de foraminíferos aglutinantes e 7 de foraminíferos calcários, número bem menor do que o encontrado por Brönnimann et al. (1981b). No entanto, este número ainda é alto para um ambiente de manguezal conforme Boltovskoy (1965), que afirma ser comum uma média de 10 espécies para o ambiente.

Ao longo dos canais de maré, as espécies mais constantes foram *Arenoparrella mexicana*, *Haplophragmoides wilberti* e *Trochammina inflata*, registradas em todas as estações. Espécies calcárias, como as dos gêneros *Ammonia* e *Elphidium*, exibiram rara ocorrência. A análise de agrupamento em modo-Q, que associou a ocorrência das espécies a fatores como salinidade, temperatura e pH, resultou na divisão da fauna em três assembleias, em função da salinidade, fator que mais influenciou a distribuição das espécies – como já tinha sido observado por Brönnimann et al. (1981 a).

6.3 Foraminíferos bentônicos como indicadores de variações do nível do mar na Baía de Sepetiba

Os estudos sobre a variação no nível do mar na Baía de Sepetiba contaram primeiro com dados geológicos, geomorfológicos e mais recentemente, geocronológicos, como foi referido nas seções anteriores. Os dados microfaunísticos, mais precisamente relativos à fauna de foraminíferos bentônicos passaram a complementar essas investigações pretéritas, uma vez que estes organismos são extremamente sensíveis a mudanças ambientais.

Os trabalhos que investigam paleoambientes relacionados às variações do nível do mar na Baía de Sepetiba são baseados em amostras de testemunhos. Estes têm sido coletados na baía e na planície de maré (manguezal). No estudo desses testemunhos o conteúdo de foraminíferos foi amplamente empregado.

No testemunho TE (43°34'W; 23°02'S) com 5,30 m de comprimento e coletado na franja do manguezal de Guaratiba, Laut et al.(2006, 2009) identificou 69 espécies de foraminíferos. Houve predominância da ordem Textulariida (*Arenoparrella mexicana*, *Haplophragmoides wilberti*, *Trochammina inflata* e *T. macrescens*), seguida pela Ordem Rotalliida, com dominância de *Ammonia tepida* e *Quinqueloculina lamarckiana*. Este padrão está de acordo com uma fauna típica de manguezal, na qual predominam espécies aglutinantes (MURRAY, 1991, 2006).

Através de análises de agrupamento com os valores de abundância relativa, o autor reconheceu oito biofácies em TE, associando-as a períodos transgressivos e regressivos nos últimos 5.000 anos. Desta forma, foi assim realizado um dos primeiros trabalhos sistemáticos de investigação de oscilações do nível do mar no Holoceno que tinham como ferramentas principais as associações de foraminíferos bentônicos recuperadas em testemunho.

Em testemunhos localizados no interior da baía, como os testemunhos BS02 (43°49'W, 23°00'S), com 1,60 m e BS03 (43°47'W; 22°56'S), com 1,70 m, Silva (2006), realizou um estudo biofaciológico e paleocológico da fauna de foraminíferos na região (Figura 33). A autora identificou 108 espécies, sendo a maioria delas da Ordem Rotalliida, com dominância de *Buliminella elegantissima*, *Ammonia parkinsoniana* e *Bolivina spp.* Entre os textularídeos, houve dominância de *Textularia erlandi* e *Ammobaculites exiguus*, e a ordem que contou com menos espécies foi a dos miliolídeos, apesar de ocorrer em quase todos os níveis dos testemunhos. A fauna identificada nos níveis mais superiores de BS02 apresentou mais semelhanças com a do testemunho TE estudada por Laut et al.(2006), que correspondia a um registro de manguezal. Por isto, evidenciou maior influência sedimentar de canais de manguezal (LAUT et al., 2012).

Posteriormente, Laut et al. (2009) utilizou os valores de abundância relativa dos testemunhos TE, BS02 e BS03 em uma análise de agrupamento em Modo-Q. As assembleias resultantes deste agrupamento foram correlacionadas com datações em um testemunho coletado próximo a TE, que contava com as idades de ~6.130 anos AP para a profundidade de 5,20 m e 565 anos AP para profundidade de 1,82 m (PEREIRA e SANTOS, 2012).

Uma das assembleias identificada no testemunho TE, é composta principalmente por espécies aglutinantes como *Arenoparrella mexicana*, *Haplophragmoides wilberti* e *Trochammina inflata* e corresponderia ao estabelecimento do manguezal a partir de 1.200 anos, em um contexto de regressão que se estenderia até aos dias atuais. Autores como Suguio et al. (1985) têm reconhecido ao longo de toda a costa brasileira esta tendência de rebaixamento do nível do mar nos últimos 3.500 anos. No testemunho TE, esta assembleia foi

também identificada em um intervalo que corresponderia a 3.200 anos AP, convergindo com a ideia de fechamento da restinga da Marambaia e consequente processo regressivo descrito por Roncarati e Carelli (2012) a partir de 3.400 anos AP.

Figura 33 – Testemunhos TE, BS02 e BS03 na Baía de Sepetiba.



Fonte: modificado de Laut et al.(2012).

