

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA E GEOLOGIA MARINHA – LAGEMAR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

SÍSMICA RASA DE ALTA RESOLUÇÃO NA LAGOA DE ARARUAMA

Yuri Fieschi-Lavagnino Camargo Gripp Bezerra

Niteroi – RJ,
Janeiro de 2014

B574 Bezerra, Yuri Fieschi-Lavagnino Camargo Gripp
Sismica Rasa de Alta Resolução na Lagoa de Araruama / Yuri
Fieschi-Lavagnino Camargo Gripp Bezerra. – Niterói : [s.n.], 2014.
36 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geofísica) –
Universidade Federal Fluminense, 2014.

1.Sismica Rasa de Alta Resolução. 2.Lagoa de Araruama .
3.Geofísica. 4.Métodos geofísicos. I.Título.

CDD 551.22098153

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA E GEOLOGIA MARINHA – LAGEMAR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

Yuri Fieschi-Lavagnino Camargo Gripp Bezerra

Trabalho de conclusão de curso submetido ao programa de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Geofísica.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dsc. José Antonio Baptista Neto

Prof. Dsc. Cleverson Guizan Silva

Prof. Dsc. Arthur Ayres Neto

Prof. Dsc. Gilberto Tavares de Macedo Dias

Niterói – RJ,
Janeiro de 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me ter dado essa possibilidade de estar realizando este trabalho junto à faculdade e sempre me amparar em momentos difíceis.

À minha mãe, Lillian Fieschi-Lavagnino Camargo, presente em todos os momentos na minha vida, sejam eles de glórias ou de dificuldades. Na parte acadêmica sempre me proporcionou o melhor, se não fosse ela não estaria cursando esta faculdade. Além de ser um exemplo de mulher, sempre no intuito de me tornar o melhor ser humano possível, me educando com muito carinho e amor, a fim de ver eu me tornar um profissional ético com um futuro vitorioso.

Ao professor Gilberto Dias e ao Dieter Muehe por doarem as linhas sísmicas que foram base do estudo. Agradeço também meu orientador José Antônio Baptista Neto e aos professores Cleverson Guizan Silva, Arthur Ayres e Alberto Figueiredo pela oportunidade de dividir seus conhecimentos, pelo aprendizado que sempre levarei comigo e por estarem tornando possível a realização deste trabalho.

A todos meus colegas de classe que ingressaram no ano de 2009. Alguns mais presentes, em especial meu amigo Igor Arêas, que sempre me apoiou e incentivou nos estudos durante estes cinco anos, mas todos de alguma forma contribuíram e estão marcados na minha vida. Jamais me esquecerei de vocês.

À minha namorada Andrea Biato pela compreensão e apoio em momentos difíceis durante a realização deste trabalho. Está sendo muito importante nessa etapa da minha vida, contribuindo positivamente na minha formação. Obrigado por tudo, espero contribuir da melhor forma possível com muito amor e carinho.

RESUMO

Com o objetivo de se caracterizar os processos sedimentares e a evolução geomorfológica da Lagoa de Araruama (Rio de Janeiro), foram utilizados perfis sísmicos de alta resolução operando na frequência de 7 kHz, associados às características dos sedimentos de fundo da Lagoa. A sísmica rasa é um método geofísico que investiga com exatidão camadas e estruturas em pequenas profundidades, como no caso da Lagoa de Araruama. A Lagoa foi estudada de forma abrangente, desde a sua origem Pleistocênica, até os processos erosivos e sedimentares que atuam sobre ela nos dias de hoje. Ao longo do estudo, também serão analisadas outras características da Lagoa, como a espessura da camada de lama e a que profundidade o embasamento se encontra.

Palavras-chave: Sísmica Rasa de Alta Resolução, Lagoa de Araruama, espessura da camada de lama, embasamento.

ÍNDICIE DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** - Localização da área de estudo, a partir do mapa do Brasil, posteriormente o do Estado do Rio de Janeiro com enfoque na Lagoa de Araruama (Fonte: IBGE)..... **pág. 2**
- Figura 2** - Compartimentação tectônica da borda sul do Cráton do São Francisco, em destaque o Domínio Cabo Frio (Fonte: Heilbron, 1999)..... **pág. 3**
- Figura 3** - Mapa geológico da planície costeira do Domínio Cabo Frio (Fonte: CPRM) **pág. 4**
- Figura 4** - Esquema sintético da estratigrafia da área de estudo, inferindo as seqüências a partir dos estudos de Azevedo Jr. (1991) e Silva (1992) e Martin (1997)..... **pág. 4**
- Figura 5** - Mapa da Lagoa de Araruama, com os esporões lagunares da parte sul em destaque (Fonte: Google Earth)..... **pág. 6**
- Figura 6** - Mapa ilustrativo batimétrico do fundo da Lagoa de Araruama (Fonte: Fundação COOPPETC/UFRJ)..... **pág. 8**
- Figura 7** - Mapa da cobertura sedimentar da Lagoa de Araruama (Fonte: Projeto Planágua/CNA, 1984). **pág. 9**
- Figura 8** - Mapa da Bacia Hidrográfica da Lagoa de Araruama, Rio de Janeiro (Fonte: Projeto Planágua Semads/GTZ).....**pág. 10**
- Figura 9** - Mapa de localização das 17 fontes de esgoto consideradas na Lagoa de Araruama (Fonte: Fundação COOPPETC/UFRJ).....**pág. 11**
- Figura 10** - Demonstração da Lei de *Snell* para onda P incidente em uma interface (Fonte: Applied Geophysics, 2nd Edition, W.M. Telford, L.P Geldart & R.E. Sheriff (1990).....**pág. 14**
- Figura 11** - Demonstração de uma aquisição sísmica realizada a partir de um *Sub-Bottom Profiler* (Fonte: www.geostar-surveys.com)..... **pág. 17**
- Figura 12** - Mapa de localização das linhas sísmica que serão interpretadas (Fonte: Muehe, D/Modificado: Yuri)..... **pág. 18**
- Figura 13** - Perfil de sub-superfície (segmento 15 → 17) ilustrando o ecocaráter do tipo I, com um banco de areia em destaque (Fonte: Muehe, D).....**pág. 19**
- Figura 14** - Perfil de sub-superfície (segmento A-6 → 11) ilustrando o ecocaráter do tipo II (Fonte:Muehe,D).....**pág. 20**
- Figura 15** - Perfil de sub-superfície (segmento 14 → 16) ilustrando o ecocaráter do tipo III (Fonte: Muehe, D).....**pág. 20**

Figura 16 - Perfil de sub-superfície (segmento 9 → 10) ilustrando o ecocaráter do tipo III. Nota-se a presença de um paleo-canal sobre a calha longitudinal da lagoa.....**pág. 21**

Figura 17 - Perfis de subsuperfície que evidenciam o paleocanal principal da Lagoa de Araruama (Fonte: Muehe,D/Adaptado: Yuri).....**pág. 22**

Figura 18 - Trajeto do paleocanal principal da Lagoa de Araruama (Fonte: Muehe,D/Adaptado: Yuri).....**pág. 23**

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES	V
1 – INTRODUÇÃO.	pág. 01
2 – ÁREA DE ESTUDO.	pág. 02
2.1 Localização.	pág. 02
2.2 Contexto Geológico	pág. 03
2.3 A formação da Lagoa de Araruama.	pág. 04
2.3.1 A Teoria de formação dos esporões.	pág. 06
2.4 Geomorfologia Regional.	pág. 07
2.4.1 Batimetria.	pág. 07
2.4.2 Cobertura Sedimentar.	pág. 08
2.5 Bacia Hidrográfica.	pág. 09
2.6 Impactos Ambientais.	pág. 10
3 – LEVANTAMENTO DE SÍSMICA RASA.	pág. 12
3.1 Fundamentos.	pág. 12
3.2 Tipos de Ondas.	pág. 12
3.2.1 Propagação das Ondas Acústicas.	pág. 13
3.2.2 Interação das Ondas Sísmicas.	pág. 14
3.3 Sismoestratigrafia em Sísmica Rasa.	pág. 16
4 – METODOLOGIA	pág. 16
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	pág. 18
6 – CONCLUSÃO	pág. 24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	pág. 25

1 - INTRODUÇÃO

A coleta e análise de amostras superficiais, ou de testemunhos, apesar de ser um método de observação direta, não representam uma visão lateral da continuidade do pacote sedimentar. Neste sentido, a integração de métodos geofísicos permite uma visão da subsuperfície do ambiente, assim a sísmica rasa de alta resolução, normalmente operando entre 3,5 e 12 kHz é um método consagrado de investigação do fundo marinho em ambientes costeiros. O padrão do eco é resultado da interação entre o fundo e o pulso da energia usada como fonte, pois o retorno do eco é afetado pelo tipo de sedimento, suas camadas, e pelas estruturas e rugosidade do fundo (FLOOD, 1980). No Brasil, vários trabalhos têm utilizado sísmica de alta frequência com o intuito de determinar os processos sedimentares, geomorfologia do fundo, espessura do pacote sedimentar e evolução sedimentar em ambientes costeiros (AYRES, 2000; BAPTISTA NETO et al., 1996; CATANZARO et al., 1996; GUIMARÃES et al., 2004; SILVA et al., 2004; DIAS et al., 2000 & QUARESMA et al., 2000). Este fato está relacionado ao bom imageamento das estruturas geológicas de subsuperfície, podendo ser interpretadas em tempo real com os dados brutos.

O principal objetivo do trabalho é caracterizar geomorfologicamente o fundo da Lagoa de Araruama, com base nos registros sísmicos de alta resolução (7 kHz) que foram gerados. Além disso, estudar a espessura do pacote sedimentar, a presença de paleocanais, bancos de areia, e se possível determinar a profundidade do embasamento acústico. Portanto, espera-se desse trabalho uma correlação entre seus processos formadores, sua história evolutiva, e a sismoestratigrafia encontrada na Lagoa.

2 - ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

A Lagoa de Araruama situa-se no Estado do Rio de Janeiro, na Região dos Lagos, entre as latitudes $22^{\circ}49'$ - $22^{\circ}57'$ S e entre as longitudes $042^{\circ}00'$ - $042^{\circ}25'$ W (Figura 1). Estende-se pelos municípios de Saquarema, Araruama, Iguaba Grande, São Pedro da Aldeia, Cabo Frio e Arraial do Cabo, ocupando uma área de 210 km^2 (incluído o canal de comunicação com o mar), com 40 km de comprimento e largura máxima de 13 km (KJERFVE, 1996). Possui uma profundidade média de 2,94 metros, com o predomínio de extensas áreas rasas, verificando-se a profundidade máxima de 17 metros numa depressão existente na região da Enseada da Massambaba.