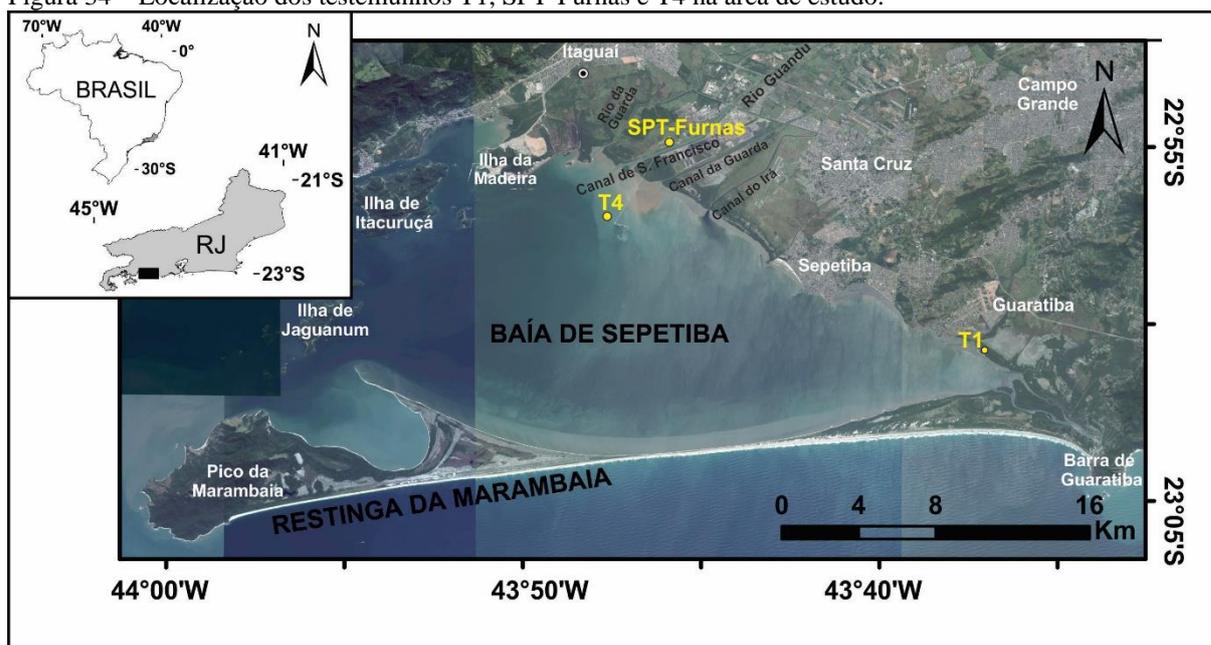
A assembleia A é composta principalmente por espécies aglutinantes como *Arenoparrella mexicana*, *Haplophragmoides wilberti* e *Trochammina inflata* e corresponderia ao estabelecimento do manguezal a partir de 1.200 anos, em um contexto de regressão que se estenderia até aos dias atuais. Autores como Suguio et al. (1985) têm reconhecido ao longo de toda a costa brasileira esta tendência de rebaixamento do nível do mar nos últimos 3.500 anos. No testemunho TE, esta assembleia foi também identificada em um intervalo que corresponderia a 3.200 anos AP, convergindo com a ideia de fechamento da restinga da Marambaia e consequente processo regressivo descrito por Roncarati e Carelli (2012) a partir de 3.400 anos AP.

7 METODOLOGIA

7.1 Localização e coleta dos testemunhos

Três testemunhos foram analisados no presente trabalho: T1, SPT-Furnas e T4. O testemunho T1 foi coletado no Manguezal de Guaratiba, correspondendo à zona de planície de maré inferior; o testemunho SPT-Furnas foi coletado em domínio continental, a 2 km da foz do Canal de São Francisco; e o testemunho T4, foi coletado em sedimentos de fundo da Baía de Sepetiba (Figura 34).

Figura 34 – Localização dos testemunhos T1, SPT-Furnas e T4 na área de estudo.



Fonte: modificado de Google Earth.

O testemunho T1 (latitude 23°00'S; longitude 43°37'W e com 480 cm de comprimento) foi coletado na planície de maré do Manguezal de Guaratiba, em maio de 2012, sob condições de maré baixa. Esta etapa ocorreu em colaboração com o Laboratório de Geologia Marinha da Universidade Federal Fluminense (LAGEMAR-UFF).

Para recolher o material, foi utilizado o Trado Russo, um amostrador manual que permite a coleta de seções sucessivas de 50 cm (Figura 35A,B). Com esta metodologia, foi possível a aquisição de um testemunho de 490 cm, dividido em nove seções de 50 cm.

Entretanto, considerando que entre cada seção houve uma perda de sedimento correspondente ao comprimento da ponteira do amostrador, a coluna recuperada totalizou 480 cm.

Figura 35 – Coleta do testemunho T1 no Manguezal de Guaratiba.



Legenda: A- coleta manual dos sedimentos com o Trado Russo no Manguezal de Guaratiba; B-seção recém-recolhida, ainda no amostrador.

Fonte: A autora, 2012.

Ainda em campo, as seções recolhidas em tubos de PVC foram identificadas de acordo com sua profundidade, receberam marcação de “base” e “topo” e foram envolvidas com filme plástico, para evitar o ressecamento entre a coleta e o transporte até a universidade.

O testemunho SPT-Furnas (latitude 22°55’S; longitude 43°46’W e com 50 m de comprimento) foi coletado em outubro de 2013, em colaboração com o Laboratório de Geologia Sedimentar da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Lagesed – UFRJ). A área de sondagem está localizada nas dependências da Usina Termoelétrica de Santa Cruz, no Distrito Industrial de Santa Cruz, zona oeste do município de Rio de Janeiro (RJ). A usina atualmente se encontra sob a responsabilidade do Sistema Furnas de geração de energia.

A Figura 36 (A, B) apresenta a estrutura da sonda rotativa MACH 1200, utilizada para coletar o testemunho SPT-Furnas. Em sucessivas sessões de 1,50 m, foram recolhidos sedimentos inconsolidados, que formaram a coluna sedimentar recuperada (Figura 34C). Cada sessão foi guardada em caixas de madeira com identificações referentes ao nome do

testemunho, à profundidade, e às indicações de topo e base, para serem conduzidas ao Lagesed – URFJ.

Figura 36 – Coleta do testemunho SPT-Furnas, próximo ao canal do Rio São Francisco.



Legenda: A e B - Estrutura da sonda MACH 1200; C - Seções sedimentares recém-recolhidas na sondagem.

Fonte: A autora, 2013.

O testemunho T4 (latitude 22°57'S; longitude 43°47'W e com 286 cm de comprimento), foi coletado sob lâmina d'água de 3,00 m. O procedimento foi realizado em julho de 2015 e contou com uma equipe de mergulhadores e embarcação da empresa Husky Duck (Figura 37 A, B). Foram coletados também mais dois testemunhos (T2 e T3) que serão estudados posteriormente. O testemunho T4 foi selecionado para este trabalho por ser o mais longo.

Em tubos de PVC com 75 mm de diâmetro, foram recolhidos manualmente sedimentos de fundo, através de percussão. Ainda na embarcação, os testemunhos foram

marcados com as indicações “topo” e “base” e refrigerados em caixas de isopor com gelo. Posteriormente, foram conduzidos ao Laboratório de Micropaleontologia da Faculdade de Geologia – UERJ (FGEL-UERJ), onde foram mantidos refrigerados até ao início do trabalho laboratorial.

Figura 37 – Coleta do testemunho T4 na Baía de Sepetiba.



Legenda: A, B -.Preparação para a coleta dos testemunhos na Baía de Sepetiba, com tubos de PVC.
Fonte: A autora, 2015.

7.2 Abertura, descrição e amostragem dos testemunhos

7.2.1 Testemunho T1

No Laboratório de Micropaleontologia da Faculdade de Geologia da UERJ, as seções componentes do testemunho T1 foram desembulhadas do filme plástico, fotografadas e descritas macroscopicamente de acordo com características como: granulometria, cor, estruturas sedimentares, presença de fragmentos biogênicos (raízes, e conchas) de acordo com a metodologia de Figueiredo Jr (1990).

Após ser descrito macroscopicamente, o testemunho T1 foi subamostrado em intervalos de 5 cm para que fossem realizados os procedimentos para as análises geoquímicas, granulométricas e micropaleontológicas.

7.2.2 Testemunho SPT-Furnas

No testemunho SPT-Furnas foram registradas características como granulometria, estruturas sedimentares, cor e conteúdoossilífero. Esses atributos foram empregados na determinação das litofácies, de acordo com o modelo proposto por Selley (1970), e foram registrados sob a forma de perfis estratigráficos confeccionados manualmente e posteriormente, digitalizados.

Em seguida, foi realizada a amostragem a cada 5 cm em função da grande extensão da coluna sedimentar. As amostras, com espessuras entre 1 e 5 cm, foram recolhidas em sacos plásticos identificados com o nome do testemunho e a profundidade de cada amostra. Todas as etapas descritas foram realizadas no Lagesed – UFRJ.

7.2.3 Testemunho T4

No Laboratório de Oceanografia Geológica da Faculdade de Oceanografia da UERJ, o testemunho T4 foi ligeiramente descongelado antes de ser aberto e amostrado. Os tubos de PVC nos quais ele foi coletado foram cortados longitudinalmente com uma serra manual de disco (Figura 38).

Neste testemunho não foram determinadas as litofácies, e realizada a descrição textural, que também resultou em perfil estratigráfico digitalizado.

As amostras no testemunho T4 foram coletadas a cada 2 cm, pesadas e secas em estufa a 50°C. Depois de secas, as amostras foram novamente pesadas, armazenadas em sacos plásticos devidamente referenciados.

Figura 38 – Abertura do testemunho T4, com serra manual, no Laboratório de Oceanografia Geológica/Faculdade de Oceanografia UERJ.

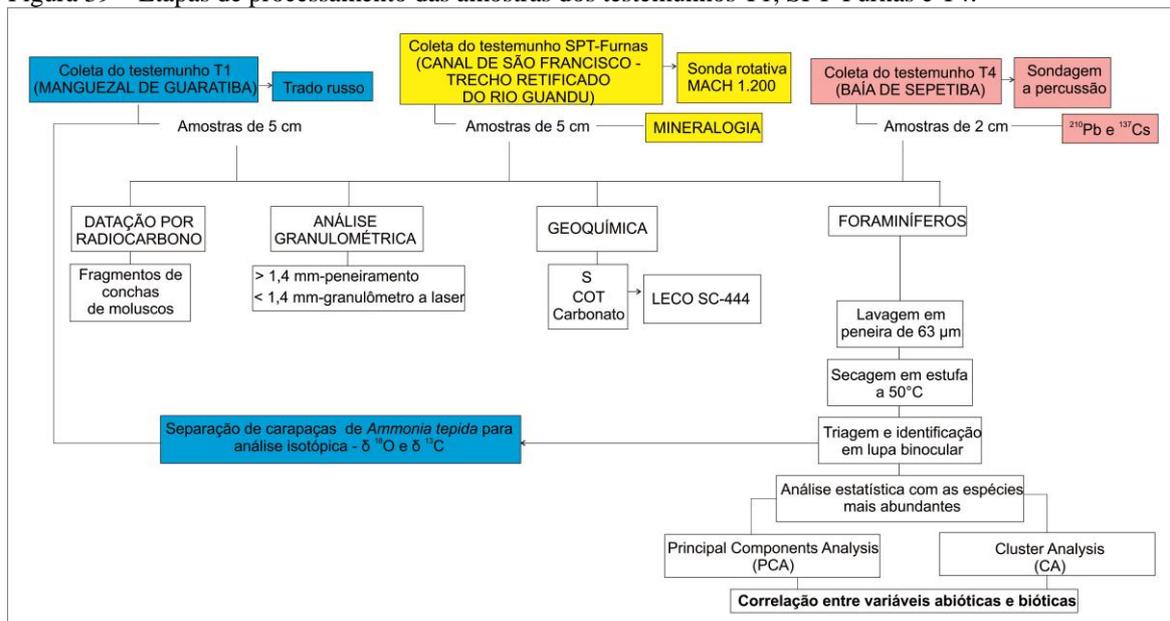


Fonte: A autora, 2017.