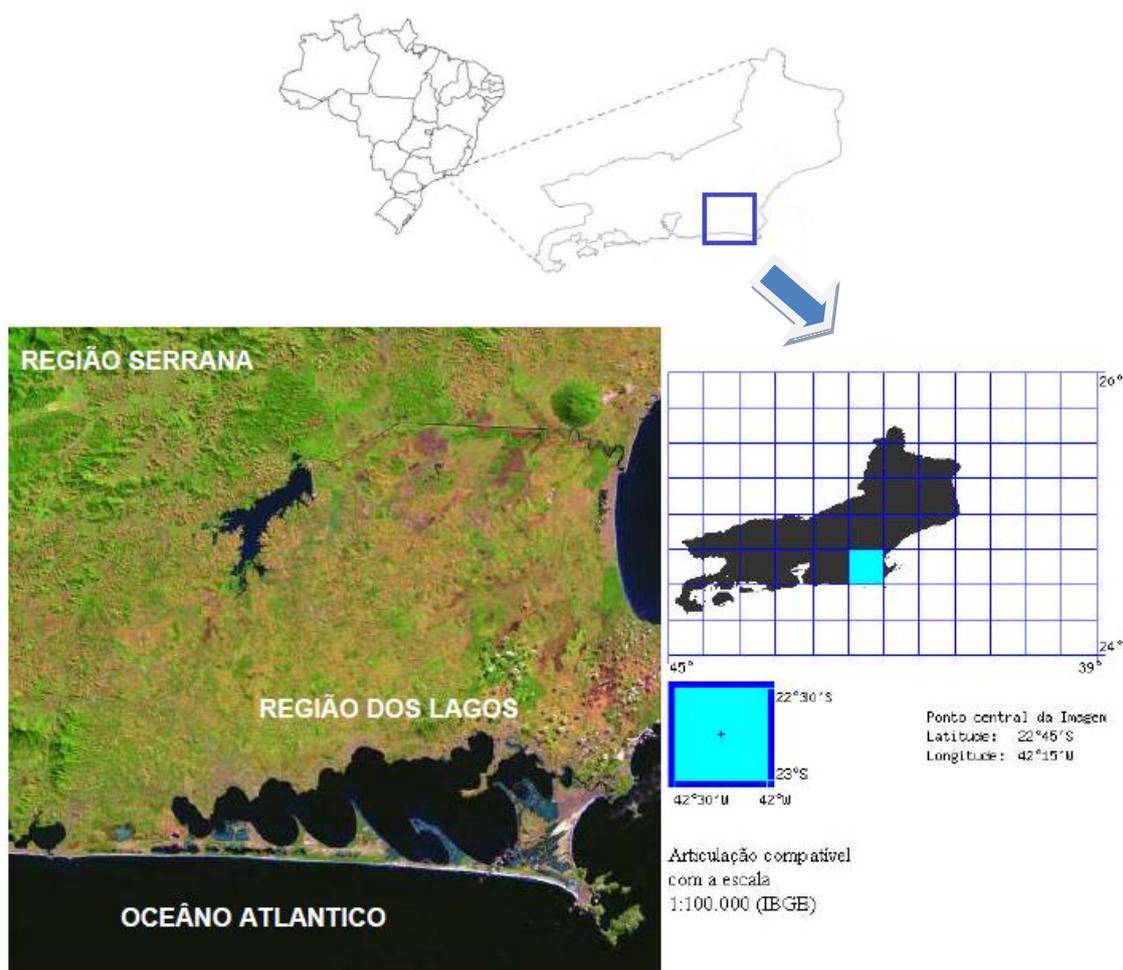


Figura 1: Localização da área de estudo, a partir do mapa do Brasil, posteriormente o do Estado do Rio de Janeiro com enfoque na Lagoa de Araruama (Fonte: IBGE).

2.2 Contexto Geológico

A área de estudo está geotectonicamente inserida no contexto da Faixa Ribeira. Este cinturão estende-se por 1400 km ao longo da região costeira brasileira, possuindo um sistema complexo de dobramentos e empurrões. Tal cinturão é datado do Neoproterozóico ao Eopaleozóico, cerca de 300 milhões de anos atrás, e se situa ao longo da borda sudeste do cráton do São Francisco (CAMPOS NETO, & FIGUEIREDO, 1990).

O domínio Tectônico Cabo Frio, onde o embasamento é caracterizado pelo Complexo Região dos Lagos (Figura 2), foi estruturado durante os estágios terminais do Brasiliano no Paleoproterozóico (SCHMITT, 2011) com transporte para NW, sendo o domínio mais a leste do segmento central da Faixa Ribeira. Foram identificados metamorfitos com diferentes graus de homogeneização, em contato com a natureza transicional, descreveram rochas xistosas, compostas por granada, biotita, ortognaisses e xistos, intercalados com níveis quartzosos e calciossilicáticos. A morfologia da plataforma continental do sudeste do Rio de Janeiro possui curvas batimétricas dispostas sem grandes inflexões ao longo da Lagoa de Araruama, sendo um ambiente bastante monótono, caracterizado por uma homogeneidade topográfica (MUEHE & CARVALHO, 1993).

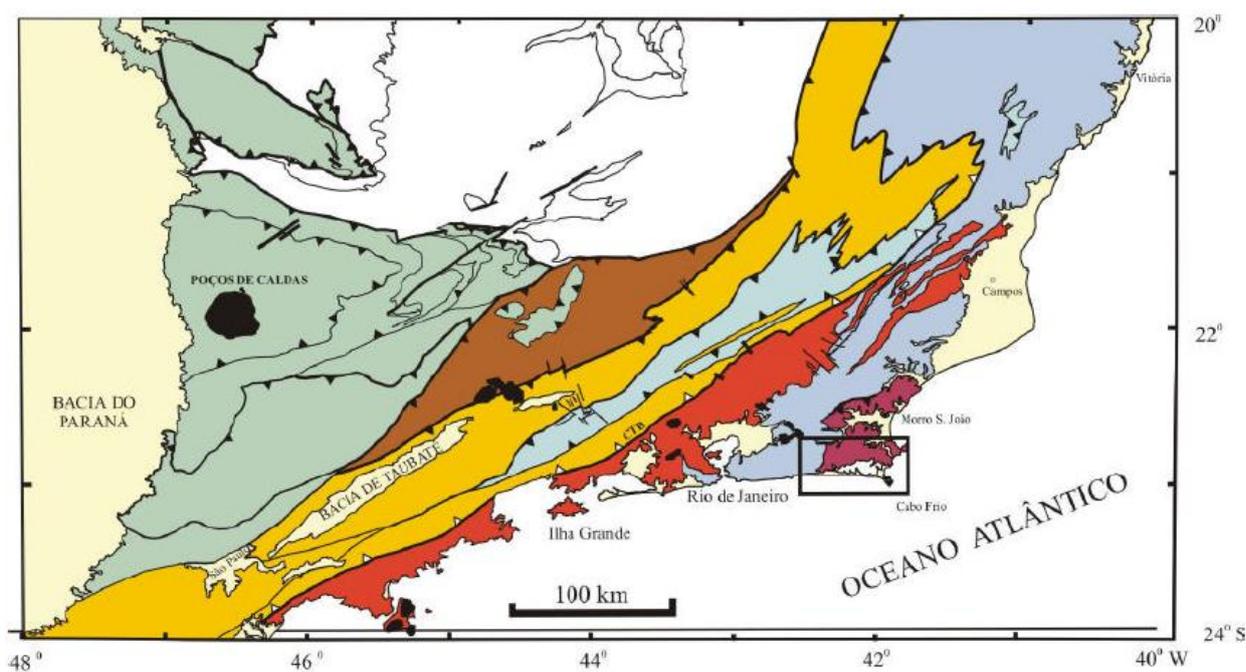


Figura 2: Compartimentação tectônica da borda Sul do Cráton de São Francisco, em destaque o Domínio Cabo Frio (Fonte: Heibron, 1999).

Neste mesmo contexto, pode-se observar na Figura 3 diferentes tipos de depósitos na planície costeira do Domínio Cabo Frio. Na margem norte da planície costeira possuem composição cristalina, com sedimentos de areias mistas flúvio-lagunares. Próximos a estes, juntos a margem norte da laguna são encontrados depósitos flúvio-marinhos siltico-areno-argilosos, ricos em matéria orgânica. E já margem sul da planície encontra-se depósitos de areias quartzosas homogêneas e sem estruturas, de origem quaternária costeira.



Figura 3: Mapa geológico da planície costeira do Domínio Cabo Frio (Fonte: CPRM).

2.3 A formação da Lagoa de Araruama

O litoral do estado do Rio de Janeiro é morfologicamente marcado em grande parte de sua extensão por sistemas de cordões litorâneos transgressivos com formações de lagunas em estágios diversos de involução (MUEHE, 1994). Estes estágios de involução são marcados por diferentes graus de colmatção, associados ao processo de extinção que estas lagunas sofrem em um espaço de tempo geológico. No caso do litoral do Rio de Janeiro diversos autores reconheceram duas formações lagunares que se estabeleceram no reverso de cordões litorâneos associados aos dois últimos máximos transgressivos (TURCQ, 1999).

No caso da Lagoa de Araruama, sua origem é típica da evolução sedimentar do litoral norte fluminense, sendo formada por processos de deposição de sedimentos marinhos. Pode-se observar que a textura destes sedimentos apresenta indícios de intenso retrabalhamento causado por processos costeiros de alta energia (ondas, ventos e correntes) ao longo de períodos de regressão e transgressão marinhas (TURCQ, 1998).