7.3 Processamento

A Figura 39 mostra um esquema com as etapas do processamento das amostras dos testemunhos, desde a amostragem dos testemunhos até as análises estatísticas.

Figura 39 – Etapas de processamento das amostras dos testemunhos T1, SPT-Furnas e T4.



Nota: alguns procedimentos foram utilizados exclusivamente em um dos testemunhos analisados (cores diferentes)

Fonte: A autora, 2017.

7.3.1 Granulometria

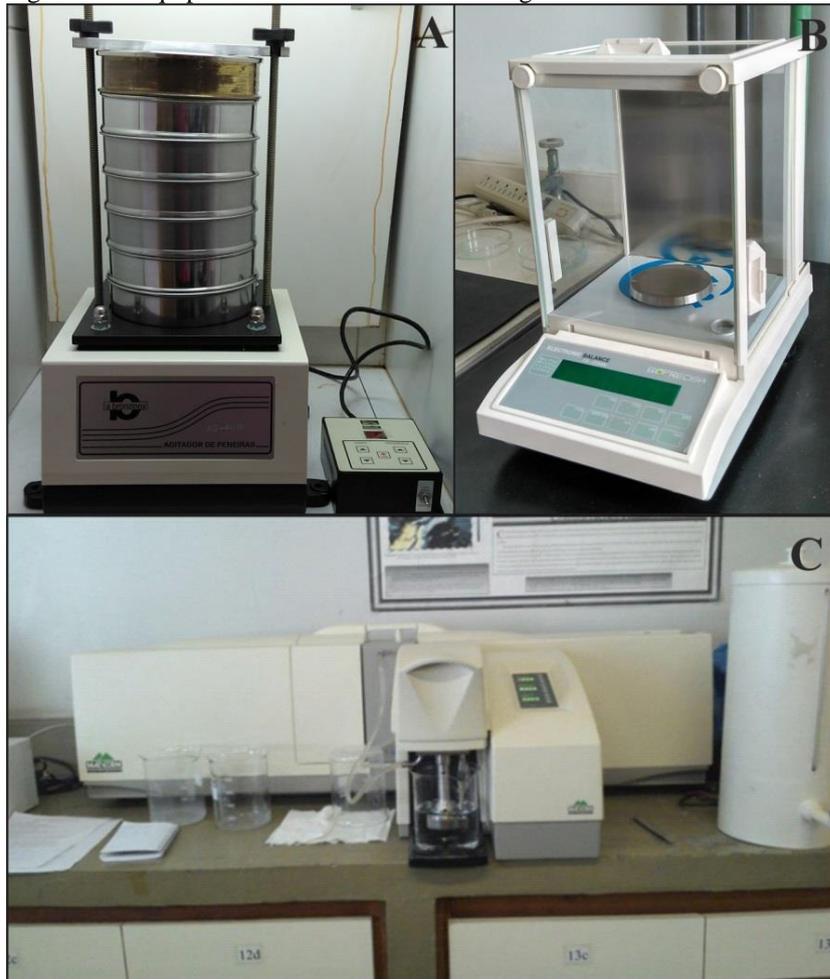
A primeira etapa consistiu em secar as amostras de sedimento total destinadas à granulometria, para a determinação do peso seco inicial. Em seguida, as amostras foram lavadas com água destilada, em peneira de 63 μm para a separação dos sedimentos arenosos ($>63 \mu\text{m}$) e dos sedimentos finos ($<63 \mu\text{m}$). Tanto a fração $>63 \mu\text{m}$ como a fração $<63 \mu\text{m}$ foram recolhidas em béqueres e foram secas em estufa, em 50°C .

Após secarem, as frações arenosas e as frações finas foram pesadas e guardadas em sacos plásticos identificados com a referência da respectiva amostra.

Nos testemunhos SPT-Furnas e T4, a análise granulométrica da fração $>63 \mu\text{m}$ foi realizada por peneiramento a seco numa série de peneiras com as seguintes aberturas de 2.000 μm , 1.000 μm , 500 μm , 250 μm , e 125 μm (Figura 40A,B). O peso retido em cada uma dessas peneiras foi registrado, para o cálculo das porcentagens das frações de cascalho, grânulo, areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina, respectivamente, de acordo com classificação granulométrica de Udden (1914) e Wentworth (1922). A fração fina foi classificada genericamente como sedimentos finos.

No testemunho T1, os conteúdos de matéria orgânica e carbonato foram eliminados com respectivamente, 5 ml de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 10% e 5 ml de ácido clorídrico (HCl) a 30%. Livres de matéria orgânica e carbonatos, os sedimentos foram levados a peneiras com intervalos de 0,5 ϕ para a quantificação dos grãos mais grossos ($>1,4 \text{ mm}$). Os mais finos ($<1,4 \text{ mm}$) foram levadas a um granulômetro a laser modelo *MasterSizer2000*, que baseia-se na utilização da resposta da difração de raios laser na determinação do tamanho das partículas (Figura 40 C). O espectro de leitura do granulômetro é na faixa de 1 a 2 mm; por estas especificações técnicas, os grãos das amostras não devem ter diâmetro maior que 1,0 mm (MASTERSIZER2000, 2007).

Figura 40 – Equipamentos utilizados na análise granulométrica.

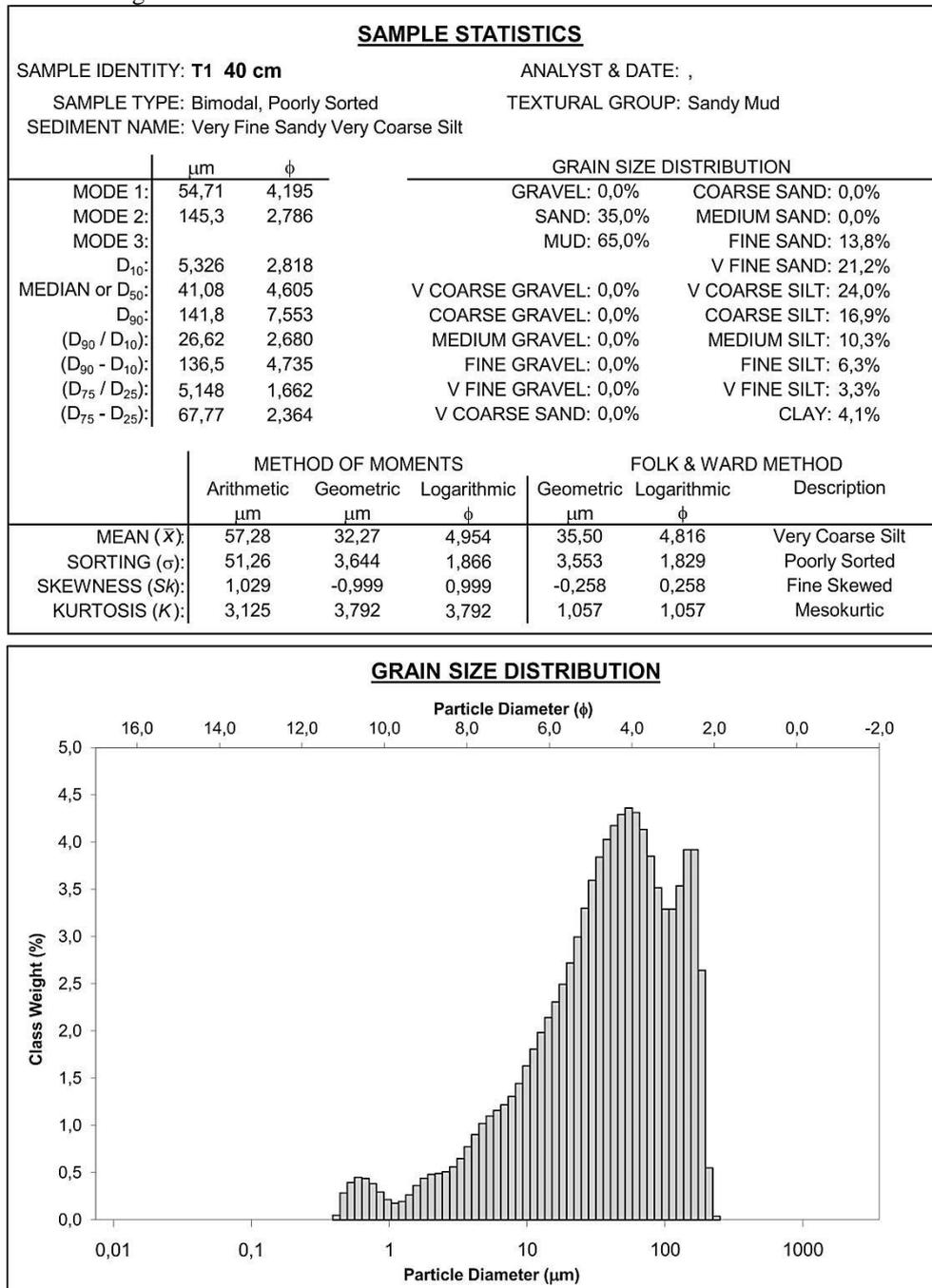


Legenda: A-Conjunto de peneiras no agitador; B - Balança para pesar as frações granulométricas; C-Granulômetro a laser modelo MasterSizer2000.

Fonte: A autora, 2017.

Os dados de granulometria foram tratados estatisticamente no programa Gradistat v8 com base em *Excel* (BLOTT e PYE, 2001), que calcula os parâmetros estatísticos como: média granulométrica, desvio-padrão (seleção), curtose e assimetria, de acordo com Folk e Ward (1957) (Figura 41).

Figura 41 – Exemplo de arquivo pdf. gerado no programa Gradistat com os dados estatísticos de granulometria de uma amostra do testemunho T1.



Fonte: modificado de Gradistat v 8 (BLOTT e PYE, 2001).

7.3.2 Datação por Carbono 14

Conchas de moluscos recuperadas em três níveis do testemunho T1, quatro níveis do testemunho SPT-Furnas, e conchas e matéria orgânica de dois níveis do testemunho T4 foram

datadas pelo método do radiocarbono (^{14}C), por espectrometria de massa com aceleradores (AMS na sigla em Inglês), no Laboratório Beta Analytic Inc. (Flórida, EUA). O método fornece idades convencionais em anos antes do presente (anos AP), que foram depois calibradas em anos AP (anos cal. AP).

O efeito de reservatório, que atua sobre os carbonatos marinhos, foi corrigido pelo programa de calibração Marine IntCal13 – calibração 2-sigma. O programa é aplicado sobre as datas de radiocarbono determinadas, e a correção abrange a ordem entre – 200 e 500 anos (REIMER et al., 2013; TALMA e VOGEL, 1993). Valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram também obtidos no material usado para datação e utilizados na calibração das idades de C^{14} .

Através da interpolação das datações obtidas, foram estabelecidos modelos de idade e efetuadas estimativas de taxa de sedimentação para os três testemunhos.