Estudos recentes indicam que sua formação iniciou-se durante a transgressão marinha Pleistocênica há 120.000 anos. Em seguida houve uma regressão, que isolou seu corpo d'água, estendendo-se até o Último Máximo Glacial (UMG, 17.000 anos A.P.). Com a transgressão que se seguiu ao UMG, iniciou-se a formação do sistema de restingas (entre 7.000 e 5.000 anos atrás), disposto em duas linhas de cordões arenosos (a primeira datando de 120.000 anos e a segunda de 7.000 anos), e das pequenas lagunas que ocorrem entre elas (TURCQ, 1998). Segundo MUEHE & CORRÊA (1989), sistemas de restinga de dupla barreira se desenvolvem como resultado de flutuações do nível do mar, sendo a formação das lagunas internas resultado do isolamento de corpos d'água lagunares. Na Figura 4, pode-se observar um esquema sintético da área de estudo realizado por Azevedo Jr. (1991), Silva (1992) e Martin (1997), inferindo o sistema duplo de barreiras litorâneas com suas respectivas datações geológicas.

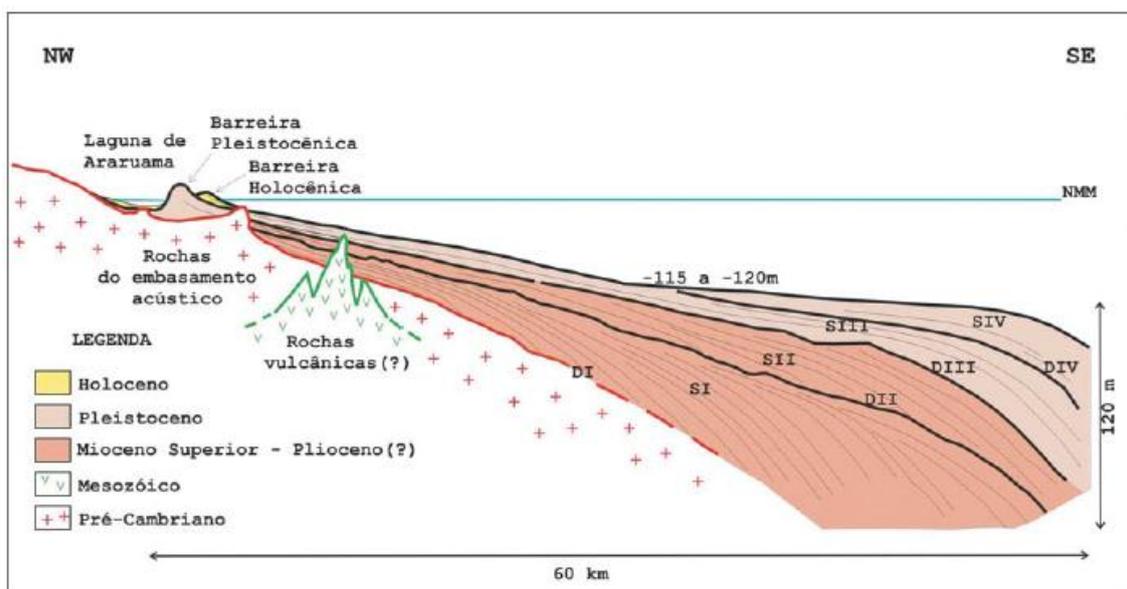


Figura 4: Esquema sintético da estratigrafia da área de estudo, inferindo as seqüências a partir dos estudos de Azevedo Jr. (1991) e Silva (1992) e Martin (1997).

2.3.1 A Teoria de formação dos esporões

O principal agente modelador em costas submetidas à micro-marés, em áreas de influência de ventos alísios e frentes frias, são as ondas de gravidade. As ondas de gravidade são perturbações na superfície da água geradas pelo vento. Desta forma em áreas dominadas por ondas a morfologia do litoral é modificada pelo transporte de sedimentos causado por estas ondulações.

Os estudos iniciais relativos às modificações morfológicas em sistemas lagunares foram realizados por ZENKOVICH (1959). Tal estudo sugere a contínua formação de esporões nas lagoas pela variação espacial do fluxo de sedimentos, quando ondas oblíquas incidem sobre uma irregularidade da linha de costa. Os esporões são protuberâncias na linha de costa em forma de cúspides, formadas por material não coesivo. Assim, estas feições geomorfológicas são encontradas na Lagoa de Araruama (RJ), como observado na Figura 5. Desta forma o conjunto de lagoas como a Rodrigo de Freitas, Maricá-Guarapina, Saquarema e Araruama, se estabelece entre o reverso do cordão pleistocênico e a estrutura cristalina dos maciços costeiros. Uma vez definidas as linhas gerais da morfologia lagunar, é possível se identificar modificações desta morfologia, principalmente pela formação de esporões lagunares, resultantes da mobilização de sedimentos ao longo do perímetro das lagoas por ondas geradas no seu interior.



Figura 5: Mapa da Lagoa de Araruama, com os esporões lagunares da parte sul em destaque (Fonte: Google Earth).

2.4 Geomorfologia Regional

2.4.1 Batimetria

O fundo da Lagoa de Araruama tem sua forma moldada ao longo dos anos pelas interações entre as ondas, correntes e oscilações de seu nível médio do mar, além de sofrer influência das diferentes fontes de sedimento que nela aportam e das dragagens feitas na lagoa. Pode-se observar uma batimetria plana inclinando-se suavemente em direção a um *talweg*, localizado próximo ao continente, que se estende ao longo do eixo maior da laguna. Os cordões arenosos que progradam a partir do continente e da restinga em direção ao interior da laguna reduziram a sua profundidade média a 3 metros, e segmentaram a laguna em pequenas enseadas. Estas enseadas possuem características variadas em termos de sua batimetria, sedimentologia e hidroquímica.

A profundidade média da lagoa levantada em 1984 pela Companhia de Pesquisa de Recurso Mineral (CPRM) é de ordem de 2 a 3 metros, mas há um local onde atinge aproximadamente 17 metros, na enseada de Massambaba, onde o fundo inclina-se de forma suave para uma depressão existente ao longo do eixo maior da lagoa. A morfologia geral do fundo apresenta bacias, platôs e áreas onduladas, todos cortados por vales pronunciados. As áreas submersas, próximas à margem Norte, mostram uma superfície ondulada com morros baixos e bancos arenosos juntos à orla. Na parte Sul, predomina um relevo de bacias e platôs, sendo raras as ondulações.

No mapa abaixo, pode-se observar que ocorrem depressões de forma alinhada ao longo do eixo longitudinal da laguna, que contornam a extremidade de São Pedro da Aldeia, dirigindo-se para Sudeste sugerindo uma paleo-desembocadura bloqueada pelo cordão litorâneo. Uma depressão de menor extensão forma o eixo longitudinal da enseada a oeste do cabo rochoso de São Pedro d'Aldeia, se acopla à depressão central da Lagoa (Figura 6).

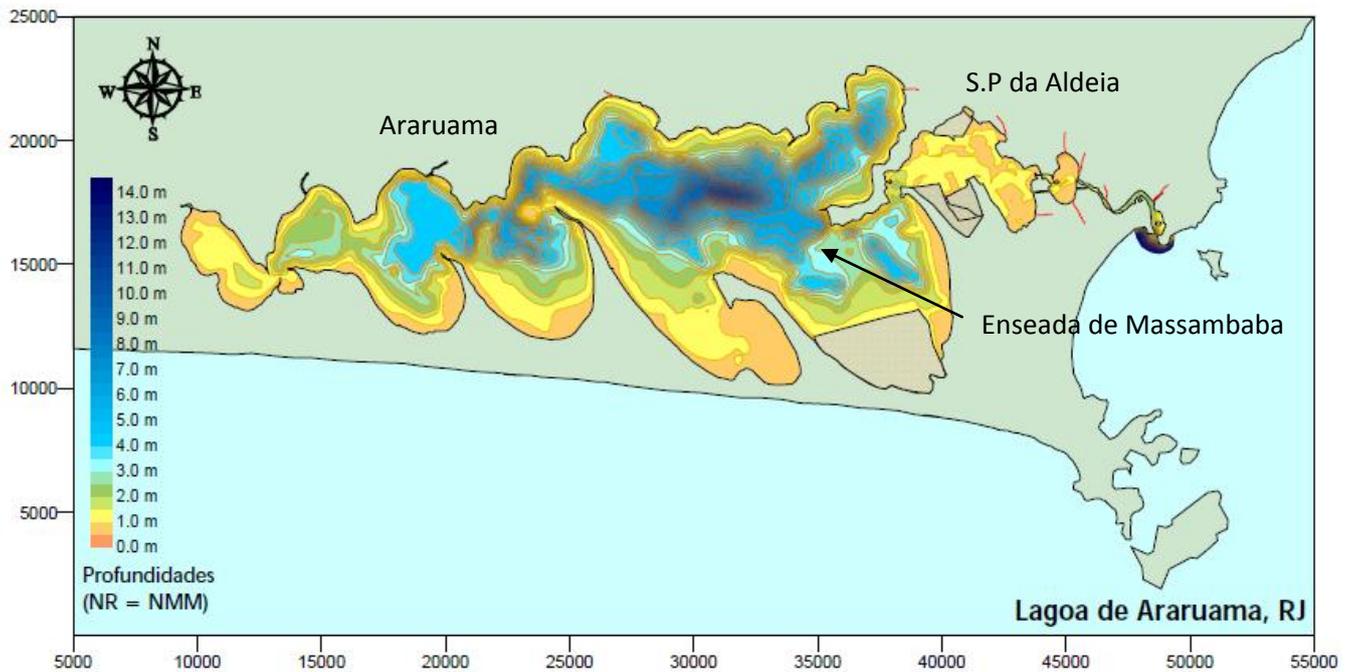


Figura 6: Mapa ilustrativo batimétrico do fundo da Lagoa de Araruama (Fonte: Fundação COOPPETC/UFRJ).

2.4.2 Cobertura Sedimentar

Os tipos de sedimentos encontrados na Lagoa de Araruama podem ser classificados em cinco tipos distintos (Figura 7). Na margem norte são areias mistas flúvio-lagunares, compostas por grão de quartzo subangulosos com porções variáveis de moluscos e algas (cor verde). Seguidos por sedimentos lamosos compostos por vasas orgânicas de fundo da lagoa, caracterizados por lamas fluídas de cor preta na superfície compostas por matéria orgânica coloidal e argilas. A quantidade de conchas é inexpressiva, e são sedimentos que se depositam nas partes mais fundas da lagoa, em bacias ou canais (cor vermelha). Próximos a estes, entretanto com características diferentes, encontram-se as areias de fundo da lagoa (cor azul). Na mesma área são encontrados nas partes submersas dos esporões areias cúspides de cor clara, composta por grãos de quartzo arredondados com o teor de concha variado (cor roxo). Já o sedimento da parte sul da planície costeira são areias de enseadas rasa de origem quaternária, constituídos por campos de dunas eólicas recentes (cor amarelo).