7.3.3 Datação por Pb^{210} e Cs^{137} – taxas de acumulação de sedimentos

Por apresentar o topo não perturbado e uma boa preservação da coluna sedimentar, o testemunho T4 teve os níveis mais superiores datados por ^{210}Pb e ^{137}Cs . Assim, a taxa de acumulação de sedimentos ao longo do testemunho T4 foi determinada, com datações por ^{210}Pb e ^{137}Cs e por radiocarbono. Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Química Inorgânica Marinha, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IO-USP).

Cerca de 5g de sedimentos secos de cada amostra foram selecionados, desagregados em almofariz de porcelana, guardados em recipientes de plástico e envolvidos por filme de plástico. Assim guardados, foram enviados para o Instituto Oceanográfico da Universidade de S. Paulo, onde foram realizadas as análises.

Na determinação das atividades de ^{210}Pb e ^{137}Cs foi aplicada metodologia descrita por Figueira et al. (1998; 2007) e Saito et al. (2001 a; b). As atividades dos referidos isótopos foram determinadas por espectrometria direta de raios gama, utilizando um detector de Ge EG&G hiperpuro, modelo 25190P, de fundo baixo. A resolução média do método é para picos de ^{60}Co entre 1.90 keV e 1332.40 keV. A atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (via total ^{210}Pb - ^{226}Ra após 21 dias para estabelecer o equilíbrio radioativo) foi medida no pico de 46 keV, e a do ^{137}Cs , em 661,66 keV.

O cálculo das taxas de acumulação baseadas no radionuclídeo instável Pb^{210} ($^{210}Pb_{xs}$) foi baseado no Modelo de Concentração Inicial Constante (*Concentration Inicial Constant*, CIC), estabelecido por Appleby e Oldfield (1978) e Joshi e Shukla (1991).

A fórmula para este cálculo é apresentada na equação 4:

$$S = \frac{\lambda \cdot D}{\ln \left(\frac{C_{0\ Pb-210}}{C_{210Pb}} \right)} \quad (4)$$

onde:

S é a taxa de acumulação em $cm \cdot ano^{-1}$; $C_{0\ Pb-210}$ é a quantidade de Pb instável no topo do testemunho; $C_{0\ Pb-210}$ é quantidade de Pb instável em determinada profundidade do testemunho; λ é a constante de decaimento radioativo do ^{210}Pb , igual a $0,31076\ anos^{-1}$, e D é a distância entre o topo do testemunho e a profundidade considerada.

Para o cálculo das taxas de sedimentação baseadas nos registros de ^{137}Cs , foi necessário identificar o pico de maior intensidade correspondente a 1964, ano de maior intensidade de emissão do radionuclídeo em testes nucleares (ROBBINS e EDGINGTON, 1975). Alguns autores como Appleby (1991), entretanto, utilizam a queda nos valores de Cs desde o acidente nuclear de Chernobyl em 1986 para datar amostras mais ao topo dos testemunhos (FIGUEIRA et al., 2007).

O cálculo é feito através da proporção entre a profundidade da coluna sedimentar e o período entre 1964 e o ano da amostragem do testemunho.

7.3.4 Carbonato ($CaCO_3$), Carbono Orgânico Total (COT) e Enxofre Total (S)

O procedimento para a determinação das porcentagens de $CaCO_3$, COT e S foi realizado no Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica da Faculdade de Geologia da UERJ.

A primeira etapa consistiu na pulverização das amostras em um almofariz de ágata e passagem das mesmas em peneira de 80 mesh, sendo a fração mais fina utilizada e acondicionada em frascos com as respectivas profundidades. Então, foi realizado o ataque ácido com HCl a 50% durante aproximadamente 12 horas, com o objetivo de se eliminar os carbonatos. Após a acidificação, as amostras foram lavadas por cinco vezes, sendo a primeira lavagem feita com água destilada a $100^\circ C$ e as outras lavagens em temperatura ambiente,

eliminando-se assim os cloretos formados pelo HCl. Por fim, as amostras foram secas em banho de luz a 80°C e pesadas novamente. As pesagens realizadas antes e depois da acidificação forneceram a quantidade de carbonatos eliminados da amostra, em porcentagem de massa. A quantidade de sedimento que não foi eliminada neste processo é chamada de resíduo insolúvel (R.I.) e com base nestes valores foram calculadas as porcentagens de (CaCO₃).

As amostras, já livres de CaCO₃, foram levadas ao equipamento LECO SC- 444 e submetidas a uma temperatura de 1.350°C até a sua combustão total. Durante a combustão, o CO₂ que se desprende foi carregado até a célula de infravermelho e detectado, assim como o enxofre sob a forma de SO₂. Com a calibração baseada em amostras-padrões introduzidas antes e depois das análises, as quantidades de CO₂ e SO₂ detectadas forneceram diretamente as porcentagens em peso de COT e S, em função de ter sido utilizado o peso inicial da amostra antes da acidificação.

7.3.5 Isótopos de carbono e oxigênio ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$)

As razões isotópicas $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ foram determinadas em testas da espécie de foraminífero bentônico *Ammonia tepida*, cuja constância e preservação numa seção intermediária do testemunho T1 se mostraram adequadas.

Os valores de isótopos estáveis de carbono e oxigênio foram obtidos em 10 a 15 espécimes de *Ammonia tepida*, espécie mais comum entre as calcárias da fauna de foraminíferos bentônicos na Baía de Sepetiba (BRÖNNIMANN et al., 1981 a, b). No entanto, as análises isotópicas foram realizadas somente em testas de *A. tepida* recuperadas de sedimentos do testemunho T1, onde apresentaram melhor estado de preservação e uma presença constante numa seção deste testemunho, como referido. Os procedimentos desta etapa foram realizados no Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica da Faculdade de Geologia da UERJ.