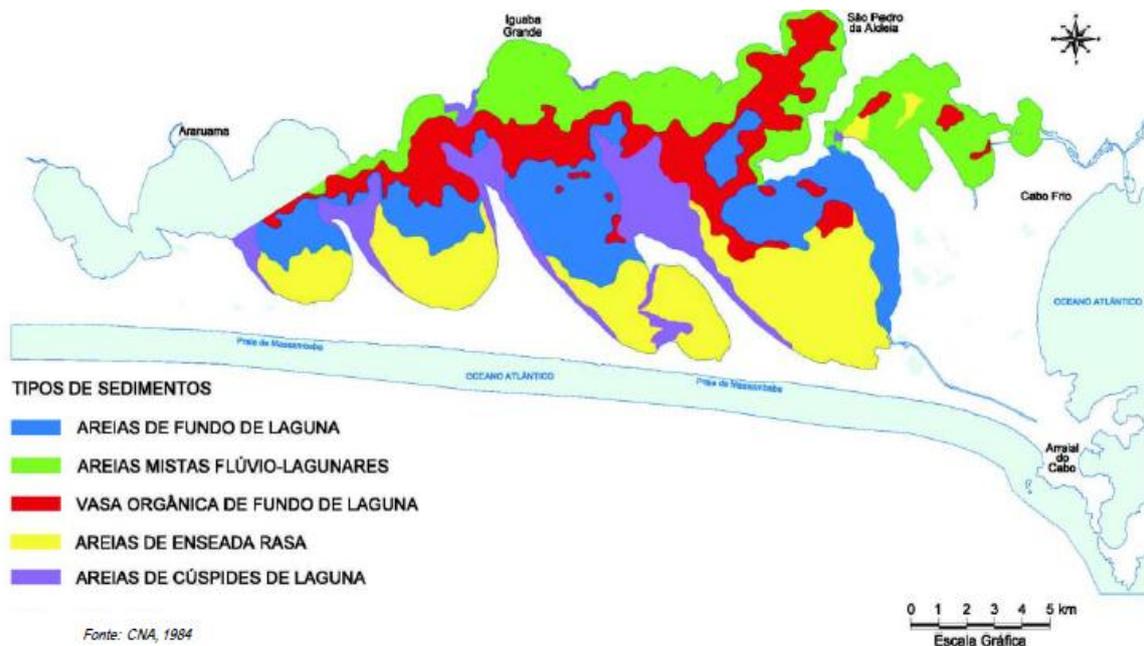
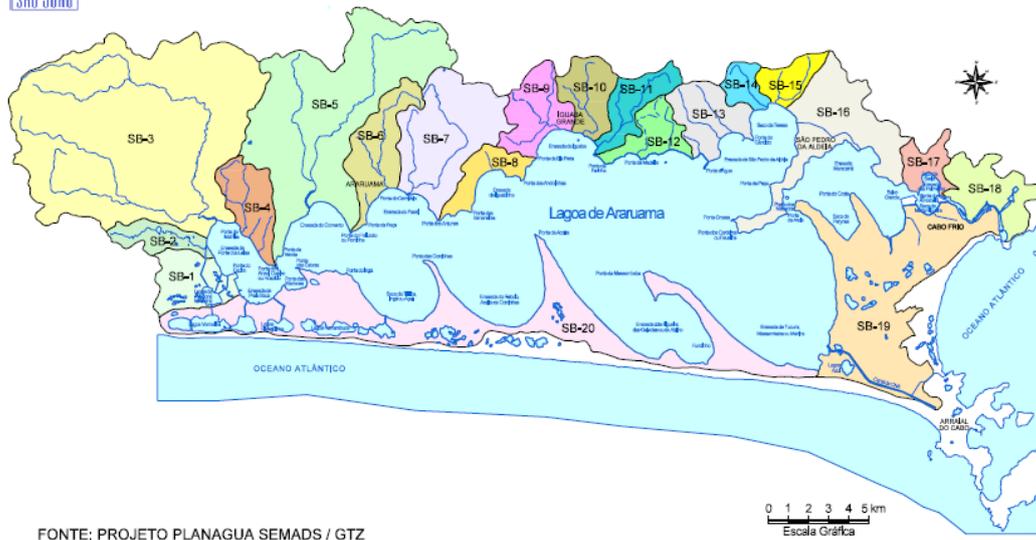


Figura 7: Mapa da cobertura sedimentar da Lagoa de Araruama (Fonte: Projeto Planágua/CNA, 1984).

2.5 Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica da Lagoa de Araruama pode ser dividida em 20 sub-bacias e abrange uma área de 400 km² dos quais aproximadamente 60 km² são de salinas, e possui em seu território sete municípios: Rio Bonito, Saquarema, Araruama, São Pedro da Aldeia, Cabo Frio e Arraial do Cabo (Figura 8). Incluem-se nesta superfície as áreas das restingas de Massambaba e Cabo Frio, cujas drenagens fluem também para a lagoa. A bacia é formada por um conjunto de 20 sub-bacias onde somente dois rios são perenes, os das Moças e o Maturana. Foi concluído que as taxas de sedimentos transportados são baixas devido à pequena vazão dos rios e a topografia relativamente plana da bacia. As maiores cargas sedimentares são as dos rios Mataruna e das Moças. Ressalta-se que por mais que estas cargas de sedimentos sejam pequenas, tais sedimentos fluviais podem constituir uma importante fonte de material para manutenção das praias, ao serem movimentados e depositados pelas correntes.



FONTE: PROJETO PLANAGUA SEMADS / GTZ

Figura 8: Mapa da Bacia Hidrográfica da Lagoa de Araruama (Fonte: Projeto Planágua Semads/GTZ).

2.6 Impactos Ambientais

Durante décadas, a Lagoa de Araruama foi destino de toneladas de esgoto isentos de qualquer tratamento prévio. Contudo, em 1997, apareceram os sinais de colapso: uma ploriferação de algas em algumas enseadas assustando a população e o governo. São vários os motivos da poluição, mas o principal é a grande quantidade de esgoto produzida pela população residente e flutuante lançada sem qualquer tratamento.

As enseadas de São Pedro, Araruama e Iguaba Grande são as mais prejudicadas, assim como o canal de Itajuru. Além do esgoto bruto que chega à Lagoa, outros fatores agravam o problema. Um dos mais importantes é que a maioria das valas negras e dos pequenos córregos foram pavimentados e os brejos drenados. Antigamente, as valas de esgoto atravessavam os brejos e manguezais, assim era desenvolvida uma vegetação gramínea, aguapés e outras plantas de locais encharcados. Tal flora em contato com esse esgoto fazia com que processos físicos, químicos e biológicos absorvessem a biomassa microbiana, auxiliando para a decomposição da matéria orgânica, funcionando como barreira ou sumidouro considerável do esgoto.

Hoje em dia pode-se afirmar que a Lagoa de Araruama sofre o processo de eutrofização, que é o aumento da concentração de nutrientes, especialmente o fósforo e nitrogênio no ecossistema aquático. Tal processo resulta em efeitos nocivos para a qualidade da água como: alterações no pH, queda da salinidade, aumento da concentração de gases como metano e sulfídrico, e diminuição de nutrientes e oxigênio dissolvido na água.

Com as algas proliferando, elas desprendem-se do fundo da Lagoa e formam massas flutuantes e vão dar nas praias de Araruama, São Pedro e Iguaba Grande empurradas pelas correntes e ventos. Diariamente, toneladas de algas mortas misturadas com areais são retiradas pelas prefeituras. Antes fosse só este o maior problema, mas não, além das algas proporcionarem um aspecto de sujeira nas praias e lagoas diminuindo o espelho d'água, elas em decomposição exalam um mau cheiro que afugentam turistas e veranistas da Região dos Lagos. As consequências destes impactos ambientais todos acabam resultando negativamente na economia destas cidades, uma vez que um número menor de turistas irá procurar a região a fim de passar suas férias, além de prejudicar também os próprios moradores e comerciantes, os quais em sua grande maioria dependem do estoque de pescado oferecido pela Lagoa. Assim no mapa abaixo (Figura 9), pode-se observar a localização das principais 17 fontes de esgoto da Lagoa de Araruama.

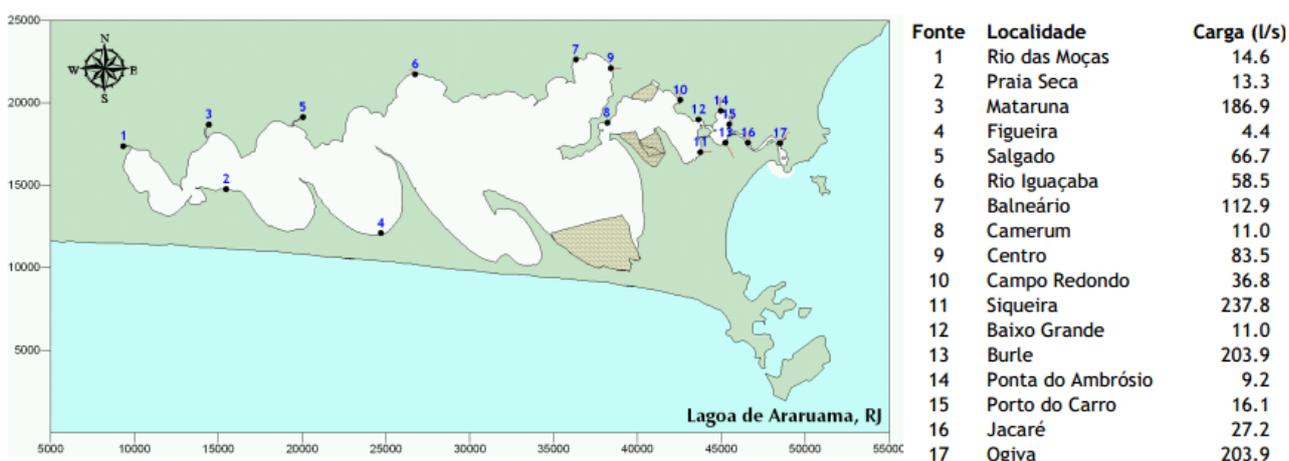


Figura 9: Mapa de localização das 17 fontes de esgoto consideradas na Lagoa de Araruama (Fonte: Fundação COOPPETC/UFRJ).

3 – LEVANTAMENTO DE SÍSMICA RASA

3.1 Fundamentos

A sísmica rasa ou de alta resolução compreende métodos geofísicos que investigam as interfaces geológicas de baixos contrastes de impedância acústica, baixa relação sinal/ruído, além de se constituírem em fontes atenuadores de sinais de alta frequência. Tanto a sísmica convencional quanto a sísmica rasa possuem os mesmos princípios de reflexão sísmica, mas diferem nos seus sistemas de aquisição de dados, das fontes acústicas, os espectros emitidos, os sistemas de processamento e até mesmo a forma dos dados serem interpretados.

Atualmente a sísmica rasa tem sido utilizada para o mapeamento de feições geológicas de pouca profundidade e na investigação de processos sedimentares e na engenharia costeira. Tais levantamentos sísmicos rasos em áreas submersas visam compreender a propagação das ondas acústicas na água, na interface água/fundo marinho, e nos estratos subjacentes, sendo utilizados sinais acústicos com espectros de maior frequência que a sísmica convencional. O resultado da sísmica rasa é apresentado com grande precisão, e as fontes acústicas não produzem danos ou restrições ambientais, utilizando-se embarcações de pequeno e médio porte. Além disso, podem ser visualizadas e interpretadas em tempo real, sem a necessidade de processamentos sísmicos (SOUZA, 2006).

3.2 Tipos de Onda

Para o estudo da sísmica de reflexão o estudo das ondas de corpo (ondas P e S) são de grande importância. Estas ondas propagam-se através dos meios às quais são lançadas e percorrem seus caminhos devido às variações de densidade e composição dos materiais. As ondas P (primárias) são longitudinais ou compressivas e possuem velocidade de propagação maior que das ondas S e propaga-se em meio líquidos, secos e saturados. As ondas S (secundárias) são ondas transversais ou de cisalhamento, possuindo um movimento transversal às ondas P.

Portanto, as velocidade das ondas sísmicas (P e S) podem ser calculadas a partir das seguintes expressões (SCHÖN, 1996):

$$V_p = \sqrt{\frac{k + 4\mu/3}{\delta}} \quad \text{e} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Onde: $V_p \rightarrow$ Velocidade das Ondas P; $V_s \rightarrow$ Velocidade das Ondas S; $K \rightarrow$ Módulo de compressibilidade; $\mu \rightarrow$ Rigidez do meio (para líquidos, $\mu = 0$) (propriedade elástica); $\delta \rightarrow$ Densidade do meio atravessado (propriedade inercial).

Fonte: Applied Geophysics, 2nd Edition, W.M. Telford, L.P Geldart & R.E. Sheriff (1990).

3.2.1 Propagação das Ondas Acústicas

A onda acústica ou sonora é um tipo de energia mecânica que se propaga em um meio elástico, não transportando matéria, somente energia cinética e potencial. As ondas sísmicas são chamadas também de ondas elásticas ou mecânicas, onde o vetor normal à frente de onda é a direção da propagação, ocorrendo de forma esférica e tridimensional.

As regiões de frequência que as ondas sonoras ocupam podem ser classificadas em três divisões: infra-sônico, sônico e ultra-sônico. O infra-sônico é a região de 0 – 20 Hz; de 20 – 20.000 Hz têm-se a região sônica; acima de 20.000 Hz a região ultra-sônica. Neste trabalho, a frequência utilizada foi de 7 kHz, ou seja, uma onda ultra-sônica (GADALLAH, 1994).

Assim, uma das consequências da utilização da sísmica rasa é tornar a rugosidade das superfícies, ou das interfaces, propriedades físicas importantes, pois contribuem para o espalhamento acústico. Observa-se que quanto menor a frequência, menor a absorção, assim o equipamento terá maior penetração, ou seja, operando em baixa frequência, uma maior profundidade será alcançada, esta é a razão pela qual a sísmica rasa é o método que utiliza altas frequências. Em outras palavras, as fontes com altas frequências produzem um registro com maior resolução das camadas geológicas. Entretanto, a sísmica rasa apresenta algumas vezes problemas de visualização. Tal problema ocorre devido ao ruído, seja ele de origem ambiental ou eletrônica, que pode interferir

nos registros. Além disso, com o aumento da profundidade de penetração há a perda da amplitude das reflexões, tornando o imageamento ruim. Sendo assim, é necessária aplicação do processamento deste sinal, a fim de melhorar a qualidade do dado.

Já na sísmica convencional são emitidos sinais de baixa frequência em torno de 60 Hz, com o objetivo de investigar profundidades em torno de 4 – 5 quilômetros abaixo do fundo marinho. É utilizada principalmente na indústria petrolífera, pois possibilita a identificação de uma série de feições geológicas e estruturais, as quais podem servir como reservatório de óleo ou gás (AYRES, 2000).

3.2.2 Interação das Ondas Sísmicas

No dado sísmico, as ondas P são responsáveis para observar a mudança nas velocidades dos meios. Segundo a *Lei de Snell* (Figura 10) fenômenos de reflexão e refração estão relacionados às propriedades físicas de dois meios e o ângulo de incidência desta onda emitida.

Uma onda P incidente em uma interface é dividida em duas componentes: uma onda refletida com velocidade **V1** no mesmo ângulo θ_1 da onda incidente, e uma onda refratada com velocidade **V2** e ângulo refratado θ_2 .

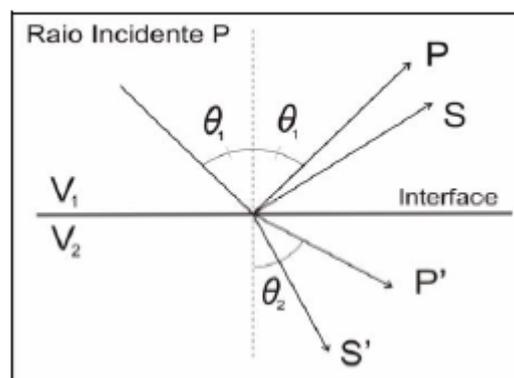


Figura 10: Demonstração da Lei de Snell para onda P incidente em uma interface. Fonte: Applied Geophysics, 2nd Edition, W.M. Telford, L.P Geldart & R.E. Sheriff (1990).

Assim, as propriedades físicas dos dois meios, o ângulo de incidência e a rugosidade do fundo do mar irão determinar a energia refletida para a

superfície e a refratada pelo material adjacente. Depois disso, o registro sísmico é gerado a partir do tempo de percurso das ondas sísmicas geradas artificialmente na superfície e refletidas nas interfaces físicas das camadas.

Dentro deste contexto, é importante analisar a impedância acústica do meio de propagação. Através da amplitude do sinal de retorno é possível classificar diferentes tipos de sedimentos relacionando a intensidade do eco com a cobertura do substrato marinho. Tal propriedade é a relacionada à resistência da passagem da onda sonora, em função da velocidade V_1 do som em um meio e da densidade δ_1 deste meio. Pode ser expressa por:

$$I_1 = V_1 * \delta_1$$

Fonte: Applied Geophysics, 2nd Edition, W.M. Telford, L.P Geldart & R.E. Sheriff (1990).

Já o contraste de impedância acústica entre dois meios distintos é denominado coeficiente de reflexão. Este coeficiente é a razão entre a amplitude da onda refletida pela incidente. Para de incidência normal tem-se:

$$R = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{\delta_2 V_2 - \delta_1 V_1}{\delta_2 V_2 + \delta_1 V_1}$$

Fonte: Applied Geophysics, 2nd Edition, W.M. Telford, L.P Geldart & R.E. Sheriff (1990).

uma menor reflexão das ondas acústicas, exemplo: interface arenito/folhelho. Já em meios extremamente distintos tendem a uma reflexão maior quando o sinal acústico atinge sua superfície, exemplo: interface água/ar. Quanto maior este contraste de impedância acústica, maior a proporção de energia refletida e melhor a demarcação do fenômeno de reflexão das ondas nas interfaces. Interfaces com baixo contraste de impedância resultam em uma baixa porção da energia refletida, e caso não exista contraste de impedância ($R=0$), toda energia será transmitida.

Como os meios que as ondas se propagam podem ser homogêneos ou heterogêneos, com propriedades físicas distintas, a velocidade de propagação da onda sísmica irá variar em função destas características. Por isso que em

um gás ou líquido (meio fluido), somente as ondas longitudinais se propagam, e para as ondas transversais, o meio deve sofrer tensões de cisalhamento, se comportando de maneira elástica, onde a velocidade de propagação será influenciada pela porosidade, composição do material, densidade, pressão e temperatura (SHERRIF & GELDART, 1995).

3.3 Sismoestratigrafia em Sísmica Rasa

Uma seqüência deposicional é uma unidade composta por um pacote de estratos relacionados geologicamente, limitados por concordâncias ou discordâncias. Analisando uma seqüência sísmica, observa-se uma subdivisão da seção sísmica em pacotes de reflexões concordantes, que representam estratos sísmicamente relacionados com a cronoestratigrafia. Uma fácies sísmica é a unidade tridimensional de reflexões dentro de uma sismoseqüência, que é resultado de processos sedimentares registrados em reflexões sísmicas. A análise das sísmofácies procura identificar padrões de reflexões sísmicas e suas relações dentro das unidades sísmicas, interpretando os seus significados geológicos (VAIL, 1977).

Como um dos objetivos está relacionado à sismoestratigrafia da Lagoa de Araruama, foram mapeados perfis sísmicos de subsuperfície, no intuito de analisar uma sucessão de camadas estratigráficas dispostas em um padrão, limitadas no topo e na base por superfícies de inundações marinhas ou suas superfícies correlativas. A seguir serão apresentados os resultados, os quais apresentam uma boa qualidade de imagem, sendo possível estimar a espessura destas camadas estratigráficas, indicando a presença de paleocanais, e identificando a profundidade do embasamento cristalino.

4 – METODOLOGIA

A sísmica de reflexão é usada frequentemente pelas indústrias de petróleo, devido ao seu alto poder de resolução da subsuperfície terrestre. O método consiste em observar o tempo de trânsito das ondas elásticas na água até a chegada aos receptores (geofones ou hidrofones), podendo determinar a

distribuição da velocidade e identificar onde a onda foi refletida e refratada (AYRES, 2000).