As testas foram primeiramente lavadas em ultrassom com água destilada, a fim de eliminar impurezas e pulverizados em moinho de disco orbital. O pó resultante foi separado e guardado em recipiente de vidro. Cada amostra foi colocada para reagir com ácido ortofosfórico a 100%, em temperatura de 25°C, durante 12 horas. O gás carbônico eliminado durante a reação foi extraído em uma coluna de alto vácuo usando purificação criogênica de

acordo com método proposto por Craig (1957), e direcionado ao equipamento “Kiel IV Carbonate Devise” e o analisador “Delta V Plus – Isotope Ratio MS” (Thermo Scientific), que forneceram as razões isotópicas. Os resultados obtidos foram comparados a um padrão de CO₂ gasoso obtido das testas de belemnites (molusco fóssil *Beleminitela americana* da Formação Peedee, no estado da Carolina do Norte, EUA) – Pee Dee Belemnite (PDB). Assim, os dados de carbono e oxigênio são mostrados pelo parâmetro δ definido por: $\delta (\text{‰}) = [R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}/R_{\text{padrão}}] \times 1000$. Neste parâmetro, os valores de R correspondem a C¹³/C¹² ($\delta^{13}\text{C}$) e O¹⁸/O¹⁶ ($\delta^{18}\text{O}$). A acurácia da análise é de 0,030 ‰.

7.3.6 Análise mineralógica

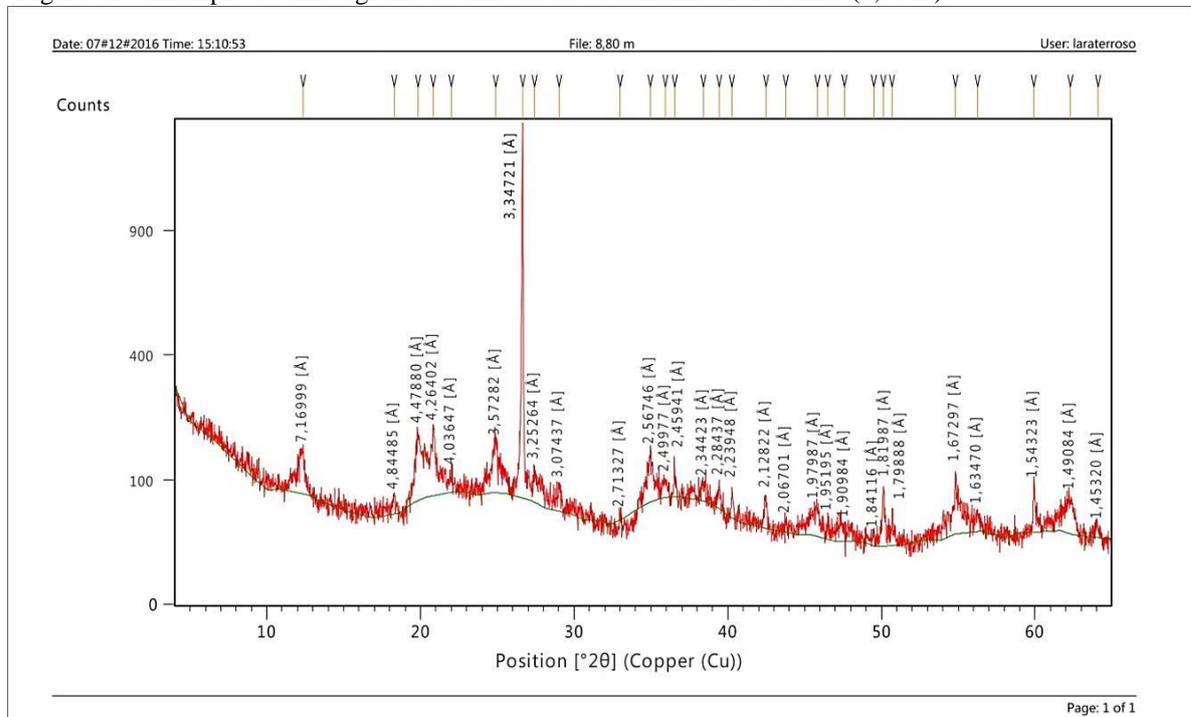
O resíduo da lavagem do sedimento para análise da microfauna, ou seja, com material <63 μm , foi recolhido em béqueres de 1000 ml para secarem em estufa, a 50°C. No testemunho SPT Furnas, este material, depois de seco, foi encaminhado para análise mineralógica por Difração de Raios-X (DRX) no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, Portugal.

Esta técnica permite identificar e semi-quantificar os minerais presentes no sedimento. Uma vez que a fração areia é essencialmente constituída por quartzo, a abundância elevada deste mineral encobre a presença de outros minerais presentes na amostra; por isso, a fração fina (<63 μm) foi selecionada para a análise de DRX. A fração fina foi desagregada em almofariz de ágata, cuidadosamente, para que a granulometria não fosse alterada. Cerca de 3 g deste material fino já desagregado são colocados em porta-amostras “*standard*” de alumínio de base móvel do difratômetro de raios X, comprimindo levemente o pó, para não ser conferida uma orientação preferencial aos cristais, de acordo com recomendação de Schultz (1964) e Thorez (1976). A análise permite identificar minerais tais como: quartzo, feldspato, filossilicatos calcita, sulfuretos, anidrita, entre outros (<63 μm).