A aquisição dos dados sísmicos para este estudo foi feita através do transdutor do modelo Raytheon RTT 1000 A (*Sub-Bottom Profiler*), ilustrado na Figura 11. Este modelo de transdutor opera na frequência de reflexão de ondas de 7 kHz, podendo atingir a profundidade de aproximadamente 20 metros. Segundo AYRES (2000), as principais características desta fonte são a baixa potência necessária para a geração do sinal, e a melhor repetibilidade do sinal emitido, além de serem equipamentos portáteis e simples, o que permitem a operação em pequenas embarcações.

O dado possui projeções de sistemas de coordenadas cartesianas UTM com o Datum horizontal Córrego Alegre. Não foi necessário o processamento das linhas sísmicas, uma vez que a resolução da imagem de subfundo já apresentava uma boa qualidade. Já a interpretação final das estruturas em subsuperfície foi realizada através do Software Microsoft Power Point.

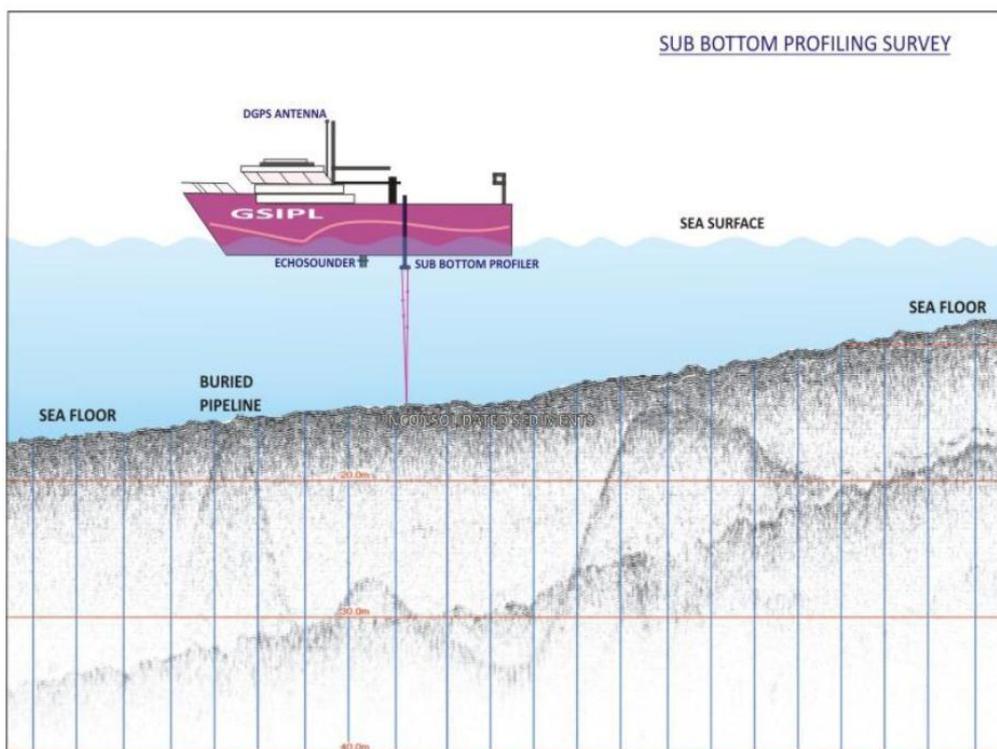


Figura 11: Demonstração de uma aquisição sísmica realizada a partir de um *Sub-Bottom Profiler* (Fonte: www.geostar-surveys.com).

Para a elaboração deste trabalho, serão analisadas as linhas sísmicas realizadas por MUEHE, D. Segue abaixo o mapa da Lagoa de Araruama com as linhas sísmicas que são alvo do estudo (Figura 12).

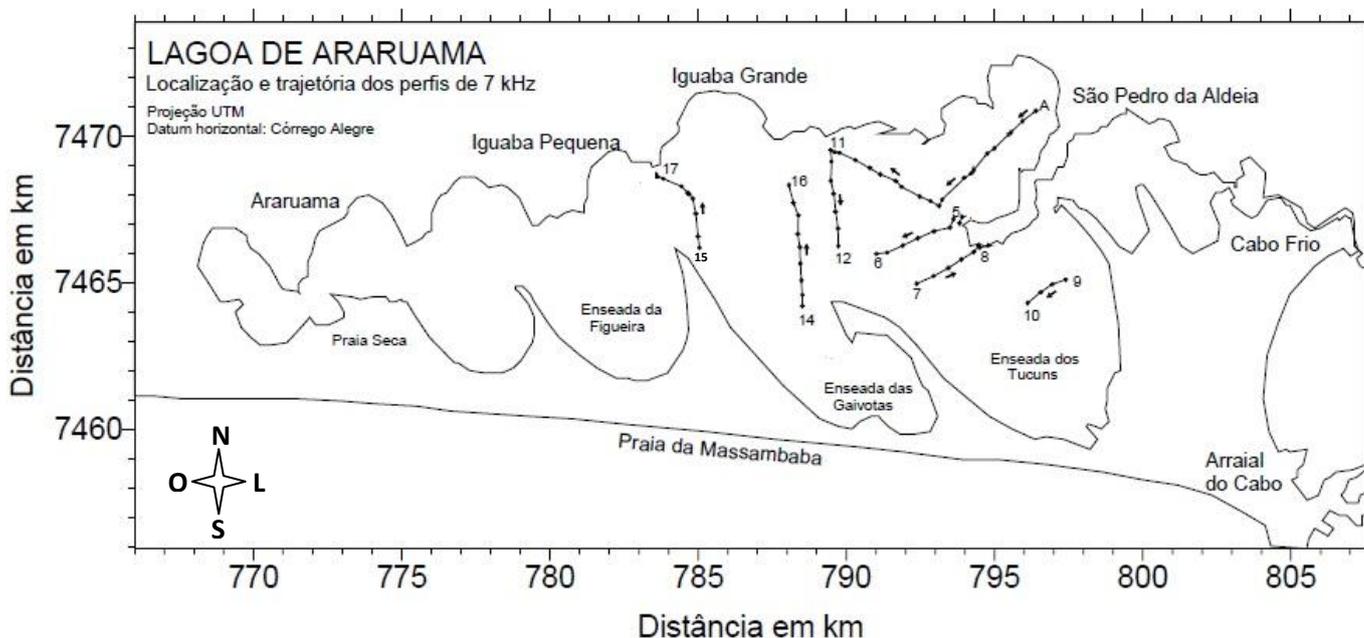


Figura 12: Mapa de localização das linhas sísmica que serão interpretadas (Fonte: Muehe,D/Adaptado: Yuri).

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os registros sísmicos revelaram quatro tipos de ecocaráter, seguindo a classificação proposta por BAPTISTA NETO et al., 1996; QUARESMA et al., 2000., OLIVEIRA., 2000 & CATANZARO et al., 2004. O ecocaráter do tipo I apresentando forte reflexão, não ocorrendo penetração do sinal e sem reflexões de subfundo, com sedimentos predominantemente arenosos. Do tipo II, compreendendo um fundo distinto com refletores planos contínuos, com um processo calmo de sedimentação, indicando sedimentos lamosos (argila e silte), seguidos por uma estrutura sedimentar que pode ser interpretada como o embasamento acústico. O ecocaráter do tipo III, possui também forte reflexões como do tipo I, entretanto se difere por ser um ambiente transicional entre sedimentos grossos de fundo da laguna (areias) e finos (argilas), além de possuir refletores múltiplos (plano-paralelos) de aspecto difuso. Já no ecocaráter do tipo IV, possui um truncamento de refletores com uma superfície ligeiramente rugosa, ocorrendo no canal central da lagoa preenchido por

sedimentos tipicamente lamosos, classificados como vasas orgânicas de fundo da laguna. A morfologia do fundo da Lagoa de Araruama é caracterizada por uma superfície de pequena profundidade, que se inclina suavemente em direção a uma calha alongada, paralela ao eixo longitudinal do corpo lagunar. Com associações realizadas entre dados sedimentológicos e registros de alta-frequência, foi possível identificar e caracterizar geomorfologicamente seu subfundo de acordo com os quatro tipos de ecocaráter apresentados anteriormente.

O ecocaráter do tipo I (Figura 13) pode ser exemplificado por locais que possuem areais cúspides da lagoa, as quais provavelmente estão dispostas neste local devido à proximidade dos esporões lagunares, formando grandes bancos de areia, com profundidade relativamente baixa de aproximadamente 60 centímetros.

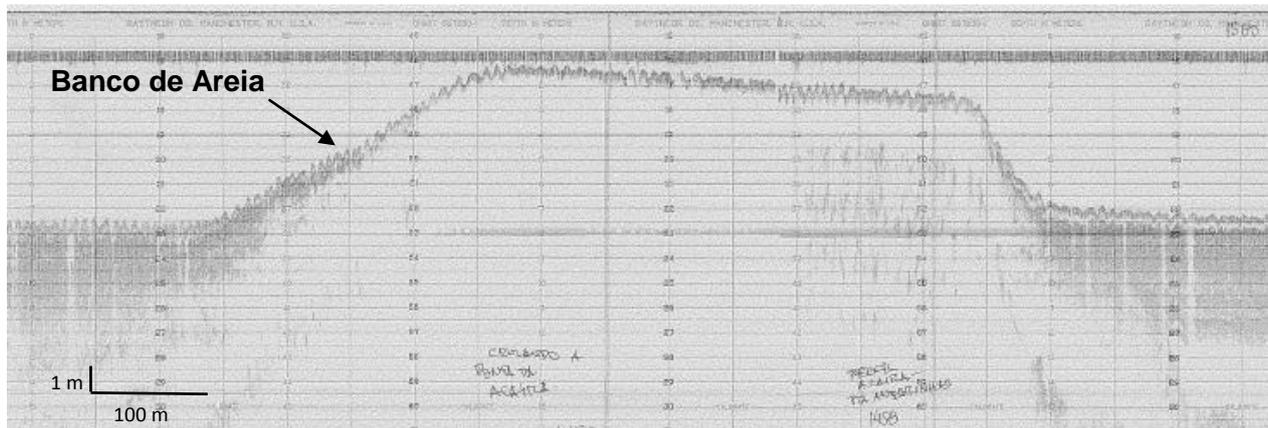


Figura 13: Perfil de sub-superfície (segmento 15 → 17) ilustrando o ecocaráter do tipo I, com um banco de areia em destaque (Fonte: Muehe,D/Adaptado: Yuri).

O relevo a leste da laguna se apresenta abrupto, com pequenas bacias de drenagem e um longo espigão cristalino elevado, formando o flanco da enseada a sul de São Pedro da Aldeia. Assim, esta área pode ser classificada como ecocaráter tipo II (Figura 14), associada a presença do embasamento acústico na profundidade de aproximadamente 10 metros, disposto abaixo uma camada de sedimentos lamosos plano-paralelos.

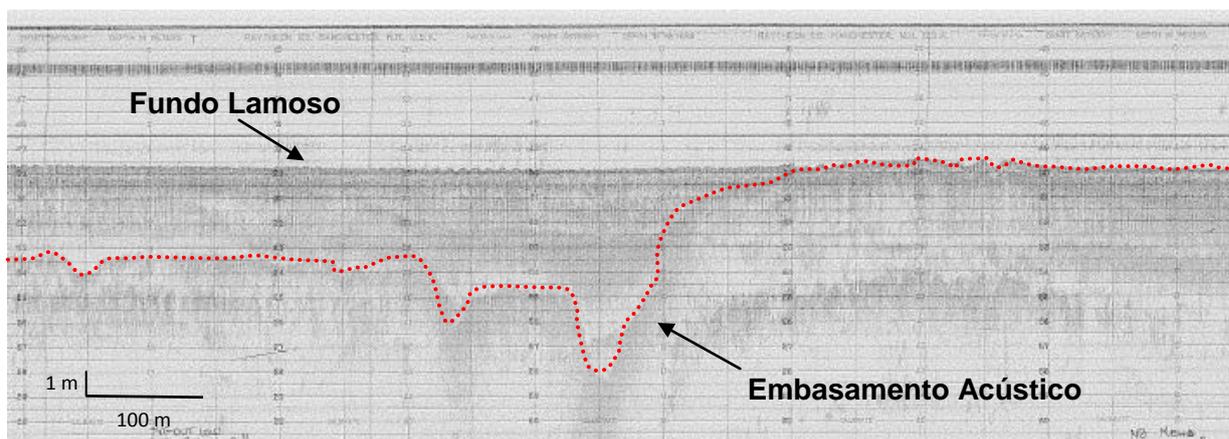


Figura 14: Perfil de sub-superfície (segmento A-6 → 11) ilustrando o ecocaráter do tipo II (Fonte: Muehe,D/Adaptado: Yuri).

O ecocaráter do tipo III (Figura 15) pode ser evidenciado em ambientes transicionais, onde são encontrados sedimentos arenosos de fundo da lagoa misturados com vasas orgânicas. Tal característica faz com que a área possua refletores múltiplos em sua seção sísmica, com a presença de *sanwaves* na sua superfície.

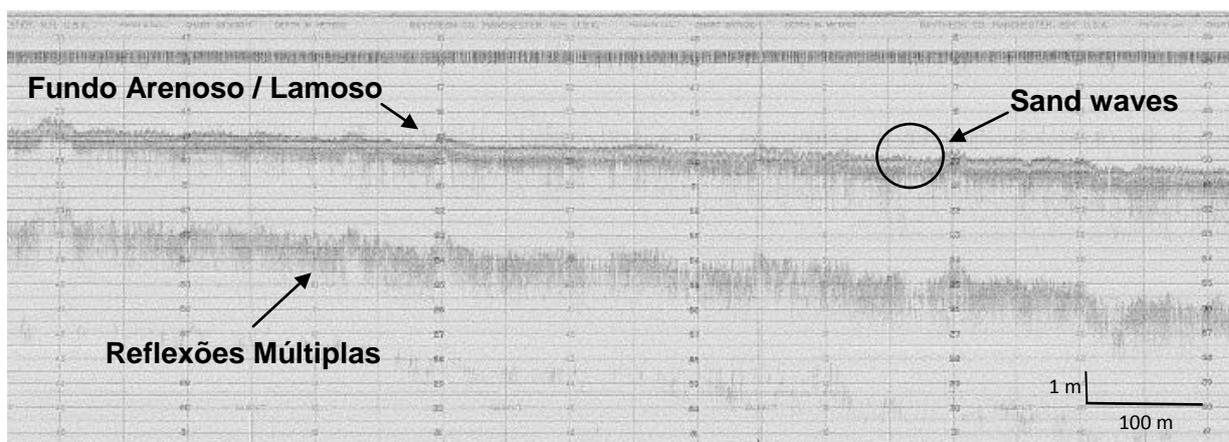


Figura 15: Perfil de sub-superfície (segmento 14 → 16) ilustrando o ecocaráter do tipo III (Fonte: Muehe,D/Adaptado: Yuri).

Já no ecocaráter do tipo IV (Figura 16) é encontrado a presença de paleocanais, bem entalhados, preenchidos por sedimentos lamosos, os quais possuem aproximadamente 5 metros de espessura, indicando a ocorrência pretérita de erosão.

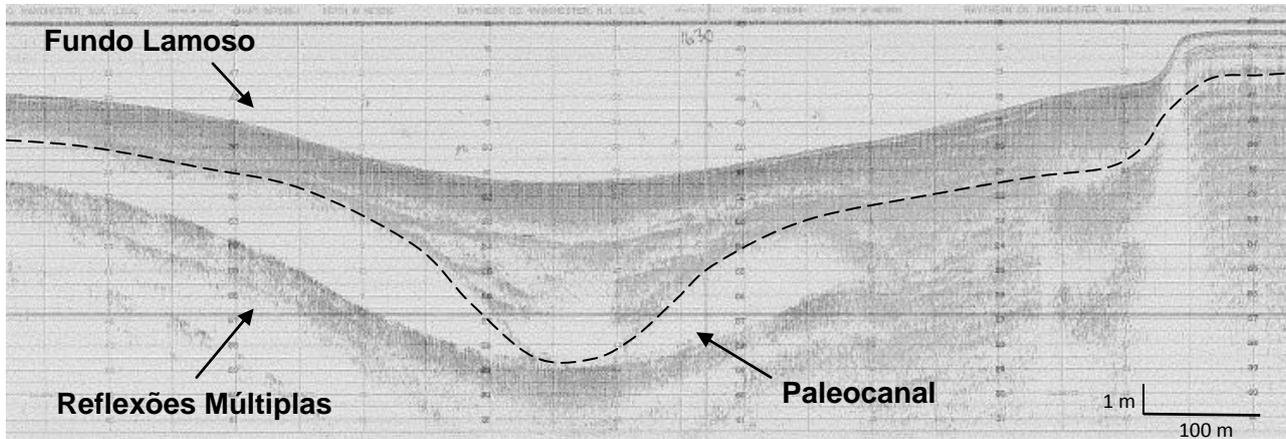


Figura 16: Perfil de sub-superfície (segmento 9 → 10) ilustrando o ecocaráter do tipo IV. Nota-se a presença de um paleo-canal sobre a calha longitudinal da lagoa (Fonte: Muehe,D/Adaptado: Yuri).

Analisando mais quatro perfis sísmicos (Figura 17), que foram gerados ao redor da laguna, foi possível traçar e gerar um mapa que demonstre o trajeto do paleocanal principal que corta o eixo longitudinal da Lagoa, dividindo-a em eixo norte e sul, de acordo com o mapa da Figura 18.

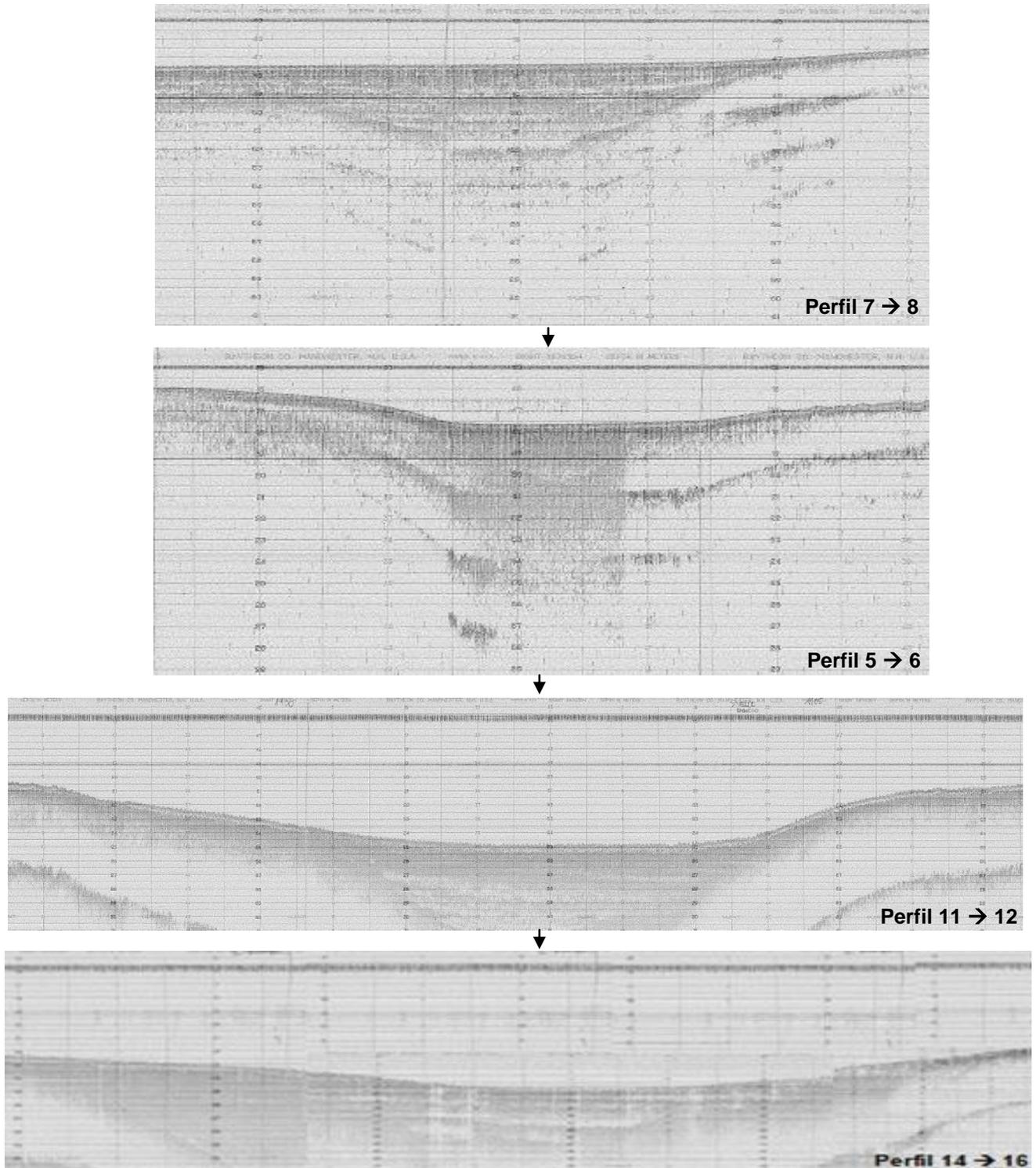


Figura 17: Perfis de subsuperfície que evidenciam o paleocanal principal da Lagoa de Araruama (Fonte: Muehe,D/Adaptado: Yuri).