Os dados são exibidos em forma de difratogramas (Figura 42), obtidos segundo metodologia descrita por Martins et al. (2007) e Martins et al. (2011a) O difratômetro utilizado na obtenção dos dados foi da marca Philips X’ Pert (Figura 43) constituído por um gerador PW 3040, um goniômetro PW 3050/60, um controlador difratométrico PW 1710 e um registador PM 8230A. Foi utilizada a radiação K α Cu ($\lambda=1,5405 \text{ \AA}$), com monocromatizador

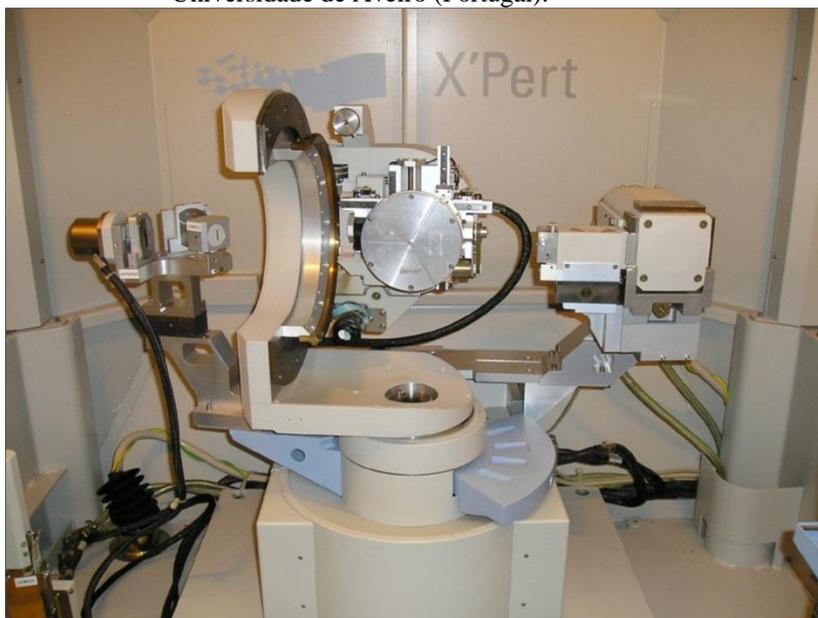
de grafite e fenda de divergência automática e um filtro de níquel. As condições operacionais foram as seguintes: 30mA, 50Kv, velocidade do goniômetro de 1o 2 θ por minuto.

Figura 42 – Exemplo de difratograma de amostra do testemunho SPT-Furnas (8,80 m).



Fonte: A autora, 2017.

Figura 43 – Difratorômetro de Raios X, modelo Philips X'Pert, na Universidade de Aveiro (Portugal).



Fonte: Laboratório Central de Análises- Universidade de Aveiro. Disponível em: < <https://www.ua.pt> > . Acesso em: 13 de fevereiro de 2017.

Os difratogramas obtidos foram interpretados com base nos arquivos do JCPDS (Joint Committee for Powder Diffraction Standards), que reúnem dados estruturais retirados de difratogramas de mais de 2.000 espécies minerais-padrão.

Para a análise semi-quantitativa das amostras, foram calculados os valores das áreas dos picos máximos de intensidade das espécies minerais registados nos difractogramas, e pela divisão deste resultado pelo poder refletor respectivo, referenciados por Martins et al. (2007). Os resultados obtidos são depois convertidos em porcentagens relativas, considerando a sua soma igual a 100 (GOMES, 1988).

7.3.7 Foraminíferos

Neste trabalho optou-se por basear a análise microfaunística considerando a densidade de foraminíferos num volume constante de sedimento (10 ml) recolhido ao longo dos testemunhos analisados. O sedimento total inicial foi lavado com água destilada em peneira com abertura de 63 μm .

As testas triadas foram fixadas com goma arábica em lâminas quadriculadas de fundo escuro, identificadas e contadas, sob lupa binocular (UEHARA et al., 2007). A matriz de dados microfaunísticos foi construída com base na contagem do número de indivíduos de cada espécie por amostra no volume de 10 ml. Foi também determinada a riqueza específica de espécies em cada amostra.

Algumas espécies foram fotografadas, após metalização com ouro paládio, a fim de torná-los condutoras em microscópio eletrônico de varredura (MEV), no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, Portugal, e no Departamento de Estratigrafia e Paleontologia da UERJ (DEPA-UERJ).

A identificação das espécies foi baseada em trabalhos de vários autores como Cushman e Brönnimann (1948 a), Loeblich e Tappan (1964), Tinoco (1965), Yassini e Jones (1995), Debenay et al. (1998), Debenay et al. (2001 a) Semensatto-Jr. e Dias-Brito (2004), Murray (2006) e Laut et al. (2012).

Os nomes das espécies foram atualizados de acordo com o catálogo online WorMS (www.marinespecies.org), acessado entre janeiro e dezembro de 2016.

7.3.8 Tratamento estatístico: análises multivariadas

As análises multivariadas foram realizadas no programa Statistica 12.0 (StatSoft). Somente as espécies mais abundantes e frequentes foram consideradas na análise estatística, que teve como objetivo relacionar dados bióticos e abióticos.

Antes de serem tratados, os dados foram transformados logaritmicamente [$\log(x+1)$], a fim de se aproximarem da normalização. Em cada testemunho uma seleção de dados foi submetida a Análise Cluster (*Cluster Analysis* – CA) em modo-R, para avaliar as relações entre os parâmetros bióticos e abióticos e foram determinadas as correlações entre as amostras. Foram consideradas correlações significativas, as que possuíam $p > 0,05$. Nestas análises, são gerados dendrogramas, nos quais podem ser visualizados os grupos de acordo como suas similaridades. Para fins de agrupamento de variáveis aplicou-se o Método de Ward (variância mínima).

Foi empregada também a Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis* – PCA) para identificar os principais fatores que controlam a distribuição das espécies ao longo dos testemunhos. A visualização destas relações é feita através de diagramas e da plotagem dos valores dos *scores* dos fatores da PCA em gráficos e tabelas.