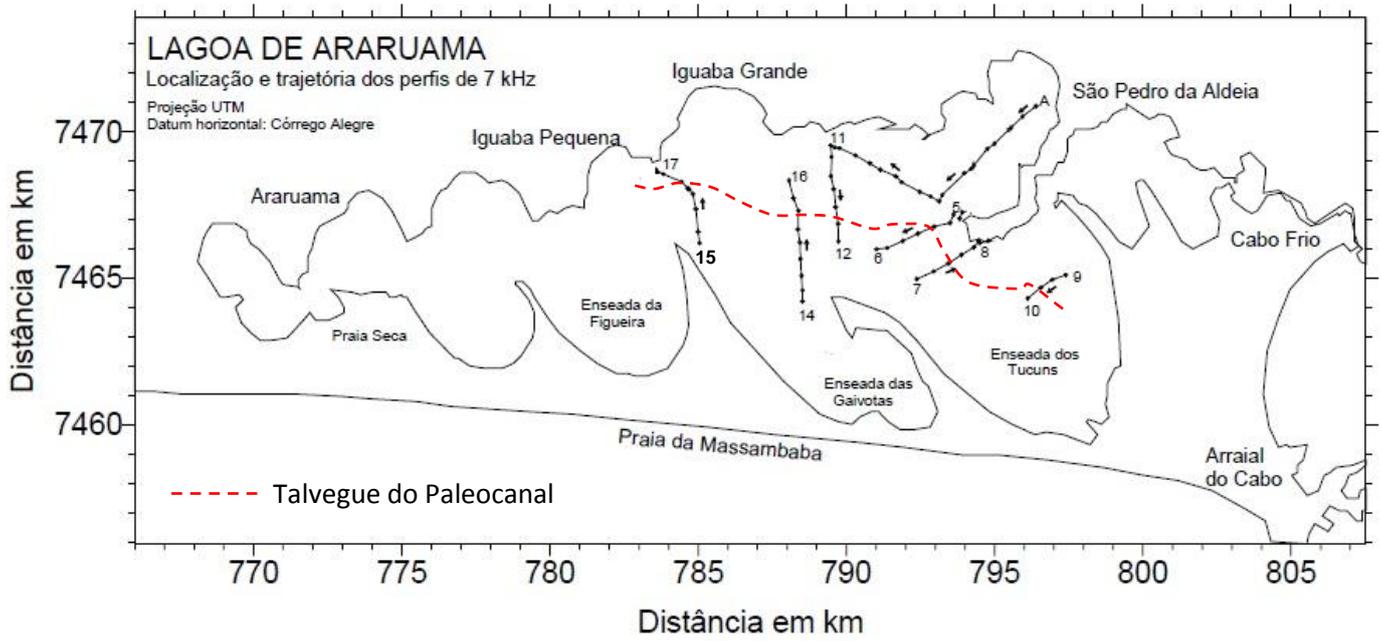


Figura 18: Trajeto do paleocanal principal da Lagoa de Araruama (Fonte: Muehe,D/Adaptado: Yuri).

6 – CONCLUSÃO

A associação de dados sedimentológicos com a sísmica rasa de alta resolução (7,0 kHz) foram essenciais para o entendimento das características do fundo e subfundo da Lagoa de Araruama. Foi possível identificar 4 (quatro) tipos distintos de ecocaráter que se associam com os tipos de sedimentos de fundo, e com a morfologia lagunar. Foram evidenciados também paleocanais preenchidos por sedimentos lamosos, que variam sua espessura, os quais podem ser relacionados com a disposição pretérita da bacia hidrográfica da laguna. Além disso, pode-se observar o embasamento acústico na enseada de São Pedro da Aldeia, em forma de pão-de-açúcar, típico da região, em uma profundidade média de 10 metros, alinhado em uma direção NE-SW.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉ, D. L., OLIVEIRA, M. C., OKUDA, T., HORTA A. M. T. C., SOLDAN, A. L., MOREIRA, I. M. N. S., ROLLEMBERG, M. C. E. & FONSECA-HEIZEN, V. E. Estudo preliminar sobre as condições hidroquímicas da Lagoa de Araruama, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas da Marinha, 1981.

APPLIED GEOPHYSICS, 2nd Edition, W.M. Telford, L.P Geldart & R.E. Sherif (1990).

ARTUSI, L. 2004. Geologia, geomorfologia e sismoestratigrafia rasa da plataforma continental ao largo da Laguna de Araruama – RJ. Lagemar, Universidade Federal Fluminense – UFF (Dissertação de mestrado).

AYRES, A. N. 2001. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. Brazilian Journal of Geophysics, vol. 18(3).

BAPTISTA, NETO JA, DIAS G. T. M & SILVA, C. G. 2009. Distribuição Sedimentar da Lagoa Rodrigo de Freitas através da sísmica de alta resolução. Revista Brasileira de Geofísica, 29 (1): 187-195.

BAPTISTA NETO JA, SILVA MAM & FIGUEIREDO Jr AG. 1996. Sísmica de alta frequência e o padrão de distribuição de sedimentos na Enseada de Jurujuba (Baía de Guanabara) – RJ/Brasil. Revista Brasileira de Geofísica, 14(1): 51–58.

BARBIÉRI, E. B. Ritmo climático e extração do sal em Cabo Frio. Revista Brasileira de Geografia, v. 7, n. 4, p. 23-109, 1975.

BIDEGAIN, P. S. PRIMO & BIZERRIL, C. R, FONTONELLI. B. 2002. Perfil Ambiental do Maior Ecossistema Lagunar Hipersalino do Mundo. Projeto Planágua Semads, vol 12.

CAMPOS NETO, M.C. e FIGUEIREDO, M.C.H. 1990. Evolução geológica dos terrenos Costeiros, Paraíba do Sul e Juiz de Fora (RJ-MG-ES). In: Cong. Bras. Geol., 36, Natal, 1990. *Anais...* SBG, 6:2631-2648.SC

CATANZARO LF, BAPTISTA NETO JA, GUIMARÃES MSD & SILVA CG. 2004. Distinctive sedimentary processes in Guanabara Bay – SE/Brazil, based on the analysis of echo-character (7.0 kHz). *Revista Brasileira de Geofísica*, 22(1): 69–83.

FERNANDEZ, G. B. 2006. Potencial de formação de esporões em lagunas. Programa de Pós-graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Departamento de Geografia, Laboratório de Geografia Física (LAGEF), Universidade Federal Fluminense.

FLOOD, RD. 1980. Deep sea sedimentary morphology: modelling and interpretation of echo-sounding profiles. *Marine Geology*, 38: 77–92.

GADALLAH MR. 1994. Reservoir Seismology-Geophysics in Nontechnical Language. Publisher: Pennwell Corp, Tulsa, 369 pp.

GELDART L.P. 1995. *Exploration Seismology*.

GOMES, M. P. 2009. Aquisição, processamento e análise de dados de sísmica de alta resolução na plataforma continental norte do Rio Grande do Norte: Vale Inciso do Rio Açu. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN (Dissertação de mestrado). p. 56-75.

KJERFVE, B., SCHETTINI, C. A. F., KNOPPERS, B., LESSA, G. & FERREIRA, H. O. Hydrology and salt balance in a large, hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 42, p 701-725, 1996.

LESSA, G. C. Considerações sobre o comportamento hidráulico do canal de Itajuru - laguna de Araruama (RJ). In: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 3., 1989, Nova Friburgo, Anais. 1989, p. 334-347.

MUEHE, D., CARVALHO, V. G. 2006. Gênese da morfologia do fundo da Lagoa de Araruama e cordões litorâneos associados. Instituto de Geociências – UFRJ, Departamento de Geografia, Laboratório de Geografia Marinha.

MUEHE, D., CARVALHO, V. G. 1993. Geomorfologia, cobertura sedimentar e transporte de sedimentos na plataforma continental interna entre a Ponta de Saquarema e o Cabo Frio (RJ). Boletim do Instituto de Oceanografia, vol. 41(1/2): p. 1-12.

QUARESMA VS, DIAS GTM & BAPTISTA NETO JA. 2000. Caracterização da ocorrência de padrões de sonar de varredura lateral e sísmica de alta frequência (3,5 e 7,0 kHz) na porção sul da Baía de Guanabara – RJ. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, 18(2): 201–214.

RIBEIRO, F. L. B. 2002. Modelagem da Lagoa de Araruama (RJ). Fundação Coppetec – COPPE (UFRJ).

SOUZA LAP. 2006. A investigação geofísica em projetos de dutovias. II Simpósio Brasileiro de Geofísica, Natal-RN. Resumos Expandidos. CD-ROM.

SCHMITT, R.S. 2001. Orogenia Búzios – Um evento tectono-metamórfico cambroordoviciano caracterizado no Domínio Tectônico de Cabo Frio, Faixa Ribeira – sudeste do Brasil. *Tese de Doutorado, IG/UFRJ*. 273p.

SHERRIF R.E. 1995. Exploration Sismology.

VAIL, P.R. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 4. Mem. Am. Assoc. Pet. Geol. 26, 83-97.

VIANA, S. M. 2003. Petrografia e geoquímica dos ortognaisses do complexo Região dos Lagos, Araruama – Cabo Frio (RJ). Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ (Dissertação de mestrado).

WASSERMAM, J. C. F. A. 2006. Departamento de Análise Geoambiental. Programa de Pós-graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Universidade Federal Fluminense.

ZENKOVITCH VP, 1959. On the genesis of cusped spits along lagoon shores. *Journal of Geology*, 67(3): 269-277.